TICMET '25

The 6th International Conference of Materials and Engineering Technology

6. Uluslararası Malzeme ve Mühendislik Teknolojileri Konferansı

TÜBİTAK

PROCEEDING BOOK

6-9 OCTOBER, 2025

GAZİANTEP UNIVERSITY
MÂVERA CONGRESS AND ART CENTER

GAZİANTEP - TÜRKİYE

Konferans Hakkında Detaylı Bilgi | Detailed Information About the Conference : www.ticmet.org

CONFERENCE OBJECTIVE

The main purpose of TICMET'25 is to present the latest research and results of scientists related to materials and engineering technologies. This conference provides different field delegates with opportunities to exchange new ideas and application experiences, build business or research relationships, and find global partners for future collaboration. After this science feast, your abstract/full texts will be published in conference book with ISBNs and will be brought to the world of science literature with open access and significant contributions will be made to the scientific field.

The 6th International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET'25) will be held on 06-09 October 2025 in partnership with Hasan Kalyoncu University, Gaziantep Islamic Science and Technology University and Gaziantep University.

The conference organizing committee is pleased to invite prospective authors to send their original texts to TICMET'25. All papers will be reviewed and evaluated by the referees in the field, based on their technical and/or research content depth, accuracy, relevance to the conference, contributions, and readability. Selected papers presented at the conference will be published in conference book as an abstract and then will be proposed for publication in one of the following journals:

* **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies (JSCMT)** (TR Dizin)
* **International Advanced Researches and Engineering Journal (IAREJ)** (TR Dizin)
* **Journal of Advances in Manufacturing Engineering (JAME)** (TR Dizin)
* **Turkish Journal of Electromechanics and Energy** (TJOEE)
* **International Journal of Materials and Engineering Technologies (TIJMET)** (Dergipark)

I would like to thank all participants who presented papers at the TICMET 25 conference, all my colleagues who took part in the organization, and all our sponsors who provided financial support.

This symposium was supported by the Research Fund of Gaziantep University and by TÜBİTAK under the 2223-B program.

Best regards,

Prof. Dr. Necip Fazıl YILMAZ

Conference Chair

PROGRAM COMMITTEES

Chair

Prof. Dr. Necip Fazıl Yılmaz, Gaziantep University – TR

Organizing Committee

Prof. Dr. Necip Fazil Yilmaz, Gaziantep University - TR

Prof. Dr. Metin Bedir, Gaziantep Islamic Science and Technology University – TR

Prof. Dr. Sultan Öztürk, Karadeniz Technical University – TR

Prof. Dr. Ömer Necati Cora, Karadeniz Technical University – TR

Assoc. Prof. Mustafa Ergin ŞAHİN, Recep Tayyip Erdoğan University - TR

Assoc. Prof. Dr. Kürşat İçin, Karadeniz Technical University – TR

Prof. Dr. Mustafa Bakkal, Istanbul Technical University - TR

Prof. Dr. Halil Ibrahim Kurt, Samsun University - TR

Prof. Dr. Zakaria Boumerzoug, University Of Biskra - DZ

Assist. Prof. Dr. Erhan Durur, Gaziantep University - TR

Assist. Prof. Dr. Musa Yilmaz, Gaziantep University – TR

Dr. Mahmut Furkan Kalkan, Gaziantep University – TR

Lect. Aykut Bilici, Gaziantep University – TR

Research Assist. Hasan Mithat Delibaş, Hasan Kalyoncu University – TR

Hakan Yilmaz, Secretariat – TR

Mücahit Doğan, Secretariat – TR

Scientific Committee (National Committee)

Prof. Dr. Abdulkadir Eksi, Cukurova University - TR

Prof. Dr. Abdulkadir Cevik, Gaziantep University – TR

Prof. Dr. Ahmet Erklig, Gaziantep University – TR

Prof. Dr. Ali Gursel, Duzce University – TR

Prof. Dr. Ali Tolga Bozdana, Gaziantep University – TR

Prof. Dr. Emrah Ozahi, Gaziantep University – TR

Prof. Dr. Enver Atik, Celal Bayar University - TR

Prof. Dr. Erol Yılmaz, Recep Tayyip Erdoğan University, TR

Prof. Dr. Gençağa Pürçek, Karadeniz Technical University - TR

Prof. Dr. Ismail Saritas, Selcuk University - TR

Prof. Dr. Mehmet Cengiz Kayacan, Süleyman Demirel University - TR

Prof. Dr. Mete Kalyoncu, Konya Technical University - TR

Prof. Dr. Mustafa Bakkal, Istanbul Technical University - TR

Prof. Dr. Mustafa Cigdem, Yildiz Technical University - TR

Prof. Dr. Oguzhan Yilmaz, Gazi University - TR

Prof. Dr. Omer Eyercioglu, Gaziantep University - TR

Prof. Dr. Rahmi Unal, Gazi University - TR

Prof. Dr. Serdar Salman, National Defense University - TR

Prof. Dr. Suleyman Can Kurnaz, Sakarya University – TR

Prof. Dr. Sultan Ozturk, Karadeniz Technical University - TR

Prof. Dr. Ugur Cem Hasar, Gaziantep University - TR

Prof. Dr. Yahya Bozkurt, Marmara University – TR

Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ, Karadeniz Technical University, TR

Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI, Karadeniz Technical University, TR

Prof. Dr. Kursat Gov, Gaziantep University – TR

Prof. Dr. Bülent Öztürk, Karadeniz Technical University – TR

Assoc. Prof. Dr. Abdulcabbar Yavuz, Gaziantep University – TR

Assoc. Prof. Dr. Esin Sarioglu, Gaziantep University - TR

Assist. Prof. Dr. Ali Yasar, Selcuk University - TR

Assist. Prof. Dr. Aziz Baris Basyigit, Kirikkale University - TR

Dr. Engin Ergul, Dokuz Eylul University - TR

Scientific Committee (International Committee)

Prof. Dr. Andrey Tsarkov, Moscow State Technical University - RU

Prof. Dr. Bekir Sami Yilbas, King Fahd University of Petroleum and Minerals - SA

Prof. Dr. Fabienne Delaunois, University Of Mons - BE

Prof. Dr. Hazman Seli, University Of Sains Malaysia - MY

Prof. Dr. Heiba Zein, Ain Shams University - EG

Prof. Dr. Marwan K Khraisheh, Hamad Bin Khalifa University - QA

Prof. Dr. Mohamed Elsayed Yahia, International University of Sarajevo - BA

Prof. Dr. Muammer Koç, Hamad Bin Khalifa University - QA

Prof. Dr. Ramazan Asmatulu, Wichita State University - US

Prof. Dr. Senay Simsek, North Dakota State University - US

Prof. Dr. Tai Cheng Chen, Institute Of Nuclear Energy Research Iner - TW

Prof. Dr. Vincent Ji, University Of Paris Sud - FR

Prof. Dr. Yousef Haik, Hamad Bin Khalifa University Hbku - QA

Prof. Dr. Yusuf Ozturk, San Diego State University - US

Prof. Dr. Zakaria Boumerzoug, University Of Biskra - DZ

Assoc. Prof. Dr. Ahmad Azmin Mohamad, University Of Sains Malaysia - MY

Assoc. Prof. Dr. Katarina Batalovic, Vinca Institute University Of Belgrade - RS

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin Aydin, UWE Bristol - GB

Assoc. Prof. Dr. Mikhail E Semenov, Tomsk Polytechnic University - RU

Assist. Prof. Dr. Faten Adel Ismael Chaqmaqchee, Koya University - IQ

Assist. Prof. Dr. Nurettin Sezer, Hamad Bin Khalifa University Hbku - QA

Assist. Prof. Dr. Sami G Al Ghamdi, Hamad Bin Khalifa University Hbku - QA

Assist. Prof. Dr. Shoukat Alim Khan, Hamad Bin Khalifa University Hbku - QA

Assist. Prof. Dr. Yusuf Bicer, Hamad Bin Khalifa University Hbku - QA

Dr. Abdessalem Bouferrouk, University Of The West Of England - GB

Dr. Fahmi Fariq Muhammad, Koya University - IQ

Dr. Mazhar Malik, University Of The West Of England - GB

Dr. Mirza Nadeem Baig, Pakistan Welding Institute - PK

Dr. Mohammad Ghaffar Faraj, Koya University - IQ

Dr. Peter Kay, University Of The West Of England - GB

Dr. Sabir Ghauri, University Of The West Of England - GB

Dr. Shahroz Sakhawat, Pakistan Welding Institute - PK

INVITED SPEAKERS

Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER completed his veterinary studies at Uludağ University and later earned his Ph.D. in Human Anatomy from the University of Leicester, UK. Over the course of his academic career, he held key positions including Head of the Department of Medical Education and Informatics at Selçuk University, founding rector of Konya University, and subsequently rector of Necmettin Erbakan University.

He has also served internationally, holding academic appointments in the United Arab Emirates. Prof. Şeker has played an influential role in national science and higher education policy through his memberships in the Turkish Academy of Sciences (TÜBA), the Scientific Board of TÜBİTAK, and various councils under YÖK and ÜAK. He contributed to the development of institutional and regional science strategies through his leadership roles in university associations, educational foundations, and health education commissions.

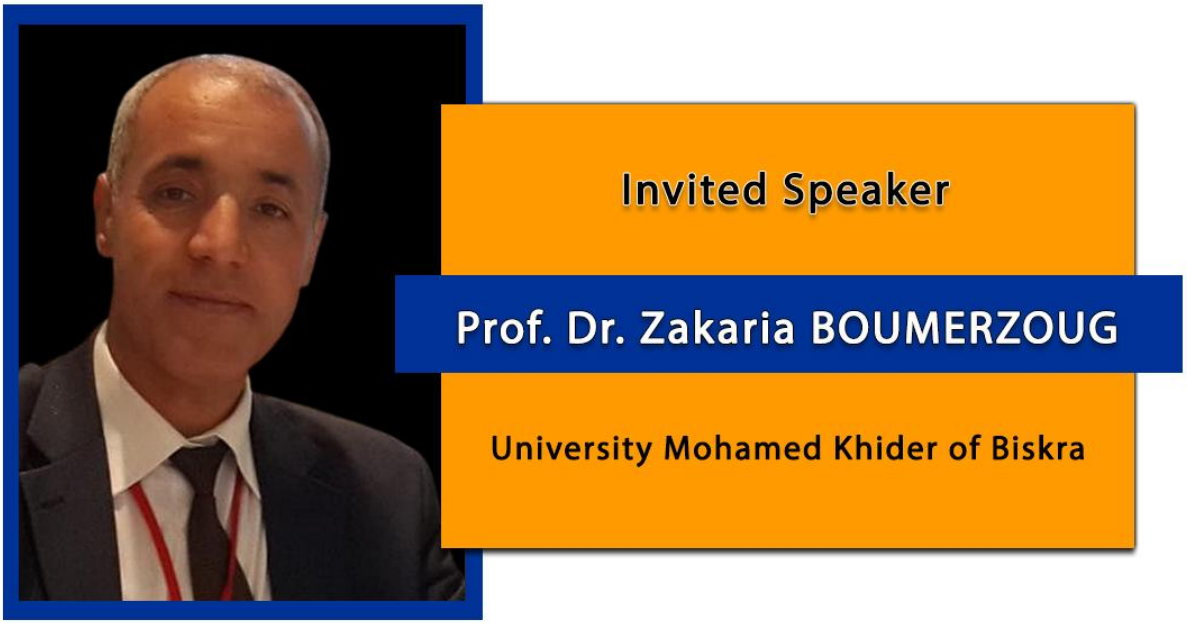
His involvement in national award committees—such as TÜSEB Aziz Sancar, TÜBA-GEBİP, and TÜBİTAK Science Awards—further reflects his commitment to scientific excellence. Representing Türkiye at high-level global science platforms such as the G20 S20 Summit and the World Science Forum, he has also maintained long-term engagement with professional societies in anatomy and basic medical sciences.

INVITED SPEAKERS

Prof. Dr. Muammer KOC, Prior to his appointment as a founding professor of sustainability at HBKU in 2014, Professor Koç held professor, director, chair and dean positions at different universities in Turkey and the USA between 2000-2014. He has a PhD degree in Industrial and Systems Engineering from the Ohio State University (1999) and an Executive MBA degree from the University of Sheffield, UK (2014). He has published 130+ publications in various international journals and conferences; edited three books; organized, chaired, and co-chaired various international conferences, workshops and seminars on design, manufacturing and product development.

In addition to his academic and educational activities, he provides consulting services to industry, government and educational institutes for strategic transformation, business optimization, organizational efficiency, lean operations, restructuring and reengineering initiatives. He has taught courses across a range of subjects, including product/process/business innovation and development; medical design and production; energy and efficiency; computer-aided engineering, design and manufacturing; modern manufacturing technologies; manufacturing system design; material forming plasticity; and the mechanical behavior of materials.

INVITED SPEAKERS



Zakaria BOUMERZOUG is a professor in the Department of Mechanical Engineering at the University of Biskra. He headed the Department of Mechanical Engineering from 1998 to 2004 and the Department of Metallurgy from 2004 to 2009 A professor at the University of Biskra from 1992 to the present, he has organized one international conference and 12 national conferences and workshops.

He is responsible for doctoral training in metallurgy. He has supervised more than 30 doctoral students. He has published more than 90 research articles, three books (Metallic Materials and Their Industrial Applications, Welding of Metallic Materials, Metal Wire Fabrication), two book chapters, and edited one book (Advanced Design and Mechanics of Materials) in the field of materials science. He holds a patent. He has led 10 national scientific projects and one international project with the University of Mons (Belgium).

He has been a member of the scientific committee of several international conferences. He has participated in more than fifty international conferences as a participant (with posters and oral presentations) and as an invited speaker.

INVITED SPEAKERS

Prof. Dr. Mete KALYONCU is a faculty member at the Department of Mechanical Engineering, Konya Technical University, with a research background in mechanical vibrations, system dynamics, mechanism design, control systems, robotics, and artificial intelligence-based optimization methods. He received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Selçuk University in 1998 and later conducted postdoctoral research at Cardiff University in the United Kingdom.

Throughout his career, he has authored numerous national and international publications, supervised dozens of graduate theses, and managed or contributed to over 50 publicly funded R&D projects. He also served on the board of TÜBİTAK TEYDEB MAKİTEG, evaluating more than 1,200 industrial R&D proposals, and provided consultancy for the establishment of several R&D centers.

Beyond academia, Prof. Kalyoncu played an active role in the Chamber of Mechanical Engineers (TMMOB), holding multiple leadership positions including Konya Branch Chair over several terms. He has contributed to the profession through the organization of technical events and the publication of reference materials as both editor and author. His career bridges academic research, industrial innovation, and professional service in mechanical engineering.

INVITED SPEAKERS

Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ received his Ph.D. in Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering from the University of Nottingham in 2006, where he participated in several Rolls-Royce and EPSRC-funded research projects within the Rolls-Royce University Technology Centre (UTC).

Following his return to Türkiye, he coordinated and supervised multiple nationally and privately funded R&D projects, including those supported by TÜBİTAK. Between 2007 and 2015, he served at Gaziantep University, and since 2017, he has been a faculty member at Gazi University, where he leads the Advanced Manufacturing Technologies Research Group (AMTRG). His research focuses on additive manufacturing, wire arc additive manufacturing (WAAM), advanced production techniques, and industrial repair technologies. He is currently Editor-in-Chief of The Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University (SCI-E) and Associate Editor of The Journal of Machine Design and Production.

Prof. Yılmaz is also actively involved in national initiatives for additive manufacturing, serving as a board member of the Welding and Joining Technologies Research and Application Center, a researcher at the Turkish Additive Manufacturing Excellence Center (EKTAM), and a founding member of the Turkish Additive Manufacturing Association (TAMA). He co-chaired the AMCTURKEY 2019 and 2021 conferences.

INVITED SPEAKERS

Prof. Dr. Rahmi ÜNAL graduated from the Mechanical Engineering Department of the Faculty of Engineering at METU Gaziantep in 1991. He completed his master's degree at Gazi University's Department of Mechanical Engineering in 1995 and his doctorate at Clausthal Technical University at Materials Science and Engineering Department in Germany in 1999. He currently serves as a professor in the Mechanical Engineering Department at Gazi University.

His research interests lie in Mechanical Engineering and Materials Science/Engineering. He focuses on Powder Metallurgy, Manufacturing Technologies, Material Behavior, and Alloy Design. He continues his research and development efforts, especially in metal powder production using gas atomization and plasma atomization methods, alloy design, and additive manufacturing.

PROGRAM OVERWIEV **Location:** Gaziantep University - Mavera Congress and Art Center		
06.10.2025 - MONDAY		
09:00 – 10:00	Registration	Conference Registration Desk
10:00 – 11:15	Opening Ceremony	Gaziantep University – Main Hall
11:15 – 12:00	Invited Talk	Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER Bilim Diplomasisi ve TÜBA: Akademik Sorumluluklarımız
12:00 – 13:30	Lunch -	Gaziantep University Main Dining Hole
13:30 – 14:45	Session I	Gaziantep University - Hall 1 - Hall 2 - Hall 3 & Hall 4
14:45 – 15:00	Coffee Break	
15:00 – 16:00	Invited Speakers Session (Gaziantep University)	Prof. Dr. Muammer KOÇ Design for Sustainability: Needs, Challenges & Opportunities under the Changing Global Dynamics
		Prof. Dr. Mete KALYONCU Mühendislik Uygulamalarında Optimizasyon
16:00 – 16:30	Coffee Break	
16:30 – 17:45	Session II	Gaziantep University - Hall 1 - Hall 2 - Hall 3 & Hall 4
18:00	Bus transfer from Hotel and Mavera Congress and Art Center for Dinner	
18:30 – 21:30	Dinner (Göl Restaurant)	
21:00	Bus transfer to Hotel	
07.10.2025 - TUESDAY		
09:00 – 10:15	Session III	Gaziantep University - Hall 1 - Hall 2 - Hall 3 & Hall 4
10:15 – 10:45	Coffee Break	
10:45 – 12:00	Session IV	Gaziantep University - Hall 1 - Hall 2 - Hall 3 & Hall 4
12:15	Bus transfer from Mavera Congress and Art Center to Hasan Kalyoncu University for Lunch	
12:45 – 14:00	Lunch – Hasan Kalyoncu University	
14:00 – 15:00	Invited Speakers Session (Hasan Kalyoncu University)	Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ Recent Advances in Metal Additive Manufacturing Technologies
		Prof. Dr. Zakaria BOUMERZOUG Metallurgical Aspect of Wiredrawing Process of Metallic Wires
15:30	Bus transfer from HKU to Gaziantep Panaroma Museum and Gaziantep City Tour	
18:30	Dinner (İkinci Bahar Konuk Evi)	
22:00	Bus transfer to Hotel	
08.10.2025 - WEDNESDAY		
09:00 – 10:15	Session V	Gaziantep University - Hall 1 - Hall 2 - Hall 3 & Hall 4
10:15 – 10:45	Coffee Break	
10:45 – 12:00	Session VI	Gaziantep University - Hall 1 - Hall 2 - Hall 3 – Hall 4 & Hall 5
12:15	Bus transfer from Mavera Congress and Art Center to GIBTU for Lunch	
12:45 – 14:00	Lunch - Gaziantep Islamic Science and Technology University	
14:00 – 15:00	Invited Speakers Session (Gaziantep Islamic Science and Technology University)	Prof. Dr. Rahmi ÜNAL Aluminum Alloy Development Studies for Additive Manufacturing: Challenges and Opportunities.
15:30	Bus transfer from GIBTU to Gaziantep Zeugma Museum *Museum entrance fee shall be paid by participant	
18:30	Dinner (Oğuzeli Belediyesi Deliklitepe Sosyal Tesisi ve Seyir Terası)	
21:30	Bus transfer to Hotel	

09.10.2025 - THURSDAY	
08:00-22:00	RUMKALE-HALFETİ Tour (Paid)*
08:00-22:00	GÖBEKLİTEPE-BALIKLIGÖL Tour (Paid)*
* The tour options are with a fee, and only one tour can be chosen. * The registration for the tours and fee payment should be processed in the first day of conference (October 06, 2025) preferably during the registration. *The fee includes only transportation and guided services. Expenses such as the meals, and personal expenses are not included in the fee.	

PERFORMANCE EVALUATION OF RE-ENTRANT AUXETIC CUCRZR LATTICES FOR ADDITIVE-MANUFACTURED STRAIN SENSORS

Aysu Hande YUCEL [*1], Gokalp TURKAL [1], Mohammad MALEKAN [2], Mustafa BAKKAL [1]

[1]Istanbul Technical University, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, TURKEY.
[2]University of Southern Denmark, Institute of Mechanical and Electrical Engineering Centre of Industrial Mechanics, Sønderborg, DENMARK.

Abstract

This study investigates the potential of CuCrZr-based auxetic structures manufactured by laser powder bed fusion (L-PBF) for use in resistive strain sensor applications. Auxetic materials, characterized by their negative Poisson's ratio, exhibit superior mechanical and energy absorption properties, making them suitable for sensing applications. The utilization of re-entrant structures, which is a sub-class of auxetic geometries, is a prevalent method in literature to enhance the sensitivity and repeatability of resistive strain sensors. The sensitivity of said sensors are characterized by their gage factor (GF) which represents the ratio of relative resistance change in material to the applied strain. In this scope, re-entrant auxetic lattices with varying geometries are explored to study the effect of geometrical parameters on the eventual GF of sensors. Two complementary research approaches were employed: numerical modeling of various auxetic geometries followed by experimental fabrication and characterization. In the computational phase, CAD models of re-entrant auxetic lattices were created with variations in wall thickness, cell height, width and inclination angle. Using COMSOL Multiphysics, relative electrical resistance change of each geometry was simulated under tensile loading to determine theoretical GF's. Results revealed that geometries with lower inclination angles, lower heights, higher widths and higher wall thicknesses exhibited the highest GF's in horizontal loading scenarios. In the experimental phase, micro-CT analysis revealed geometric deviations in as-built samples such as excess material deposition and internal powder entrapment particularly in thin-walled configurations. Tensile tests were conducted to assess mechanical properties of the material. Overall, findings underscore the potential of CuCrZr auxetic lattices in sensor applications and emphasize the need for further optimization in design and L-PBF process parameters to enhance sensor performance and manufacturability for high-precision applications. Future work will focus on enhancing fabrication quality and experimentally validating sensor performance under cyclic loading.

Keywords: auxetic structures, CuCrZr alloy, additive manufacturing, strain sensor, gage factor, LPBF.

1. Introduction

Auxetic structures are defined as structures which exhibit a negative Poisson's ratio (NPR). Due to this unique property, auxetic structures can also show enhanced mechanical properties as well as damping and absorption characteristics [1-3]. NPR is usually exhibited by cellular or foam structures with special geometries which allows for

designs with high strength-to-weight ratios. Due to these unique characteristics, auxetic structures have found applications in fields such as sensors, telecommunication, aviation, automotive, military, self-defense, health and textiles [1, 4-6].

In addition to the studies focusing on the mechanical properties of auxetic structures, their usage in sensor applications as both reinforcements and the sensing medium itself have been studied extensively. Auxetic structures have been successfully employed in resistive, piezoresistive, capacitive and triboelectric sensor applications [1, 7-11]. Due to auxetic structures' ability to expand in both lateral and longitudinal directions under load, applied strains can be localized inside the structure and small deformations can be amplified. Previous studies in literature have verified this effect via FEM analyses [12,13].

Resistive strain sensors are studied in the scope of this paper and their sensitivity is defined by their gage factor (GF) as seen in Equation 1, which represents the ratio of relative change in resistance to the applied strain.

$$GF = \frac{\left(\frac{R-R_0}{R_0}\right)}{\varepsilon} \qquad \text{(Equation 1)}$$

In reported work regarding the utilization of an auxetic sensing medium in resistive strain sensors, either additives are incorporated into the base material or coatings are applied to achieve electrical conductivity of the sensing medium [14,15]. However, metallic structures are inherently conductive which is appealing for resistive sensors. Yet, there are no previous reported works on auxetic strain sensors manufactured from metallics such as copper alloys. Here, additive manufacturing methodologies are enticing since auxetic geometries usually employ complex geometries which may not be feasible for traditional manufacturing methods. Since the resistance of metallic structures are heavily influenced by their geometry, there lies a need to optimize the design and fabrication of such structures for sensor applications. Geometric deviations, scalability, anisotropy, resolution and surface defects are among the factors that influence the performance of auxetic structures. Especially regarding the additive manufacture of copper, high thermal conductivity results in temperature gradients during the process which may possibly cause defects [16]. Additionally, copper and its alloys exhibit low laser absorbance and the tendency to reflect the incoming laser beams [17]. Therefore, optimization of the fabrication parameters become critical [3-5, 18-22].

In the scope of this paper, re-entrant auxetic lattices with varying geometries are explored via numerical simulations to study the effect of geometrical parameters on the theoretical GF's. Afterwards, some initial designs are fabricated and preliminary characterization studies are performed.

2. Materials and Methods

A lattice consisting of re-entrant cells, as seen in Figure 1 with the relevant cell parameters, was selected as the geometry of choice for our proposed sensor. There are several rationales behind this choice, with the first one being its relative simplicity compared to other auxetic lattice structures. Since the re-entrant unit cell is basically a honeycomb cell with its diagonal ribs facing inward, the overall geometry is fairly simple. As a side effect, some mechanical models regarding honeycombs can be applied to re-entrant structures as well [23]. Other than models intended for honeycombs, mechanical

behaviour of the re-entrant cell have been studied previously and other models are available in literature [24].

Another result of the simple geometry is that, design parameters of a unit cell are not numerous and easy to modify. Since unit cell modifications and machine learning applications are within scope of further study regarding our topic, it is desirable to have a geometry where the automation of the design process is feasible. Several studies regarding geometric modifications to re-entrant unit cells and their effects to mechanical properties are readily available as well [25,26]. Aside from the simple geometry, another reason a re-entrant lattice was chosen was its previous successful implementation to strain sensors as mentioned in the literature review.

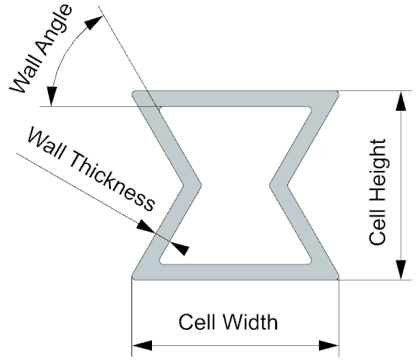


Figure 1. The re-entrant auxetic cell and with its geometrical parameters.

2.1. Numerical Modeling

In order to determine the effects of geometrical parameters regarding the use of re-entrant unit cells in resistive strain sensors, a design pool was constructed by using a full factorial design of experiments approach. Four different wall angles, cell heights, cell widths as well as three different wall thicknesses were used in the designs. The parameters used can be seen in Table 1. This approach directed to 192 possible unit cell configurations yet only 100 of these unit cells were feasible as the remaining 92 configurations resulted in clashing walls inside the unit cell.

Table 1. Design parameters of unit cells and gage factors of the CAD models.

Wall Thickness (mm)	Wall Angle (°)	Cell Height (mm)	Cell Width (mm)
0.1 - 0.2 – 0.3	30 – 45 – 60 – 75	1 – 2 – 3 – 5	1 – 2 – 3 – 5

Obtained unit cell geometries were then constructed in a 3x3 lattice formation and transferred to COMSOL Multiphysics software in which mechanical loading can be applied and electrical resistance measurements can be taken concurrently. The CAD data was then converted into a 2D shell as a plane stress condition was applicable. Afterwards, initial electrical resistance measurements were taken by applying an arbitrary current along the diagonal of the lattice. Then, displacements equivalent to %0.2 strains were applied in vertical and horizontal directions separately. During this step, resulting Poisson's ratios were also collected. Lastly, resistance measurements were taken once again using the deformed geometry state and the GF's of designs were calculated according to Equation 1. Additionally, resistance measurements were taken for the fabricated designs discussed in the following chapter by defining several different ground

and current application points in order to compare theoretical results with experimental data. A sample lattice design and the COMSOL workflow can be seen in Figure 2.

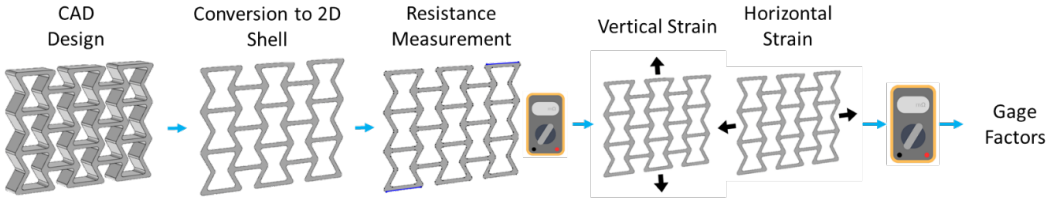


Figure 2. Workflow of the COMSOL analyses.

2.2. Experimental Studies

For preliminary experimental studies, an auxetic unit cell was designed with a height and width of 1 mm as well as 0.1 mm thick walls. Since the clearance between the ribs at the middle point of the unit cell became very small at smaller re-entrant angles and the unit cell became too slender at higher values, 60º was chosen as the wall angle. Using this unit cell, two lattice structures were constructed with dimensions of 8.2 mm x 10.6 mm and 17.2 mm x 21.5 mm. An additional third lattice was also constructed simply by scaling the smaller lattice by a factor of two in order to possibly study the effect of unit cell density in the lattice. Lastly, two dedicated rectangular solder pads with dimensions of 1 mm x 4 mm for the smaller lattice and 2 mm x 8 mm for the larger lattices were integrated into the structures for resistance measurement purposes.

2.2.1. Fabrication

The lattice structures were then fabricated using CuCrZr powder with the commercial name Osprey C18150. Additionally, four dog-bone tensile specimens were fabricated as well for material characterization purposes. Lattice designs are shown in Figure 3 and as fabricated specimens are shown in Figure 4 respectively. Specimens were fabricated using an Xact Metal XM200G LPBF machine with fabrication parameters given in Table 2.

Table 2. Fabrication parameters of specimens.

Laser Power (W)	Scan Speed (mm/s)	Layer Thickness (mm)	Scan Distance (mm)
350	700	0.03	0.09

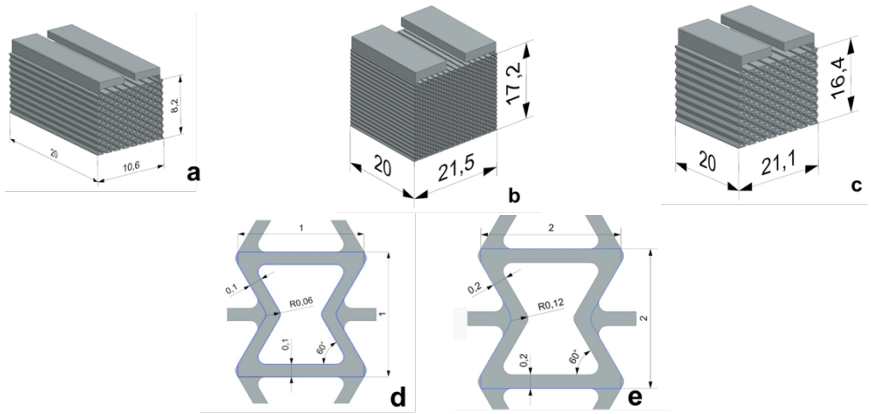


Figure 3. CAD of fabricated lattices. (a) Specimen 1, (b) Specimen 2, (c) Specimen 3, (d) unit cells of Specimen 1 and Specimen 2, (e) unit cell of Specimen 3.

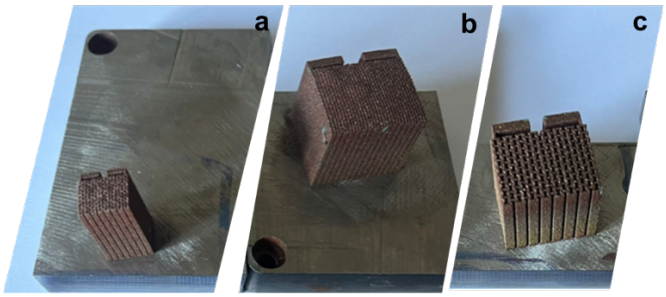


Figure 4. As-fabricated lattices (a) Specimen 1, (b) Specimen 2, (c) Specimen 3.

2.2.2. Tensile Testing

Tensile tests on the dogbone specimens were conducted using a Shimadzu 50 kN capacity tensile testing machine at room temperature. Tests were conducted at a 1 mm/min rate and elongation was measured concurrently with a laser extensometer.

2.2.3. Micro-CT Scan Analysis

In order to measure geometric deviations on the surfaces, Skyscan X-ray nano-tomography machine with 5 μm voxel size and 140 kV voltage was used.

2.2.4. Electrical Resistance Measurement

Lastly, in order to measure electrical resistance of specimens, as-built specimens were sliced into thinner samples with 0.25 mm thickness using wire EDM. Sliced samples can be seen in Figure 5. Electrical resistance measurements were taken using a generic multimeter.

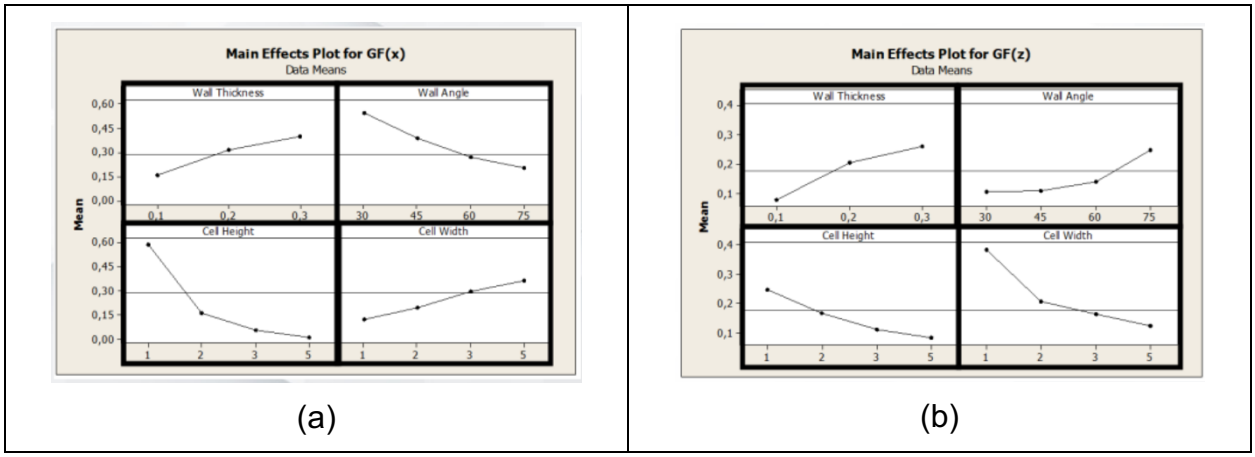
(a) (b) (c)

Figure 5. Sliced samples from (a) Specimen 1, (b) Specimen 2, (c) Specimen 3.

3. Results and Discussion

3.1. FEM Results

It was observed that increasing wall thicknesses resulted in better GF's in both vertical and horizontal loading conditions. On the contrary, increased cell heights decreased GF's in both directions. Increasing wall angles resulted in better GF's for vertical loading and worse GF's for horizontal loading. Lastly, increased cell widths resulted in worse GF's for vertical loading and better GF's for horizontal loading. Main effect plots can be seen in Figure 6 where GF(z) corresponds to vertical loading conditions and GF(x) corresponds to horizontal loading conditions.



(a) (b)

Figure 6. Main effects plot for (a) GF(x) and (b) GF(z) regarding re-entrant cell parameters

3.2. Tensile Testing Results

Stress-strain curves obtained from the dog-bone specimens during tensile testing can be seen in Figure 7. On average, the specimens showed an ultimate tensile strength of 225 MPa, yield strength of 155 MPa and an elongation at break of %20 as can be seen in Table 3.

Table 3. Average mechanical properties of the dog-bone specimens

σ_{UTS} (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	Elongation at Break (%)
225	155	20

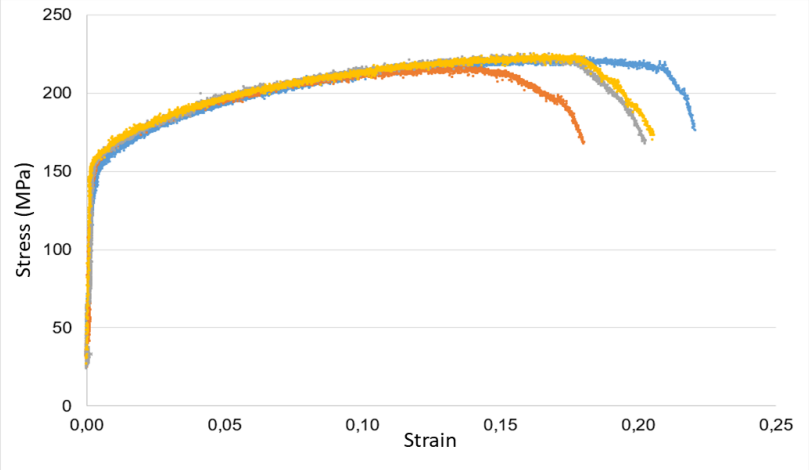
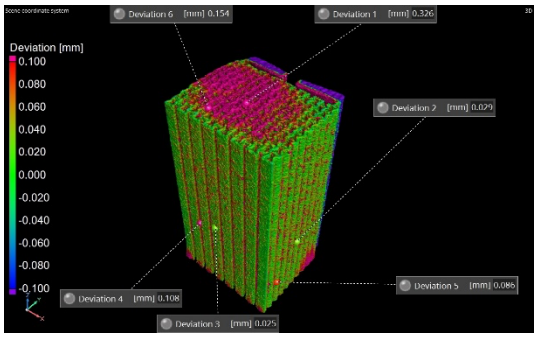


Figure 7. Stress strain curves obtained from the dog-bone samples.

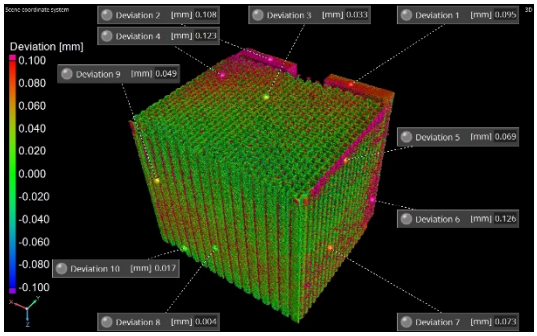
3.3. Micro-CT Scan Results

Micro-CT scan showing the geometrical deviations from the CAD models of Specimen 1, Specimen 2 and Specimen 3 can be seen in Figures 8. In Specimen 1 (Figure 8.a), negligible peripheral deviations of ±0.1 mm are observed. On the other hand, deviations around 0.3 mm are observed on the top surface of the specimen. This deviation may be attributed to local thermal contraction during cooling. In Specimen 2 (Fgure 8.b), once again shows negligible peripheral deviations and lower deviations on the top surface around 0.1 mm compared to Specimen 1 despite having the same unit cell size. Since

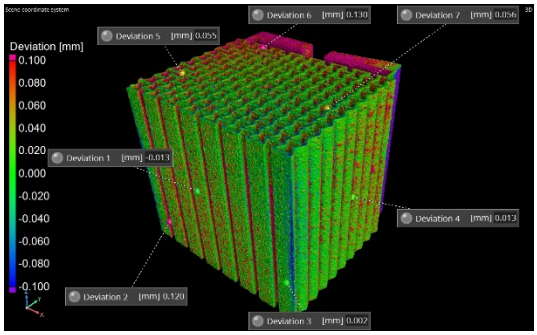
the overall specimen is larger, the local thermal contraction effect is not as much detrimental. Lastly, in Specimen 3 (Figure 8.c) shows much lower deviations both around the periphery and the top surface compared to other specimens. It can be said that the larger unit cells and larger overall specimens reduce the effect of local thermal contractions thus decreasing geometric deviations.



(a)



(b)



(c)

Figure 8. CT scan showing the geometric deviations of (a) Specimen 1, (b) Specimen 2, and (c) Specimen 3.

3.4. Electrical Resistance Measurement

Electrical resistance measurements were taken experimentally once from between the middle of the incorporated solder pads and once from between the upper-leftmost edge and the upper-rightmost edge for comparison purposes with FEM results. In order to simulate the measurement taken from the middle of solder pads in COMSOL, ground and current terminals were defined around the periphery of the pad as seen in Figure 9.

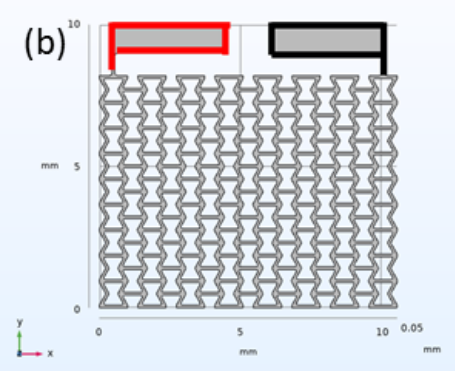


Figure 9. Electrical resistance measurement terminals as defined in COMSOL Multiphysics.

Comparisons of theoretical FEM results and experimental results can be seen in Table 4. It can be seen that for both cases the results are not in agreement. This may be attributed to the inherent defects inside the additively manufactured structure and some simplifications, such as the terminal definition, made inside the FEM model. Further work is needed regarding both the FEM boundary conditions and the fabrication parameters in order to obtain results in agreement.

Table 4. Experimental and theoretical electrical resistance measurements of specimens.

Specimen and Measurement Points	Experimental Resistance (mΩ)	Theoretical Resistance (mΩ)
Specimen 1 – Middle of Pads	10	3.75
Specimen 1 – Upper Edge	3	3.05
Specimen 2 – Middle of Pads	8	4.2
Specimen 2 – Upper Edge	2	3.9
Specimen 3 – Middle of Pads	14	3.7
Specimen 3 – Upper Edge	3	3.15

4. Conclusions

Overall, findings underscore the potential and possible difficulties regarding the use of additively manufactured CuCrZr auxetic lattices in sensor applications and emphasize the need for further optimization in design and LPBF process parameters to enhance sensor performance and manufacturability. Geometrical unit cell parameters' effect on theoretical GF's were determined successfully and some preliminary characterization studies were conducted on fabricated auxetic specimens.

References

1. Dong, S., & Hu, H. Sensors based on Auxetic Materials and Structures: A Review. Materials, **2023**, 16(9), 3603.

2. Parente, J. M., & Reis, P. N. B. Fatigue behaviour of 3D printed auxetic materials: An overview. Procedia Structural Integrity, **2024**, 53, 221–226.
3. Yousuf, M. H., Abuzaid, W., & Alkhader, M. 4D printed auxetic structures with tunable mechanical properties. Additive Manufacturing, **2020**, 35, 101364.
4. Hengsbach, S., & Lantada, A. D. Direct laser writing of auxetic structures: Present capabilities and challenges. Smart Materials and Structures, **2014**, 23(8), 085033.
5. Joseph, A., Mahesh, V., & Harursampath, D. On the application of additive manufacturing methods for Auxetic Structures: A Review. Advances in Manufacturing, **2021**, 9(3), 342–368.
6. Prawoto, Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. Computational Materials Science, **2012**, 58, 140–153.
7. Ren, X., Das, R., Tran, P., Ngo, T. D., & Xie, Y. M. Auxetic metamaterials and structures: A Review. Smart Materials and Structures, **2018**, 27(2), 023001.
8. Zhou, Y., Wu, Y., Asghar, W., Ding, J., Su, X., Li, S., Li, F., Yu, Z., Shang, J., Liu, Y., & Li, R.-W. Asymmetric structure based flexible strain sensor for simultaneous detection of various human joint motions. ACS Applied Electronic Materials, **2019**, 1(9), 1866–1872.
9. Jiang, Y., Liu, Z., Matsuhisa, N., Qi, D., Leow, W. R., Yang, H., Yu, J., Chen, G., Liu, Y., Wan, C., Liu, Z., & Chen, X. Auxetic mechanical metamaterials to enhance sensitivity of stretchable strain sensors. Advanced Materials, **2018**, 30(12).
10. Taherkhani, B., Azizkhani, M. B., Kadkhodapour, J., Anaraki, A. P., & Rastgordani, S. Highly sensitive, piezoresistive, silicone/carbon fiber-based auxetic sensor for low strain values. Sensors and Actuators A: Physical, **2020**, 305, 111939.
11. Lee, Y.-J., Lim, S.-M., Yi, S.-M., Lee, J.-H., Kang, S., Choi, G.-M., Han, H. N., Sun, J.-Y., Choi, I.-S., & Joo, Y.-C. Auxetic elastomers: Mechanically programmable meta-elastomers with an unusual Poisson's ratio overcome the gauge limit of a capacitive type strain sensor. Extreme Mechanics Letters, **2019**, 31, 100516.
12. Choi, H., Pyo, S., Choi, J., & Park, K. Shape morphing of Re-entrant honeycomb metamaterials for Linear Auxetic behaviors. Advanced Engineering Materials, **2024**, 27(1).
13. Yu, H., Lian, Y., Sun, T., Yang, X., Wang, Y., Xie, G., Du, X., Gou, J., Li, W., & Tai, H. Two-sided topological architecture on a monolithic flexible substrate for ultrasensitive strain sensors. ACS Applied Materials & Interfaces, **2019**, 11(46), 43543–43552.
14. Lai, C.-W., & Yu, S.-S. 3D printable strain sensors from deep eutectic solvents and cellulose nanocrystals. ACS Applied Materials & Interfaces, **2020**, 12(30), 34235–34244.
15. Wong, J., Gong, A. T., Defnet, P. A., Meabe, L., Beauchamp, B., Sweet, R. M., Sardon, H., Cobb, C. L., & Nelson, A. 3D printing ionogel Auxetic frameworks for stretchable sensors. Advanced Materials Technologies, **2019**, 4(9).
16. Malik, M., & Saxena, P. Mechanical properties of 3D printed materials at high strain rates. Composite Materials, **2023**, 20–36.

17. Lassègue, P., Salvan, C., De Vito, E., Soulas, R., Herbin, M., Hemberg, A., Godfroid, T., Baffie, T., & Roux, G. Laser powder bed fusion (L-PBF) of Cu and cucrzr parts: Influence of an absorptive physical vapor deposition (PVD) coating on the printing process. Additive Manufacturing, **2021**, 39, 101888.
18. Bhardwaj, S., & Mishra, D. K. Effect of different strut thickness on the mechanical behaviour of 3D printed auxetic structures. Materials Today: Proceedings, **2024**
19. Hussan K S, J., Subramaniam, M. P., Kenz K T, M., Sreeram, P., Parvathi, S., PS, S., Pullanchiyodan, A., Mulhivill, D. M., & Raghavan, P. Fabrication and challenges of 3D printed sensors for Biomedical Applications-Comprehensive Review. Results in Engineering, **2024**, 21, 101867.
20. Lvov, V. A., Senatov, F. S., Veveris, A. A., Skrybykina, V. A., & Díaz Lantada, A. Auxetic metamaterials for biomedical devices: Current situation, Main Challenges, and research trends. Materials, **2022**, 15(4), 1439.
21. Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., & Dutta, N. K. Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, promise and challenges. Polymers, **2021**, 13(5), 753.
22. Vyavahare, S., & Kumar, S. Re-entrant auxetic structures fabricated by fused deposition modeling: An experimental study of influence of process parameters under compressive loading. Polymer Engineering & Science, **2020**, 60(12), 3183–3196.
23. Masters, I. G., & Evans, K. E. Models for the elastic deformation of honeycombs. Composite Structures, 35(4), **1996**, 403–422.
24. Wang, X.-T., Wang, B., Li, X.-W., & Ma, L. Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures. International Journal of Mechanical Sciences, **2017**, 131–132, 396–407.
25. Choudhry, N. K., Panda, B., & Kumar, S. In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing. Composites Part B: Engineering, **2022**, 228, 109437.
26. Chen, Z., Wu, X., Xie, Y. M., Wang, Z., & Zhou, S. Re-entrant auxetic lattices with enhanced stiffness: A numerical study. International Journal of Mechanical Sciences, **2020**, 178, 105619.

BİR BİYOGÜÇ SANTRALİNİN GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ MUHASEBESİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

AYŞEGÜL ABUŞOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437 İstanbul, TÜRKİYE

Özet

Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi'nde (GEM) iş gücünün ekserji biriminden değeri; sistemin sürdürülmesi için gereken iş gücünün ortaya çıkması ve desteklenmesi için gerekli birincil ekserji tüketiminin karşılığıdır. Sermaye akışının termodinamik çerçeveye entegre edilmesinde kullanılan neo-klasik yaklaşım farklı endüstriyel, tarımsal ve ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerini ortaya koymakta yetersiz kalmaktadır. Üretim faaliyetlerinin çevresel etkilerini incelemek için uygun bir temele sahip olan ekserji, atıkları çevre koşullarıyla denge haline getirmek için ödenmesi gereken maliyeti de hesaplamamıza olanak tanır. Atıkların bertaraf edilmesi süreçlerinde ve atıktan-enerji kapsamında yapılan çalışmalarda GEM yöntemi ile değerlendirilmeleri çevresel etki yönetiminde hizmet bedellerinin belirlenebilmesine alan açmaktadır. Bu çalışmada, yıllık 32 GWh elektrik ve 33.5 GWh ısı üreten, yaklaşık 700 çalışana sahip bir gerçek gaz türbinli biyogüç enerji santralinin genişletilmiş ekserji muhasebesi ile değerlendirmesi yapılmıştır. Öncelikle, ham madde girişinden elektrik ve ısı üretimine kadar sistemin bütün alt süreçleri klasik ekserji analiziyle çözümlenmiş; daha sonra sistem sınırları ham maddenin santrale taşınması sırasında oluşan emisyonları, taşıma için gereken iş gücü ve sermayeyi ve sistem ömrünü tamamladıktan sonra atık yönetimini içine alacak şekilde genişletilerek GEM yöntemiyle çözümlenerek değerlendirilmiştir. Biyogüç santralinin ekserji verimi %52 olarak hesaplanmış, biyogaz üretimini sağlayan biyometanizasyon ünitesinin ekserji verimi ise %39 bulunmuştur. Genişletilmiş ekserji muhasebesi yöntemi uygulanarak biyogüç santralinin genişletilen kontrol hacminin emek, sermaye ve çevresel etki faktörlerinin ekserji biriminden değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlara göre; biyogüç santralinin emek faktörünün mesai saati başına ekserji karşılığı 27.64 MJ/h, birim sermayenin ekserji eşdeğeri 18.30 MJ/USD olarak hesaplanmıştır. Çevresel etki değerlendirmesi yapılırken sistemin genişletilmiş kontrol hacmindeki faaliyetlerin ortaya çıkardığı emisyonların, CO_2, N_2O ve CH_4, bertarafı için üç ayrı sistem incelenmiş ve bu sistemlerin iş gücü ve sermaye girdileri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Genişletilmiş Ekserji Muhasebesi, Biyogüç, Biyometanizasyon, Emek, Sermaye, Çevresel Etki.

Thermal Performance Assessment of SLM-Fabricated Al6063 Metal Foam/PCM Composites: Effects of Initial Temperature and Heat Load Variations

Kaan Görkem ELRİ [*1], Mustafa Yusuf YAZICI [2], Bülent ÖZTÜRK[1]

[1] Affiliation: Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, Trabzon, TÜRKİYE.
[2] Affiliation: Samsun University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Samsun, TÜRKİYE

Abstract

The rapid increase in power densities of modern electronic devices necessitates efficient thermal management. Phase change materials (PCMs) are promising due to their latent heat storage capacity, yet their low thermal conductivity limits performance. To address this, an Al6063 open-cell metal foam with 6 mm pore size was fabricated by selective laser melting (SLM) and combined with RT-42 PCM to form a composite cooling system. The system was experimentally tested under constant heat loads of 25 W and 35 W and initial temperatures of 20, 25, and 30 °C, and compared against a pure PCM configuration. Temperature was monitored using thermocouples embedded in the foam volume and at the base surface, with the critical limit set to 80 °C (tg). At 25 W, the composite extended safe operation time, with tg increasing from 1395 s at 30 °C to 1758 s at 20 °C (~26% improvement). At 35 W, tg values were shorter overall (868–1022 s), reflecting ~40% reduction compared to 25 W, but lowering the initial temperature still provided ~18% improvement. Comparisons with pure PCM confirmed the critical role of the metallic foam: at 35 W pure PCM reached the critical temperature within 85 s, while the composite lasted 963 s, nearly 10 times longer. Internal measurements revealed vertical stratification, with the bottom heating fastest, the middle showing the strongest latent heat buffering, and the top reflecting delayed convective contributions. Overall, results demonstrate that metal foam integration enhances PCM utilization, prolongs safe operation by up to an order of magnitude compared to pure PCM, and that lower operating temperatures further improve reliability, highlighting the potential of foam–PCM composites for passive electronic cooling.

Keyword: Thermal energy storage, passive cooling, phase change material, metal foam, heat transfer enhancement, electronic thermal management,

1. Introduction

The increasing power density in modern microelectronic components has emerged as a significant concern due to the high thermal loads generated during operation. As microelectronics continue to evolve toward miniaturization and higher integration, devices generate more heat, which, when inadequately managed, can result in reduced performance and shorter operational lifetime [1–3]. Advanced components such as GPUs and CPUs, due to their high power consumption, frequently create localized hotspots, making efficient thermal management strategies essential to maintain optimal operating temperatures [4–6]. Neglecting thermal management can lead to decreased device efficiency, accelerated thermal fatigue, and ultimately device failure [7–9]. Therefore, developing advanced thermal interface materials and cooling solutions with superior properties remains critical for addressing the thermal loads encountered in highly integrated microelectronic systems [2, 10, 11].

Phase change materials (PCMs), owing to their high latent heat storage capacity, are widely employed in thermal management applications. Among them, organic PCMs offer several advantages that enhance their applicability in various fields. Their non-corrosive nature and chemical stability provide longer operational lifespans in thermal energy storage systems compared to inorganic counterparts [12, 13]. Common organic PCMs such as paraffin and fatty acids exhibit favorable melting points and congruent melting behavior, effectively avoiding many of the supercooling challenges faced by inorganic materials [14, 15]. Additionally, their relatively high energy density, cost-effectiveness, and low toxicity make them suitable for integration into applications ranging from building energy systems and electronics to renewable energy technologies [16, 17].

Moreover, their potential for recyclability aligns with sustainability goals aimed at reducing waste and improving material efficiency [18, 19]. however, their inherently low thermal conductivity (~0.2 W/mK) limits the rate of heat transfer under high power density conditions [20]. To overcome this limitation, various enhancement strategies have been investigated. These include the incorporation of high-thermal-conductivity structures or additives such as metallic foams, internal fins, metal particles, and nanoparticles into the PCM matrix, which improve heat transfer efficiency and overall thermal performance [21].

The use of metal foam matrices to enhance the thermal properties of phase change materials (PCMs) offers significant advantages compared to conventional approaches such as internal fins, metal particles, and nanoparticles. One of the main benefits of metal foams is their high porosity and thermal conductivity, which substantially improve the overall thermal performance of the system. Studies have shown that embedding PCMs within a metal foam matrix enables more efficient heat transfer during melting and solidification processes due to the foam's large surface area [22, 23]. In comparison, internal fins increase the surface area but do not provide the same level of improvement in thermal conductivity [24].

Metal foams also provide greater structural integrity and stability during thermal cycling, reducing the risk of leakage and supercooling. Such problems can be more severe in systems using nanoparticles, as sedimentation over time may reduce the volumetric efficiency of the material [25, 26]. The addition of metal foam can improve heat transfer by up to 28.3% compared to conventional PCM systems, leading to significantly shorter charging and discharging times [27]. Furthermore, PCM–metal foam combinations produce superior thermal responses compared to

hybrids incorporating only nanoparticles or solid matrix inserts [28, 29]. Overall, metal foams not only improve thermal conductivity effectively but also enhance the operational performance of thermal energy storage systems, making them a strong candidate for advanced thermal management applications [30]. Due to all these benefits, embedding open-cell metal foam in PCM systems is an effective approach to designing passive heat sinks for the thermal management of electronic devices [31]. Metal foams are lightweight materials characterized by a porous structure consisting of interconnected voids within a metallic matrix, which significantly enhances their mechanical strength-to-weight ratio and versatile applications across various fields, including energy absorption and thermal management [32, 33].

Recent research consistently emphasizes the critical role of metal foam structural characteristics—particularly pore size, distribution, and porosity—in governing the thermal behavior of PCM–metal foam systems. Skibiński et al. [34] demonstrated that a homogeneous pore size distribution enhances effective thermal conductivity compared to heterogeneous distributions, while Lafdi [35] identified a porosity threshold (~88.4%) below which low permeability suppresses convection, making conduction dominant, and above which increased permeability may allow convection to play a greater role. Complementary observations by Hu [36] and Jethelah [37] indicate that larger pore sizes, due to higher permeability and reduced solid fraction, can strengthen natural convection effects during melting, whereas smaller pores tend to favor conduction-dominated heat transfer. In parallel, Gopinathan et al. [38] highlighted that both pore size and its spatial arrangement directly influence the uniformity of heat flow, with optimized morphologies enabling more consistent thermal pathways across the foam matrix. Together, these findings establish that careful tailoring of pore-scale features offers a direct means to balance conduction and convection mechanisms and improve overall thermal performance. The literature review on the effect of metal foam pore structures in metal foam–PCM systems reveals the following key findings:

- **Pore size distribution uniformity:** Homogeneous pore size distributions in open-cell metal foams enhance effective thermal conductivity compared to heterogeneous distributions [34].
- **Porosity threshold effect:** At porosity levels around 88.4%, low permeability suppresses convective flow within molten PCM, resulting in conduction-dominated heat transfer; higher porosities may increase permeability and allow convection to play a more significant role [35].
- **Impact of pore size on heat transfer mode:** Larger pore sizes, due to higher permeability and lower solid fraction, tend to strengthen natural convection effects during melting, while smaller pores favor conduction-dominated mechanisms [36, 37].
- **Uniformity of heat flow:** Both pore size and spatial arrangement directly affect the consistency of heat transfer; optimized morphologies promote more uniform thermal pathways across the foam matrix [38].

After the review of the indicated results, it becomes evident that the thermal performance of PCM–metal foam composites is not only influenced by material and structural properties but also by external boundary conditions. In the present study, Al6063 open-cell metal foam matrices with a uniform pore size of 6 mm were integrated with RT-42 PCM, and their thermal responses were systematically investigated. The experimental program was designed to evaluate system behavior under two constant heat loads (25 W and 35 W) and three different initial temperatures (20, 25, and 30 °C). The findings reveal that, even under a single pore morphology, the melting behavior of the PCM and the overall thermal response are strongly governed by the applied heat load and

the initial temperature, which determine both the extent of latent heat utilization and the duration of safe operation.

2. Materials and Methods

2.1. Fabrication of Metal Foam Sample

Open-cell Al6063 metal foam matrix were fabricated using the Selective Laser Melting (SLM) technique (Sisma, Italy; Model: mysint 100). This additive manufacturing approach enabled precise control over pore size and distribution, ensuring a fully homogeneous pore morphology with a linear arrangement across the entire volume. A single set of samples was produced with a constant porosity of 90%, incorporating a uniform pore size of 6 mm. The CAD models for the foam structures were generated in *SolidWorks 2024*, and a photograph of the fabricated Al6063 metal foam matrix is provided in Figure 1.

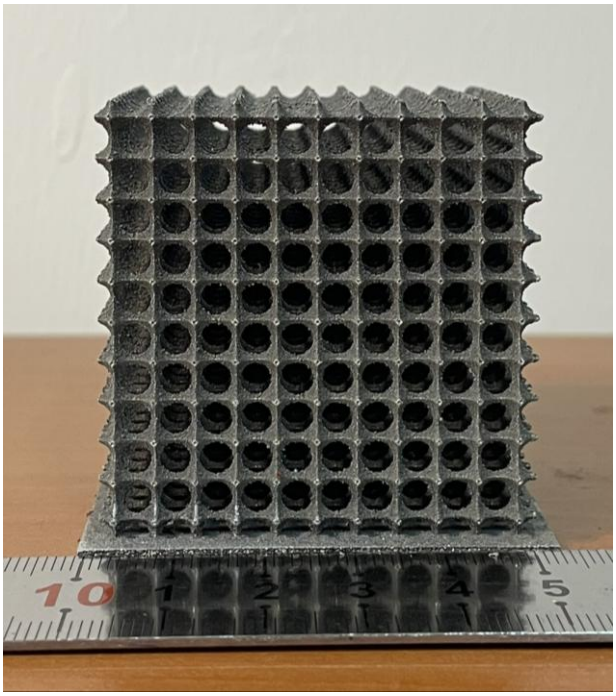


Figure 1. Al6063 open-cell metal foam matrix

2.2 PCM Selection and Integration

Rubitherm RT-42, an organic paraffin-based phase change material (PCM) with a nominal melting temperature of approximately 42 °C, was selected for this study due to its high latent heat storage capacity, chemical stability, and non-corrosive nature. The PCM was introduced into the open-cell metal foam matrix in its liquid phase at a temperature above its melting point. A fixed mass of 90 g of PCM was added to the specimen to ensure consistent material content. The impregnation process was carried out under atmospheric conditions without vacuum assistance or specialized infiltration techniques, allowing the molten PCM to fill the foam pores through capillary action and gravity. The thermo-physical properties of the selected PCM are presented in **Table 1**.

Table 1. *Thermo-physical properties of Rubitherm RT-42*

Melting Temperature (°C)	***Heat Storage Capacity (kJ/kg)***	***Specific Heat Capacity (kJ/kg·K)***	***Thermal Conductivity (W/m·K)***	***Density (kg/m³)***	
				Solid 15°C	***Liquid 80°C***
38-43	*165*	*2*	*0.2*	*0.88*	*0.76*

2.3 Experimental Setup

Thermal performance tests were conducted using a custom-built polycarbonate enclosure designed to securely contain a single Al6063 open-cell metal foam specimen and prevent PCM leakage. After placing the foam inside the enclosure, 90 g of Rubitherm RT-42 PCM in its liquid phase was poured to fully infiltrate the open-cell network. A representative image of the sealed foam/PCM assembly is provided in Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..

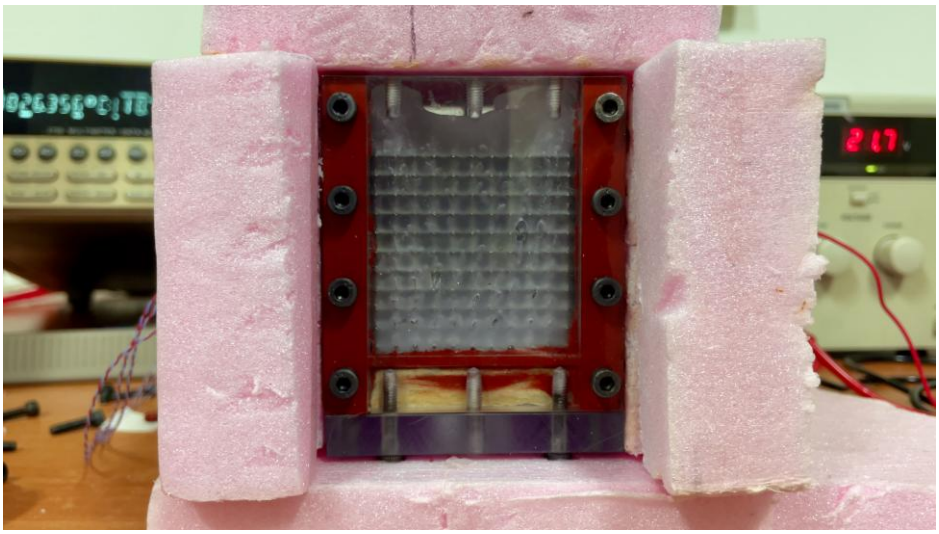


Figure 2. Experimental setup showing the Al6063 open-cell foam fully infiltrated with RT-42 PCM and sealed inside the polycarbonate enclosure with external insulation panels.

Three Type-T thermocouples were embedded within the foam volume, coded as T3 (top), T2 (middle), and T1 (bottom), enabling three-dimensional temperature monitoring during melting. All three thermocouples were aligned along the same vertical axis, while their relative positions in the vertical cross-section are shown in Figure 2. In addition, five Type-T thermocouples were mounted on the heater-contacted base surface to capture the lateral temperature distribution cross the heating plane. The average of these five measurements was used to represent the base temperature of the system.

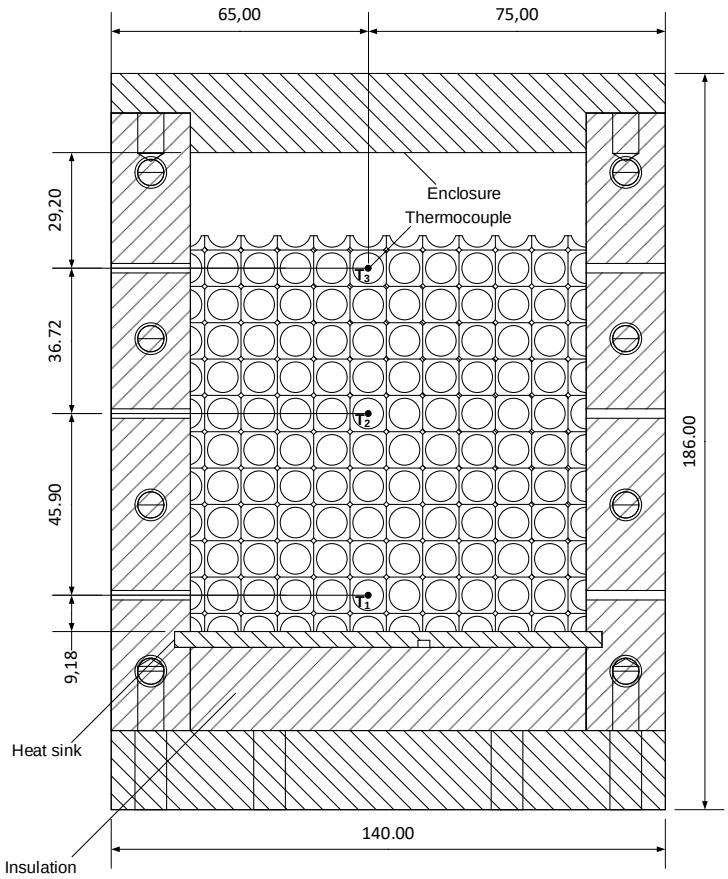


Figure 3. Thermocouple positions and labels on the front side of the experimental system.

A Kapton film heater (OMEGA Engineering, USA) was employed as the heat source, with a 0.25 mm thick copper plate placed between the heater and the foam base to ensure uniform heat flux. The heater was powered by a Uni Source PS-6030 DC power supply, delivering controlled 25W and 35W heat load. Temperature data were acquired using a Keithley 2700 data acquisition system, ensuring high accuracy and stability in long-duration measurements.

2.4. Testing Procedure

All experiments were conducted in a climate-controlled environment. Prior to each test, the system was stabilized at the selected initial temperature (20, 25, or 30 °C). The entire test assembly was insulated on all sides with 40 mm thick insulation panels to minimize heat losses, and the overall setup is shown in Figure 2. The heating process was continued until the critical temperature (tg) of 80 °C was reached, which served as the reference point for determining the tg duration. Upon reaching this threshold, the test was terminated. After completion, the system was allowed to cool naturally under ambient conditions. Each experiment was repeated three times to ensure reproducibility.

3. Results and Discussion

The experimental findings provide a comprehensive evaluation of the thermal behavior of the Al6063 open-cell foam/RT-42 PCM composite system under varying heat loads and initial temperatures. In this section, the temperature–time responses obtained from both base and internal thermocouples are analyzed and compared with the pure PCM configuration, with emphasis on the effects of heat flux, initial temperature, and spatial temperature distribution on the overall system performance.

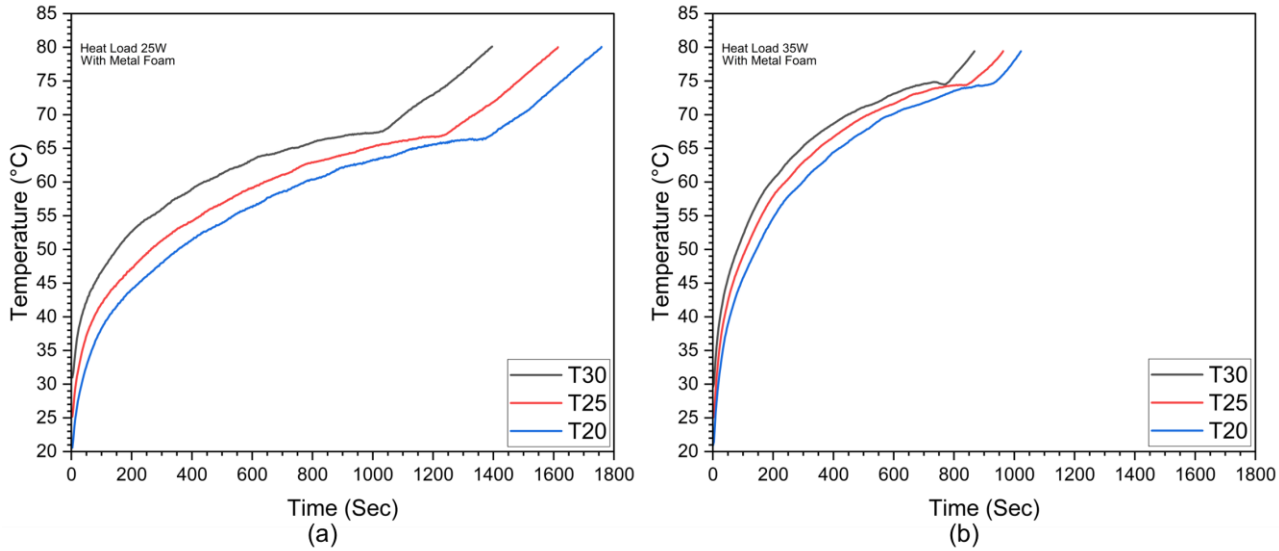


Figure 4. Temperature–time curves of the foam–PCM system under 25 W and 35 W heat loads at different initial temperatures (T30 = 30 °C, T25 = 25 °C, and T20 = 20 °C).

Figure 4 shows the temperature–time responses of the Al6063 open-cell metal foam/RT-42 PCM composite system with a uniform pore size of 6 mm under constant heat loads of 25 W and 35 W, respectively, at three different initial temperatures (20, 25, and 30 °C). The results clearly indicate that both the applied heat load and the initial temperature play decisive roles in the thermal behavior of the system.

Under 25 W, the time required to reach the critical temperature of 80 °C (tg) was 1395 s for the 30 °C case, 1613 s for the 25 °C case, and 1758 s for the 20 °C case. Thus, lowering the initial temperature from 30 to 20 °C extended tg by nearly 26%, highlighting the significant improvement in reliable operation time achieved by pre-cooling. In the early stage of heating (0–200 s), conductive heat transfer dominated, leading to rapid temperature rises, particularly in the samples with higher initial temperatures. Around the melting range of RT-42 (38–43 °C), all curves exhibited a reduction in slope due to latent heat absorption. This plateau was more prolonged in the 20 °C case, suggesting more effective utilization of the PCM's thermal buffering capacity. After the completion of melting, the temperature rise accelerated again, with higher initial temperature cases entering this regime earlier, thereby reaching the critical threshold in a shorter time.

When the heat load was increased to 35 W, safe operation times decreased markedly. The tg values were 868 s for the 30 °C case, 963 s for the 25 °C case, and 1022 s for the 20 °C case. Although lowering the initial temperature from 30 to 20 °C still extended tg by about 200 s (18%), the overall operation times were shortened by nearly 40% compared to the 25 W case. Furthermore, the

plateau region associated with latent heat absorption was less pronounced, indicating that the PCM's thermal buffering capacity was consumed more quickly under higher heat flux. Consequently, the temperature rise in the post-melting regime was steeper, leading to earlier attainment of the critical temperature, especially for higher initial temperature cases.

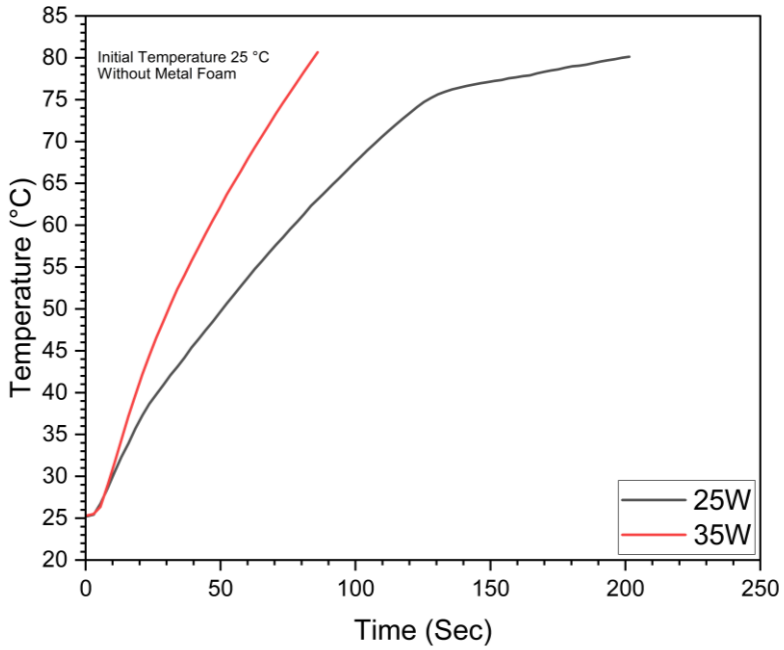


Figure 5. Temperature–time curves of pure RT-42 PCM under 25 W and 35 W heat loads at the same initial temperature.

Figure 5 presents the temperature–time responses of the system containing only RT-42 PCM under different applied heat loads (25 W and 35 W) at an identical initial temperature. In contrast to the foam–PCM composites, where the Al6063 metal foam provided conductive pathways that delayed the base temperature rise, the absence of the metallic matrix caused localized heating at the base, resulting in a rapid temperature increase and earlier attainment of the critical threshold (80 °C).
For both heat load scenarios, the curves showed a steep rise during the initial stage (0–150 s), governed by conduction-limited heat transfer within the PCM. Under the 25 W load, the curve exhibited a slight reduction in slope around 60–75 °C, which can be attributed to a weak manifestation of latent heat absorption. However, because of the poor thermal conductivity of pure PCM, heat could not be effectively distributed into the bulk, and the latent heat capacity was not fully exploited. As a result, the plateau observed in composite systems was largely absent. At 35 W, this effect became even less visible; the curve showed a nearly linear rise until the critical temperature was reached, confirming that the latent heat effect was suppressed under higher heat fluxes due to insufficient thermal conduction.

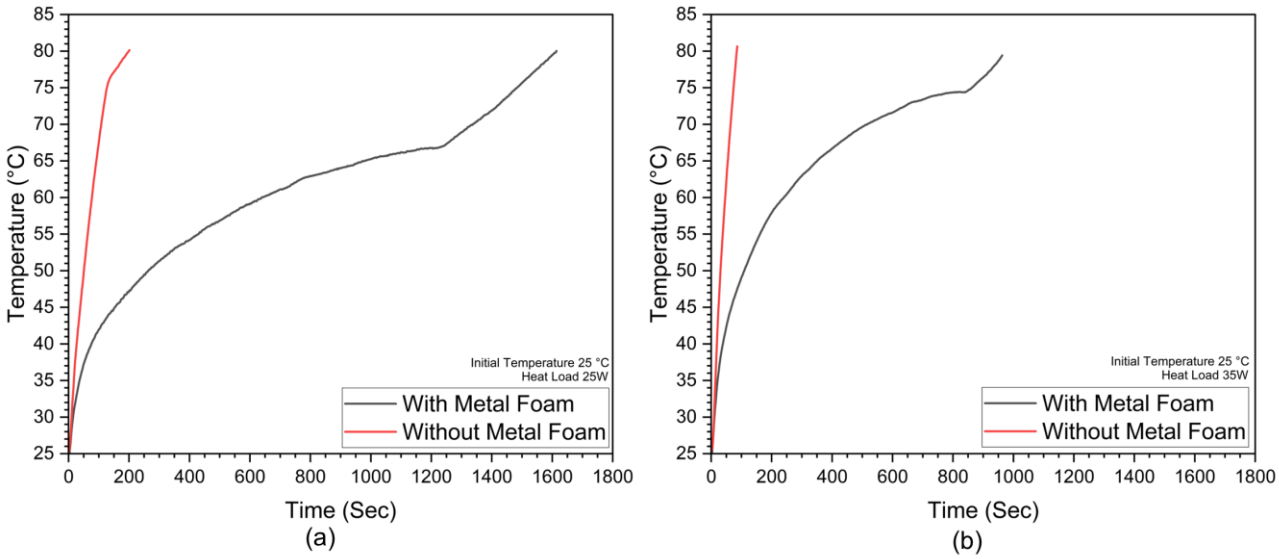


Figure 6. Temperature–time curves of pure PCM (PP) and metal foam–PCM composite (MF) under 25 W (a) and 35 W (b) heat loads at the same initial temperature (25 °C).

Figure 6 compare the base temperature responses of the Al6063 metal foam–RT-42 PCM composite (MF) with the pure RT-42 PCM system (PP) under identical initial conditions (25 °C) and heat loads of 25 W and 35 W. The results clearly demonstrate the decisive role of the metallic foam matrix in enhancing thermal performance by delaying the attainment of the critical temperature (80 °C).

At 25 W (a), the pure PCM reached the critical temperature within only ~200 s. The temperature profile showed a rapid increase, and only towards the end a very slight latent heat plateau could be observed, indicating that the poor thermal conductivity of paraffin-based PCMs limited the extent to which the latent heat capacity could be effectively utilized across the bulk. In contrast, the composite system with metal foam matrix exhibited a significantly extended safe operation time, exceeding 1600 s. A distinct change in slope around the melting range of RT-42 confirmed that the latent heat was actively engaged when the metallic foam matrix facilitated heat distribution. At 35 W (b), the differences became even more pronounced. The pure PCM reached 80 °C within 85 s, showing an almost linear rise to the critical threshold due to localized overheating at the base. On the other hand, the composite system maintained a safe operation time of ~963 s, approximately 10 times longer than the pure PCM. However, compared to 25 W, the plateau was shorter, indicating that the latent heat storage was depleted more quickly under higher heat flux.

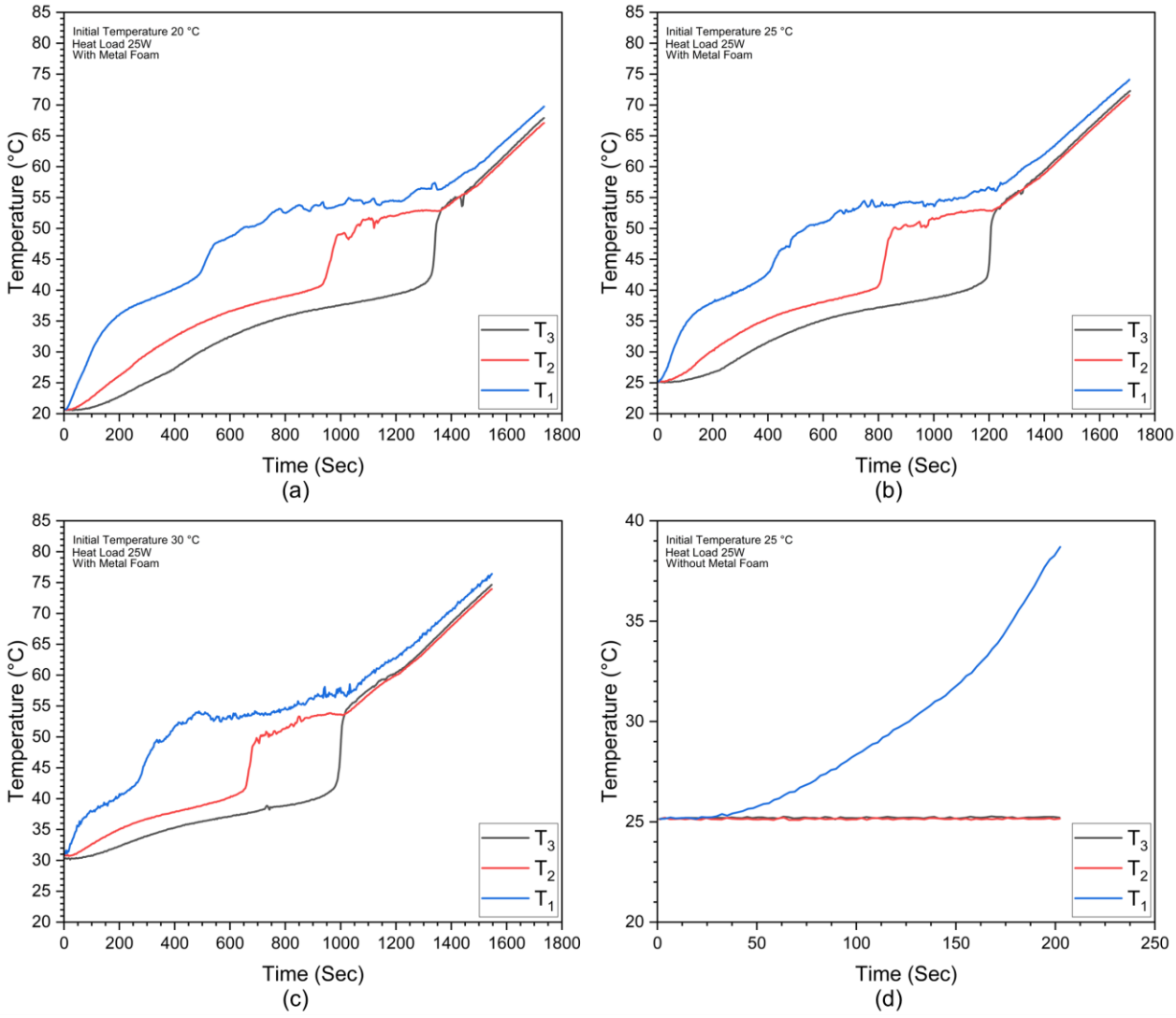


Figure 7. Temperature–time curves of internal thermocouples (T_3: top, T_2: middle, T_1: bottom). (a) Foam–PCM composite at 25 W with an initial temperature of 20 °C, (b) foam–PCM composite at 25 W with an initial temperature of 25 °C, (c) foam–PCM composite at 25 W with an initial temperature of 30 °C, and (d) pure PCM system at 25 W with an initial temperature of 25 °C.

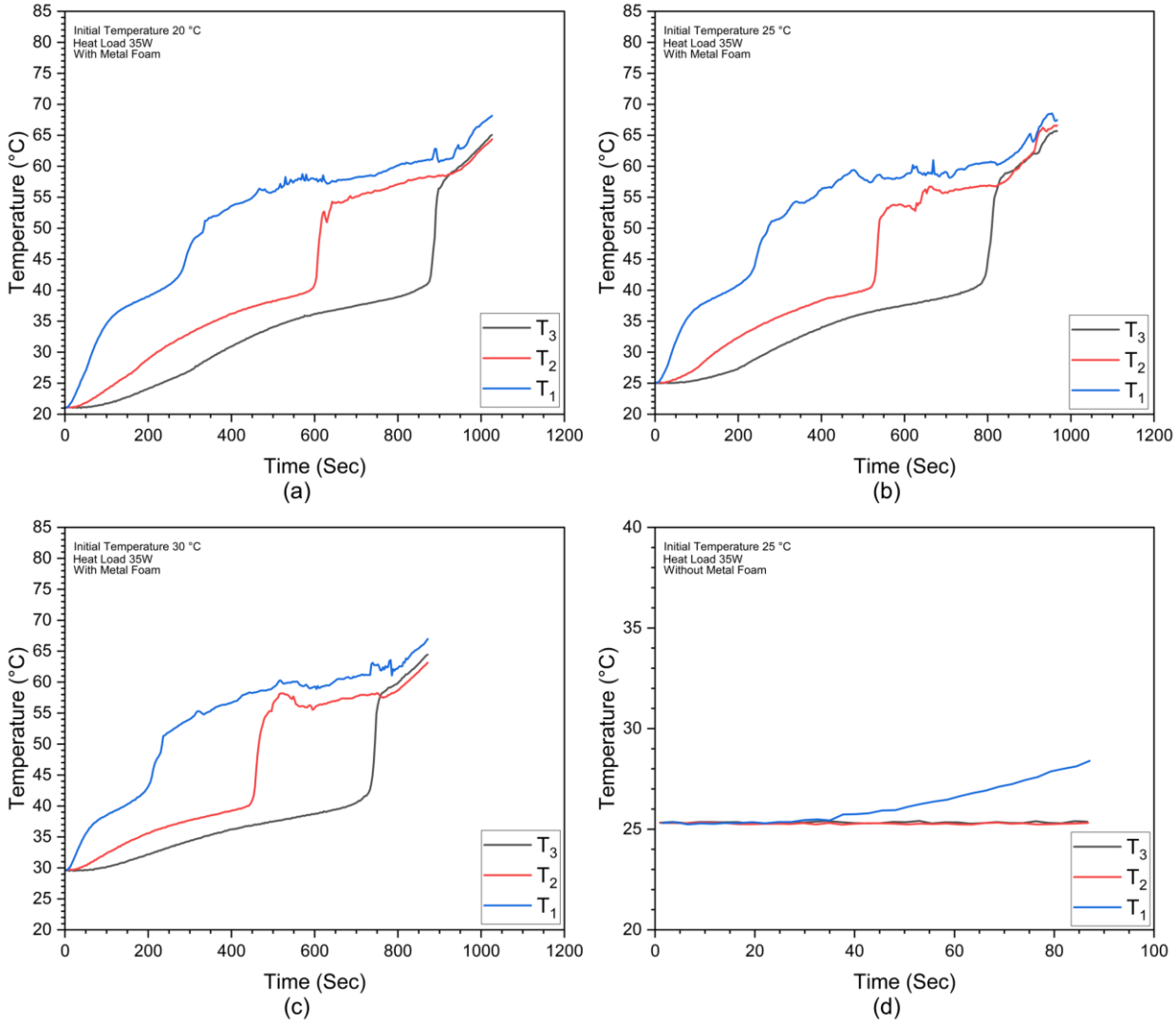


Figure 8. Temperature–time curves of internal thermocouples (T_3: top, T_2: middle, T_1: bottom). (a) Foam–PCM composite at 35 W with an initial temperature of 20 °C, (b) foam–PCM composite at 35 W with an initial temperature of 25 °C, (c) foam–PCM composite at 35 W with an initial temperature of 30 °C, and (d) pure PCM system at 35 W with an initial temperature of 25 °C.

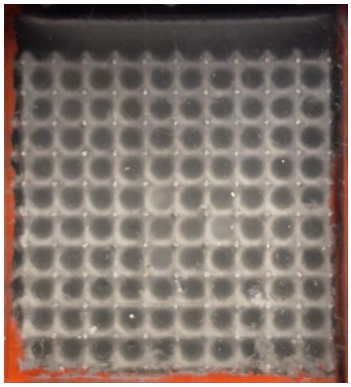
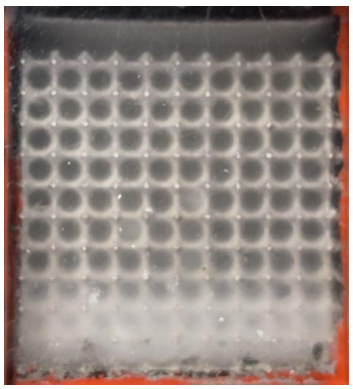
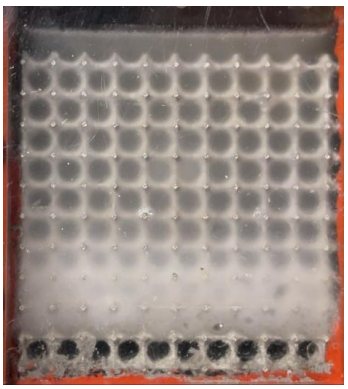
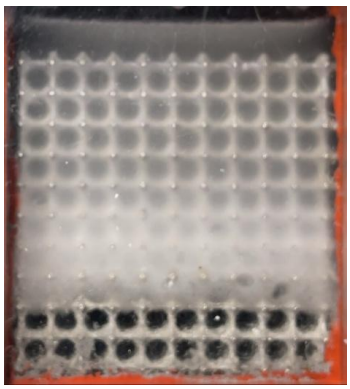
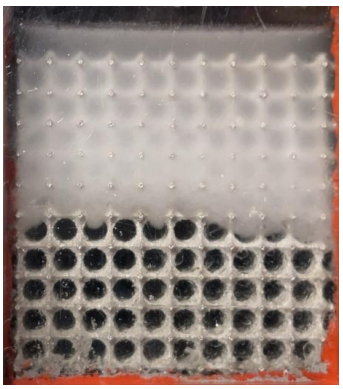
Figure 7 and 8 illustrate the temperature evolution measured by the internal thermocouples (T3: top, T2: middle, T1: bottom) in the Al6063 foam/RT-42 PCM composite system under applied heat loads of 25 W and 35 W. In both cases, the vertical temperature distribution reveals clear spatial variations, confirming that the local thermal response is strongly influenced by the proximity to the heater, the initial temperature, and the phase change dynamics of the PCM.

At the bottom region (T1), directly adjacent to the heater surface, the curves showed the steepest initial rise, as expected. The PCM in this zone quickly approached the melting range, with only a weak latent heat plateau, suggesting that the material near the heater was unable to fully exploit its thermal storage potential before heat was transferred upward. This effect was more pronounced at 35 W, where T1 reached near-critical levels significantly earlier, reflecting localized overheating due to conduction-dominated heat transfer.

The middle region (T2) consistently demonstrated the most pronounced latent heat plateau, confirming that this zone benefited the most from the PCM's buffering effect. At both 25 W and 35 W, T2 revealed extended plateaus around 40–50 °C, indicating efficient utilization of the PCM's latent heat capacity and more uniform heat distribution facilitated by both conduction through the metallic foam and convective mixing in the molten PCM. However, at 35 W the duration of these plateaus was noticeably shorter than under 25 W, confirming that higher heat flux accelerates melting and reduces the system's ability to maintain extended thermal stability.
The top region (T3) showed a more gradual temperature rise compared to T1 and T2, reflecting the delayed arrival of heat through upward conduction and buoyancy-driven convection during PCM melting. At 25 W, T3 exhibited a slower progression toward the melting range, while at 35 W, the delay before heating diminished but the slope remained lower than in the bottom region.
When comparing the three regions together, a clear vertical temperature gradient is evident: T1 > T2 > T3 at early times, transitioning into T2 > T1 ≈ T3 in the later stages. This demonstrates that although the bottom absorbs heat first, the central volume becomes the dominant thermal buffer during the melting process, while the top region reflects the delayed but smoother influence of upward conduction and natural convection.

Furthermore, the effect of initial temperature is evident. Lower starting conditions (20 °C vs. 25 °C and 30 °C) extended the duration of latent heat utilization and delayed the attainment of critical temperature, particularly in the T2 region. Nevertheless, under 35 W loads, even at lower initial temperatures, the safe operation period was significantly shorter than under 25 W, highlighting the strong influence of applied heat flux on PCM utilization.

Overall, the results confirm that the integration of a metallic foam matrix not only accelerates heat penetration into the PCM but also redistributes it more evenly across the volume. The bottom region (T1) acts as the most heat-stressed zone, the middle (T2) provides the strongest buffering effect through latent heat, and the top (T3) reflects delayed convective contributions. Together, these findings emphasize that both initial temperature and applied heat flux critically modulate the spatial distribution and effectiveness of PCM utilization in composite cooling systems.

Time (sec)	25W	Time (sec)	35W
0		0	
300		300	
600		600	

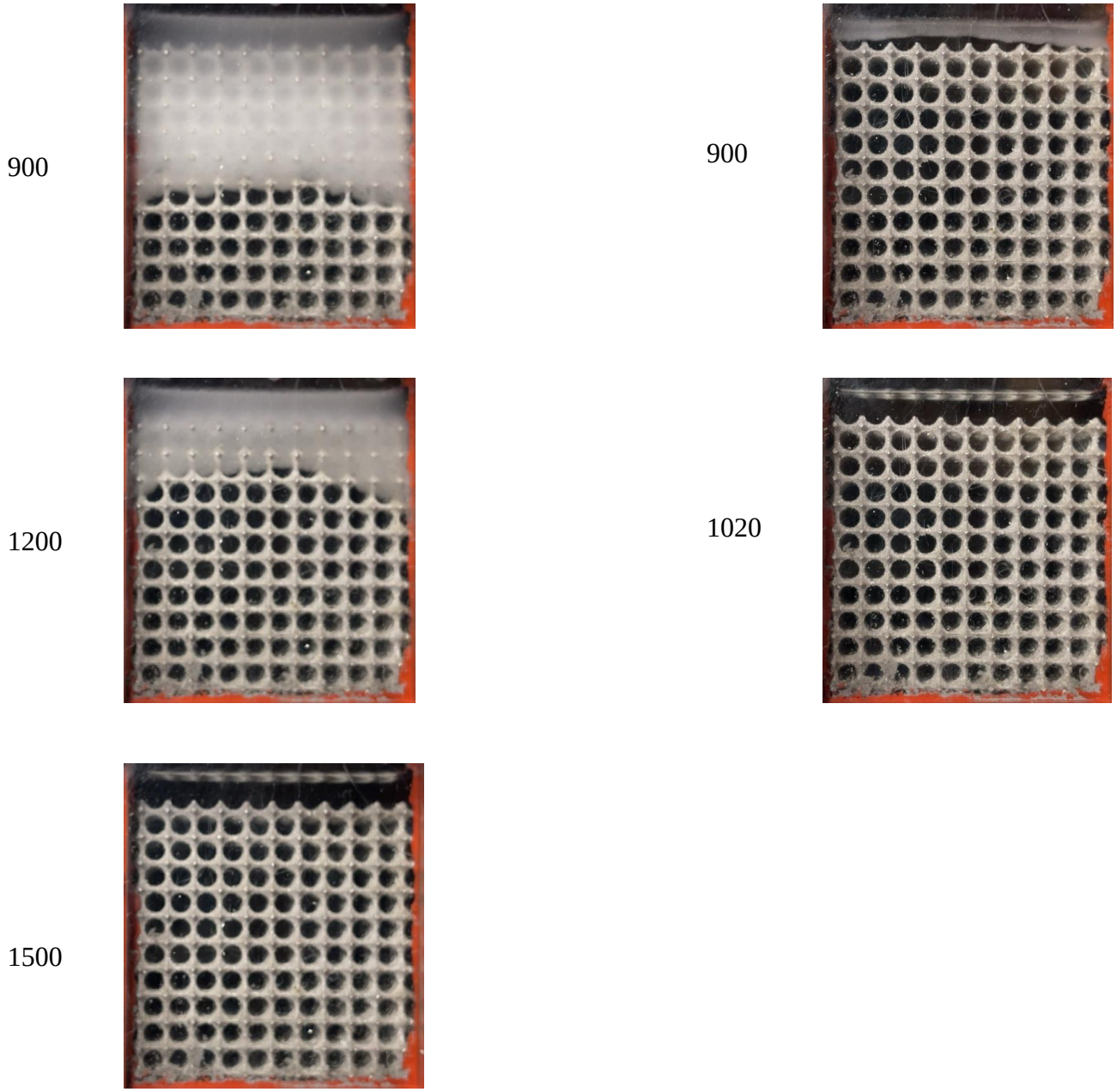


Figure 9. Solid–liquid interface progression of RT-42 PCM within the Al6063 open-cell foam under heat loads of 25 W and 35 W at different times.

The solid–liquid interface evolution is shown in Figure 9 for the RT-42 PCM embedded in the Al6063 open-cell foam under 25 W and 35 W heat loads. The snapshots clearly illustrate the distinct melting dynamics governed by the applied heat flux. For the 25 W case, melting proceeded gradually from the bottom upwards. At early times (0–600 s), only a small portion of the PCM

near the heater surface melted, while the upper regions remained predominantly solid. By 900–1200 s, the melting front advanced further upward with a relatively smooth and uniform interface, reflecting the effective utilization of latent heat and the buffering capacity of the PCM. Complete melting across the height of the sample was achieved only after ~1500 s, confirming the extended operation time under lower heat input.

In contrast, under the 35 W load, melting occurred much more rapidly. Already by 600 s, a significant portion of the lower and middle regions had melted, and by ~900–1020 s nearly the entire foam volume was in liquid state. The interface here appeared sharper and less gradual compared to the 25 W case, which indicates accelerated melting and reduced capacity to maintain a prolonged plateau in temperature. This confirms that the higher heat flux drastically shortens the period over which the PCM can effectively buffer thermal loads.

Comparing the two cases, it is evident that increasing the heat load from 25 W to 35 W substantially accelerates the solid–liquid interface propagation and reduces the safe operation period by several hundreds of seconds. These observations are consistent with the temperature–time measurements reported earlier, reinforcing the conclusion that while metal foam enhances heat transfer and distributes energy throughout the PCM, higher heat loads significantly limit the system's ability to exploit latent heat for extended thermal stability.

4. Conclusions

In this study, the thermal performance of an Al6063 open-cell metal foam/RT-42 PCM composite system was experimentally investigated under different initial temperatures (20, 25, 30 °C) and heat loads (25 W and 35 W). The results were compared with a pure PCM system to highlight the role of the metallic foam matrix in enhancing heat transfer and latent heat utilization. The key findings can be summarized as follows:

- At 25 W, lowering the initial temperature from 30 to 20 °C extended the safe operation time (tg) from 1395 s to 1758 s (~26% increase). At 35 W, the same reduction in initial temperature increased tg from 868 s to 1022 s (~18% increase).
- Increasing the applied heat load from 25 W to 35 W shortened tg by ~40%. Although pre-cooling still extended operation by ~200 s (18%) at 35 W.
- At 25 W, the pure PCM reached the critical temperature in only ~200 s, whereas the composite system extended safe operation beyond 1600 s. At 35 W, the pure PCM failed within 85 s, while the composite lasted ~963 s—almost 10 times longer.
- Internal thermocouple measurements revealed that the bottom region (T_1) was the most heat-stressed, the middle (T_2) exhibited the strongest latent heat plateau and acted as the main thermal buffer, while the top (T_3) reflected delayed convective contributions.
- The effect of heat load on melting dynamics was evident: at 25 W, melting progressed gradually from the bottom upwards, with complete melting reached after ~1500 s, indicating extended operation time and effective latent heat utilization, whereas at 35 W most of the PCM had liquefied by ~900–1020 s with a sharper interface and shorter plateau.

Acknowledgments: This work was supported by the Office of Scientific Research Projects of Karadeniz Technical University (Project No: FYL-2024-16113). The authors also acknowledge that generative artificial intelligence was used solely for language refinement, including grammar and clarity improvements, without influencing the scientific content or interpretations of this work.

References:

1. Kim J, Ma I, Tian Z (2024) Thermal Isolation Performance of Polyimide Aerogel within a Die-Embedded Glass Interposer. ACS Appl Eng Mater 2:706–714

2. Tafreshi OA, Ghaffari-Mosanenzadeh S, Karamikamkar S, Saadatnia Z, Kiddell S, Park CB, Naguib HE (2022) Novel, flexible, and transparent thin film polyimide aerogels with enhanced thermal insulation and high service temperature. J Mater Chem C 10:5088–5108

3. Xue L, Liu C, Wen J, et al (2024) Investigation of hydrothermal characteristics and entropy generation in a microchannel heat sink with elliptical fins. Eng Res Express 6:045324

4. Laguna G, Vilarrubí M, Ibañez M, et al (2018) Numerical parametric study of a hotspot-targeted microfluidic cooling array for microelectronics. Appl Therm Eng 144:71–80

5. Razgaleh SA, Aravamudhan S (2025) Enhanced Thermal Management in Microelectronics Packaging With 2D h-BN Nanocomposite Underfills. Nano Sel 6:e202400073

6. Nieminen T, Koskinen T, Kornienko V, Ross G, Paulasto-Kröckel M (2024) Thermal Boundary Conductance of Direct Bonded Aluminum Nitride to Silicon Interfaces. ACS Appl Electron Mater 6:2413–2419

7. Ekpu M (2020) Finite element analysis of the effect of fin geometry on thermal performance of heat sinks in microelectronics. J Appl Sci Environ Manag 23:2059

8. Ye J-C, Wen T-Y (2021) The Effects of Inlet Blockage and Electrical Driving Mode on the Performance of a Needle-Ring Ionic Wind Pump. Micromachines 12:900

9. Huang X, Zhang D, Wang Z (2020) Back Propagation Neural Network in Predicting the Thermal Fatigue Life of Microelectronic Chips. Inf MIDEM - J Microelectron Electron Compon Mater. https://doi.org/10.33180/InfMIDEM2020.102

10. Cai Q, Scullion D, Gan W, Falin A, Zhang S, Watanabe K, Taniguchi T, Chen Y, Santos EJG, Li LH (2019) High thermal conductivity of high-quality monolayer boron nitride and its thermal expansion. Sci Adv 5:eaav0129

11. Agrawal A, Chandrakar S (2020) Influence of particulate surface treatment on physical, mechanical, thermal, and dielectric behavior of epoxy/hexagonal boron nitride composites. Polym Compos 41:1574–1583

12. Zheng F, Wang C, Huang K, Li J (2021) Surface Adsorption in PEG/Hydroxyapatite and PEG/Dickite Composite Phase Change Materials. Energy Fuels 35:10850–10859

13. Arshad A, Jabbal M, Yan Y, Darkwa J (2019) The micro-/nano-PCMs for thermal energy storage systems: A state of art review. Int J Energy Res 43:5572–5620

14. Wang W, Fu T, Fang G (2024) Preparation and Thermal Performances of Lauric Acid/Polyvinyl Butyral/Graphene Nanoplates Composite Phase Change Materials. Phys Status Solidi A 221:2400104

15. Rupp H, Du F, Lorenz H, Schadewald A (2025) Sustainable and Shape-Stabilized Phase Change Material Based on Polyamide 12/ *N* , *N* -bis(2-Hydroxyethyl)dodecanamide via Thermally Induced Phase Separation. ChemSusChem 18:e202500175

16. Sebayang AMS, Humaidi S, Sembiring T, Tetuko AP, Fauzi M, Fachredzy A, Nabawi MAH, Padmadipoera RDSKNF, Sebayang P (2025) Paraffin and magnetite composite for thermal management applications. J Phys Conf Ser 2945:012017

17. Wang X, Wang Q, Cheng X, Chen X, Bai M (2023) Double Carbon Networks Reinforce the Thermal Storage and Thermal Transfer Properties of 1-Octadecanol Phase Change Materials. Materials 16:7067

18. Puengpan A (2022) Techno-economic feasibility of applying sugarcane waxbased phase change material to lower photovoltaic panel temperature. Int J Curr Sci Res Rev. https://doi.org/10.47191/ijcsrr/v5-i7-49

19. Liu X, Fleischer A, Feng G (2021) Nanoencapsulated Lauric Acid with a Poly(methyl methacrylate) Shell for Thermal Energy Storage with Optimum Capacity and Reliability. ACS Appl Polym Mater 3:2341–2351

20. Khodadadi JM, Hosseinizadeh SF (2007) Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. Int Commun Heat Mass Transf 34:534–543

21. Öztürk B, Gölbaşı Z, Yazıcı MY (2023) Experimental investigation of the melting performance of a low porosity metal foam/PCM composite heat sink in various configurations. Int Commun Heat Mass Transf 149:107169

22. Hong S -T., Herling DR (2007) Effects of Surface Area Density of Aluminum Foams on Thermal Conductivity of Aluminum Foam-Phase Change Material Composites. Adv Eng Mater 9:554–557

23. Xu H, Wang Y, Han X (2020) Analytical considerations of thermal storage and interface evolution of a PCM with/without porous media. Int J Numer Methods Heat Fluid Flow 30:373–400

24. Sweidan AH, Heider Y, Markert B (2018) Simulation of PCM-saturated porous solid matrix for thermal energy storage using the phase-field method. PAMM 18:e201800433

25. Ouikhalfan M, Hekimoğlu G, Sari A, Gencel O, Tyagi VV (2022) Metal Oxide Nanoparticle Dispersed-Polyethylene Glycol: Thermal Conductivity and Thermal Energy Storage Properties. Energy Fuels 36:2821–2832

26. Buonomo B, Manca O, Nardini S, Plomitallo RE (2024) Numerical Study on Phase Change Material with Metal Foam in Shell and Convergent/Divergent Tube Thermal Energy Storage Systems with External Heat Losses. Int J Heat Technol. https://doi.org/10.18280/ijht.420101

27. Shahsavar A, Al-Rashed AAAA, Entezari S, Sardari PT (2019) Melting and solidification characteristics of a double-pipe latent heat storage system with sinusoidal wavy channels embedded in a porous medium. Energy 171:751–769

28. Yang X, Niu Z, Guo J, Wei P, He Y (2022) Melting evaluation of a thermal energy storage unit with partially filled metal foam*. Int J Energy Res 46:195–211

29. Fok PJY, Ng ZK, Kandasamy R, Li H, Tay RY, Tsang SH, Wong TN (2025) High-Performance Phase Change Materials Based on Nanotextured Cu Foam and Paraffin for Efficient Thermal Energy Storage. ACS Appl Eng Mater 3:314–324

30. Buonomo B, Manca O, Menale F, Nardini S (2022) Thermal control of lithium-ion batteries for electric cars by metal foam partially filled with Phase Change Material. J Phys Conf Ser 2385:012058

31. Hong S-T, Herling DR (2006) Open-cell aluminum foams filled with phase change materials as compact heat sinks. Scr Mater 55:887–890

32. Liu Y, Qin Z, Chu F (2021) Nonlinear dynamic responses of sandwich functionally graded porous cylindrical shells embedded in elastic media under 1:1 internal resonance. Appl Math Mech 42:805–818

33. Leszczyński B, Gancarczyk A, Wróbel A, Piątek M, Łojewska J, Kołodziej A, Pędrys R (2016) Global and Local Thresholding Methods Applied to X-ray Microtomographic Analysis of Metallic Foams. J Nondestruct Eval 35:35

34. Skibinski J, Cwieka K, Haj Ibrahim S, Wejrzanowski T (2019) Influence of Pore Size Variation on Thermal Conductivity of Open-Porous Foams. Materials 12:2017

35. Lafdi K, Mesalhy O, Shaikh S (2007) Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials. J Appl Phys 102:083549

36. Hu X, Wan H, Patnaik SS (2015) Numerical modeling of heat transfer in open-cell micro-foam with phase change material. Int J Heat Mass Transf 88:617–626

37. Al-Jethelah M, Ebadi S, Venkateshwar K, Tasnim SH, Mahmud S, Dutta A (2019) Charging nanoparticle enhanced bio-based PCM in open cell metallic foams: An experimental investigation. Appl Therm Eng 148:1029–1042

38. Gopinathan A, Jerz J, Kováčik J, Dvorák T (2021) Investigation of the Relationship between Morphology and Thermal Conductivity of Powder Metallurgically Prepared Aluminium Foams. Materials 14:3623

DESIGN OF A MODULAR MAGLEV TRANSPORTATION TEST PLATFORM AND INVESTIGATION OF LDR PERFORMANCE OF PERMANENT MAGNET ARRAYS (PMA)

HAKKI MOLLAHASANOGLU [*1], UFUK KEMAL OZTURK [2], MURAT ABDIOGLU[3]

[1]Recep Tayyip Erdogan University, Engineering and Architecture Faculty, Electrical and Electronic Engineering Department, Rize, TURKEY.
[2]Karadeniz Technical University, Science Faculty, Physics Department, Trabzon, TURKEY.
[3]Bayburt University, Education Faculty, Mathematics and Science Department, Bayburt, TURKEY.

Abstract

Electrodynamic levitation (EDL)-based Maglev transportation systems are among the innovative technologies of the future due to their high-speed potential, energy efficiency, and environmental sustainability. However, experimental investigation of such systems, especially at high speeds, is significantly challenging due to the substantial infrastructure requirements. Within the scope of this study, a novel modular test platform capable of reaching speeds equivalent to 320 km/h has been developed to examine the magnetic force parameters between permanent magnet arrays (PMA), high-temperature superconductors (HTS), and aluminium rails. The system is equipped with a SCADA-based control unit, multi-axis force sensors, and interchangeable magnet/rail modules.

This experimental setup, which holds critical importance for applications in electrical machines and magnetic materials, enables high-precision measurement of levitation and drag forces at varying levitation gaps. In preliminary experiments, lift and drag forces were successfully measured using PMA configurations, and the results were evaluated in terms of the lift-to-drag ratio (LDR). It was observed that the system performance can be optimized based on speed, rail geometry, and magnet configurations through different PMA topologies. In this respect, the proposed platform provides a valuable infrastructure for the development of more efficient and cost-effective Maglev designs.

Keyword: Electrodynamic Levitation (EDL), Permanent Magnet Arrays (PMA), LDR (Lift/Drag Ratio), Maglev, Magnetic Force

1. Introduction

Today's energy crisis, climate change, and transportation needs associated with urbanization require cleaner, faster, and more sustainable solutions. In the face of environmental damage caused by fossil fuels, rail systems and magnetic levitation (Maglev) technologies are coming to the fore with their high speed and energy efficiency potential. In this context, Maglev systems, which operate without physical contact and utilize electromagnetic forces for propulsion, are considered one of the cornerstones of future transportation infrastructure. Maglev transportation systems primarily rely on two main technologies: Electromagnetic levitation (EML) and electrodynamic levitation (EDL). In EML systems, the train is lifted into the air thanks to the attractive force created between electromagnets and ferromagnetic rails. These systems are notable for their high-precision position control and energy efficiency. Numerous studies have been conducted on EML-based Maglev systems in the literature. These studies include important contributions such as the optimization of lift force control parameters [1], simulations of linear motor [2], and development of experimental test systems [3], [4]. However, EML systems have some structural limitations. Disadvantages such as the need for continuous energy supply for electromagnets, complex control systems, electromagnetic noise, and sensitivity to external environmental conditions limit the efficiency of these systems in long-distance and high-speed applications. Additionally, static test infrastructures often fail to adequately represent the dynamic effects encountered in real operating conditions (e.g., force changes dependent on speed and acceleration) [5], [6]. For these reasons, the search for more stable, low-maintenance systems with passive stability has led researchers to explore EDL systems. EDL systems offer a contactless suspension method that enables trains to rise above the rails thanks to the repulsive magnetic forces that naturally arise as the system speed increases. In these systems, permanent magnets (PM) or high-temperature superconductors are used to balance the train in the air without physical contact. In these respects, EDL systems are more advantageous than EML systems for long-distance and high-speed transportation. When examining studies conducted in recent years, numerous research projects focusing on the development and optimization of EDL systems can be observed [7], [8], [9]. These studies contribute to understanding the dynamic behaviour of the system, optimizing the design of magnetic components, and predicting performance under different operating conditions. Another notable subfield in EDL systems is configurations created using permanent magnet arrays (PMA). In these systems, levitation force is achieved using permanent magnets with high energy density, such as NdFeB. Unlike electromagnets, these systems do not require continuous energy, making them both more energy-efficient and more economical in terms of maintenance. Additionally, unlike superconducting systems, they do not require cryogenic cooling, further reducing operational costs. Current studies are conducting detailed research on improving performance and applicability by differentiating magnet arrangements [10] and material types [11] in these systems. However, experimental tests conducted to verify the operation of EDL systems, especially at high speeds, have emerged as one of the weakest links in the system. This is because, by their very nature, EDL systems only generate levitation force once a certain speed threshold is exceeded, meaning that testing these systems under realistic conditions requires high-speed and complex test infrastructures. Test systems developed to fill this gap in the literature offer various prototype infrastructures for examining rail-magnet interactions, dynamic force characteristics, and vibration behaviour. In a study conducted by Deng et al., the dynamic stability of the system at high speeds was comprehensively evaluated using a circular test track specifically designed for Maglev experiments [12]. Similarly, Zhang et al. improved speed-dependent vibration models within the test environment to better understand system responses under dynamic conditions [13]. Liu et al. reported a decreasing trend in the levitation force in a system reaching speeds up to 238 km/h [14]. On the other hand, in another test setup developed in China, a side-suspended HTS–permanent

magnet array configuration was employed to investigate dynamic stability at speeds up to 150 km/h [15].

Most existing Maglev test systems face various limitations, such as limited speed capacity, lack of modular structure, and insufficient force measurement accuracy. To address these shortcomings, our research group has developed a project that includes the design of a unique and modular experimental setup capable of achieving high speeds and easily testing different rail and permanent magnet configurations [16].

Within the scope of this study, the levitation and drag forces between permanent magnet arrays (PMA) and aluminum rails were experimentally investigated using the test platform under various suspension ranges and speed scenarios. Based on the measured force data, the lift-to-drag ratio (LDR) was calculated under dynamic conditions, and comparative analyses were conducted according to different magnet topologies. The findings contribute significantly to the optimization of design criteria for the magnetic configurations of high-speed EDL-based Maglev systems and the identification of more efficient magnet-rail combinations.

2. Materials and Methods

In Maglev systems based on the principle of EDL, the relative motion between the moving magnetic source and the conductive rail causes eddy currents to form within the rail. As a result of the interaction between these currents and the magnetic source, a levitation (lift) force (F_L) directed upward from the rail and a drag force (F_D) in the opposite direction of motion are generated. These two forces are the fundamental electromagnetic parameters that determine both the transport capacity and energy losses of the system. In this context, the lift-to-drag ratio (LDR) has been defined to quantitatively evaluate the energy efficiency and performance of the system. LDR is calculated as the ratio of lift force to drag force and is expressed by the following mathematical equation:

$$LDR = \frac{F_L}{F_D} = \frac{1}{\beta_n} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\pi\mu\sigma\lambda\upsilon} \quad (1)$$

Here, β_n is related to the wave vector of the system; μ represents the magnetic permeability of the ray material; σ represents its electrical conductivity; λ represents the magnetic configuration characteristic; and υ represents the relative velocity. Considering this formulation, the higher the LDR value, the less drag the system generates for the same lift force, and thus the more efficient it is considered to be.

The experimental setup used in this study was designed by our research group [16] as a high-speed, modular Maglev test platform. The general view of the test system is shown in Figure 1.

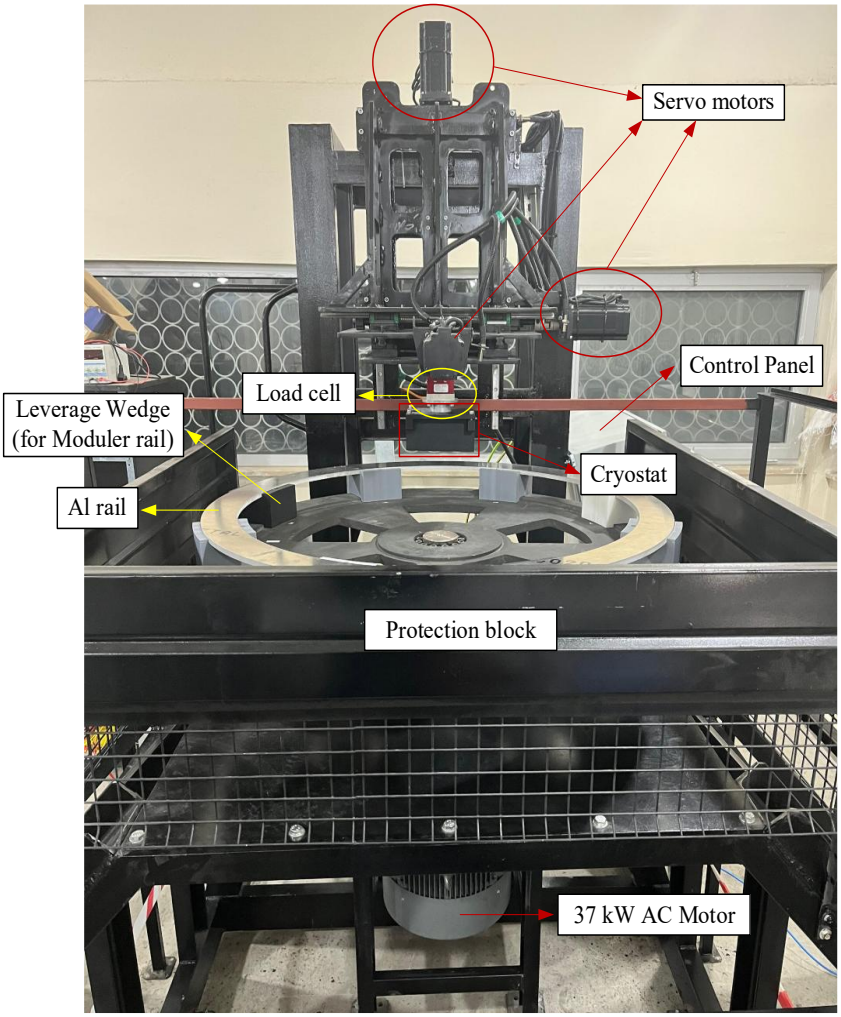


Figure 1. General view of the EDL test prototype

In the experimental setup presented in Figure 1, various mechanical and electrical components were integrated to ensure high-speed and vibration-free operation. To provide motion, a GAMAK-brand drive motor with a rated power of 37 kW, operating at 1500 rpm and supplied with 380 V, was employed. For controlled operation at variable speeds, a Delta CP2000 series inverter motor driver (VFD370CP4EB-21) was utilized. To minimize mechanical vibrations during dynamic measurements, the motor was mounted on a separate unit, isolated from the main structural frame. The connection between the motor and the flywheel was established through a belt-pulley transmission mechanism, preventing direct mechanical contact. This configuration was chosen to ensure quiet operation and to reduce the level of vibration to a minimum. The flywheel was structurally optimized by symmetrically hollowing its inner sections to achieve mechanical balance, and a protective casing was installed around it to ensure safety during high-speed operation. All these components were integrally designed to achieve stable system performance and reliable measurement capabilities at high velocities.

The magnetic source used in the tests consists of NdFeB-based permanent magnet arrays (PMA), with three identical magnets, each measuring 20 mm × 40 mm × 20 mm, placed inside a soft ferromagnetic carrier structure to form a magnetic module. These magnets are assembled in

accordance with the experimental modularity principle and integrated into the system's magnetic production chamber. Figure 2 provides a detailed overview of the magnet topology created its mounting on the force sensor, and its integration into the aluminum-railed Maglev test system.

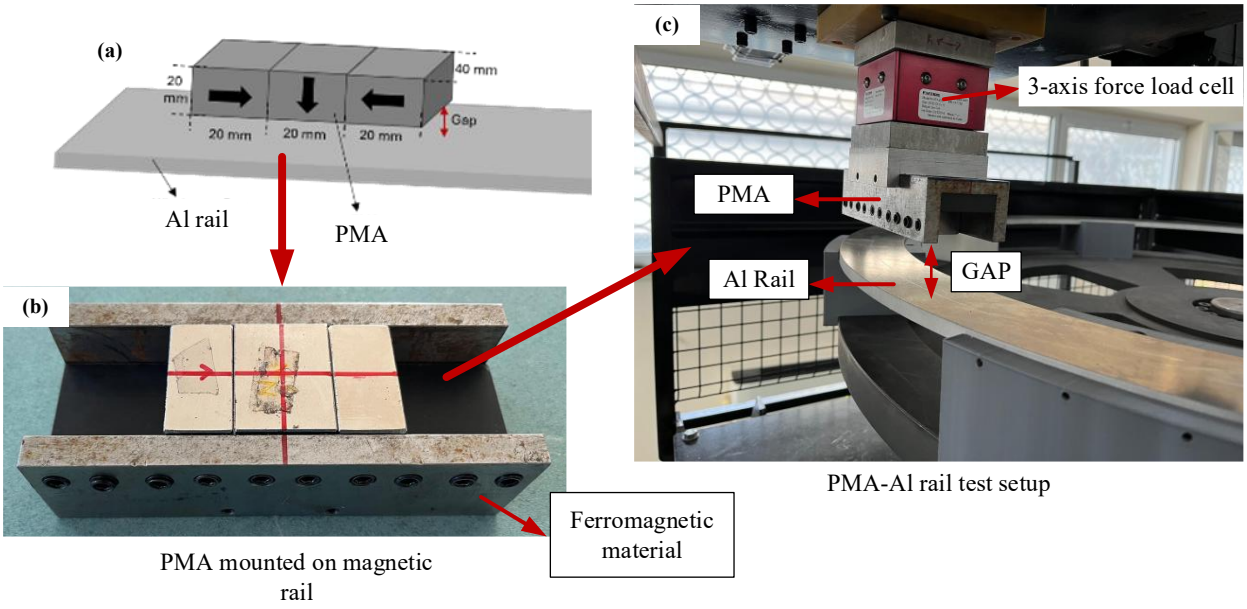


Figure 2. Creation of the PMA-Al rail test system: topology (a), creation of the PMA guideway (b) and test setup (c)

Three different air gaps of 10 mm, 12 mm, and 15 mm were applied between the magnets and the aluminum rail surface. Under these parameters, the lifting and drag forces produced by the system under dynamic operating conditions were measured, and the LDR (Lift-to-Drag Ratio) values were determined. The experiments were conducted under scenarios where the speed of the system was gradually increased from 0 rpm to 1475 rpm; all data obtained were monitored and recorded in real time through SCADA-based control and data collection infrastructure.

A high-precision FUTEK MTA400 multi-axis force sensor is used in the system for force measurements. This sensor operates with ±1 N accuracy and 2200 N maximum capacity in the vertical direction, and ±0.5 N accuracy and 1100 N maximum capacity in the horizontal direction, ensuring the accuracy and repeatability of experimental data. The sensor is positioned to provide direct force transmission to the magnetic module and has been made compatible with different magnet topologies through its modular design.

3. Results and Discussion

After creating the topology shown in Figure 2, magnetic force measurements were performed. In this context, measurements were performed at three different movement heights (10, 12, and 15 mm) and at a speed range where the aluminium rail speed was continuously increased from 0 to 200 km/h, and the data was recorded using the SCADA system. The measurement results are presented in Figure 3.

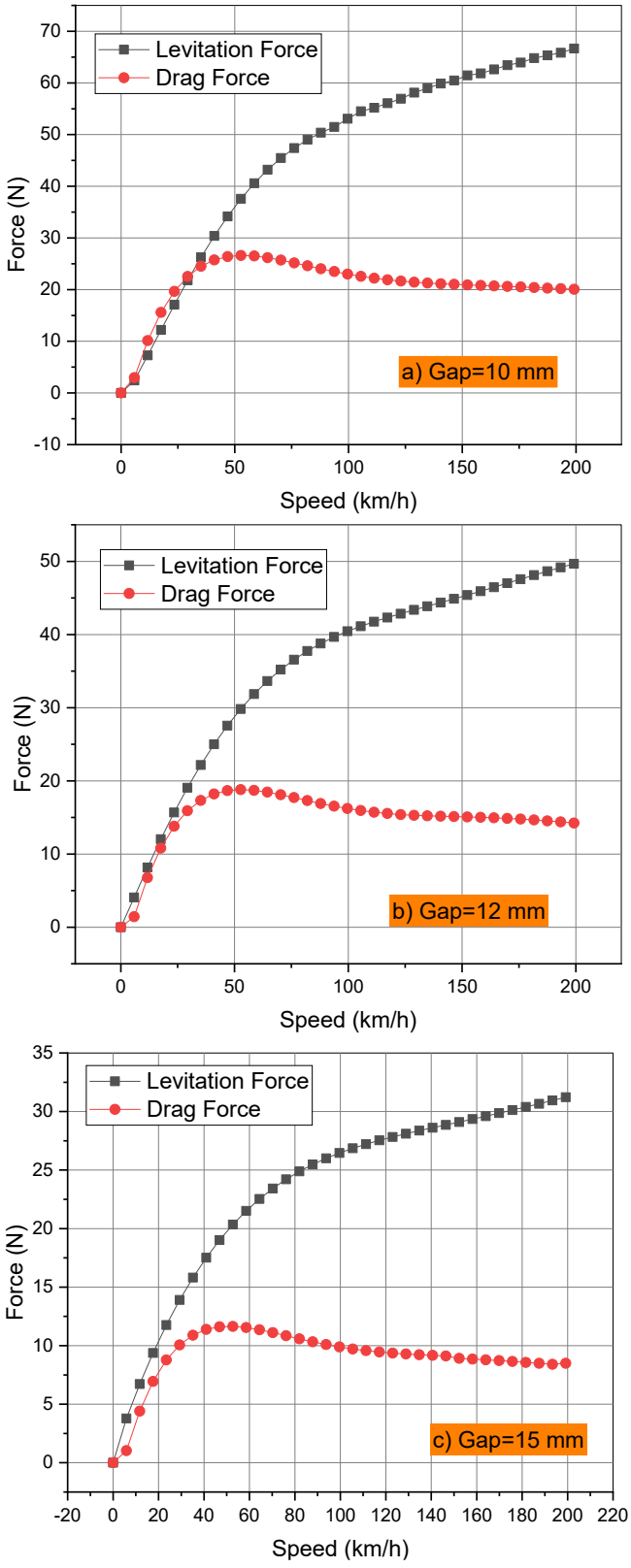


Figure 3. Dependence of magnetic lifting and drag forces on velocity in different air gaps

As shown in Figure 3, a levitation force of 66 N and a drag force of 20 N were obtained with a 10 mm gap, a levitation force of 50 N and a drag force of 14 N were obtained with a 12 mm gap, and a levitation force of 31 N and a drag force of 8 N were obtained with a 15 mm gap. The observed trends are consistent with EDL physics: as the air gap decreases, both the levitation force and drag force increase; as the speed increases, vortex currents strengthen and forces increase.
After completing the magnetic force measurements, the LDR was calculated for different speed values. Figure 4 shows the measurement results. It can be seen that the LDR value increases as the distance between the aluminium rail and the magnetic field source increases.

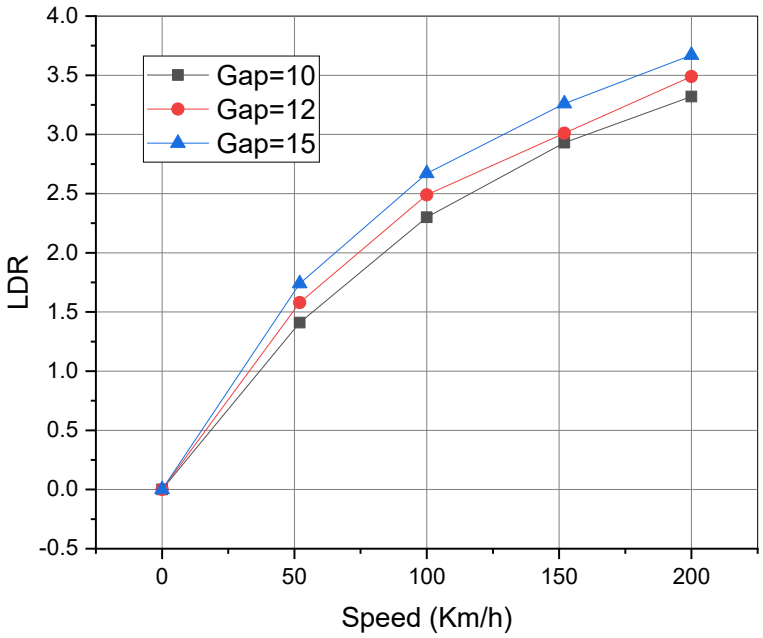


Figure 4. Variation of lift-to-drag ratio (LDR) with translational speed for different air gaps (g = 10, 12, 15 mm)

4. Conclusions:

In this study, a high-speed modular EDL Maglev test platform equipped with a SCADA-based control and multi-axis force measurement system was developed and validated. The platform enables interchangeable magnet/rail modules and precise force acquisition over a wide range of speeds. Using a compact NdFeB permanent magnet array (three 20×40×20 mm magnets in a soft-ferromagnetic carrier), the levitation and drag forces were measured for three air gaps (10, 12, 15 mm) up to 200 km/h, and the lift-to-drag ratio (LDR) was determined. Results showed that while smaller gaps produced higher absolute levitation (66 N at 10 mm vs. 31 N at 15 mm), LDR improved with larger gaps (≈ 3.3 to ≈ 3.9), indicating better efficiency. These findings highlight the trade-off between lift capacity and energy cost and point to intermediate gaps as a balanced design choice. The proposed platform provides a reproducible basis for benchmarking PMA topologies under dynamic conditions; future work will expand speed range, investigate alternative magnetization schemes, and couple experiments with predictive numerical models to optimize LDR.

Acknowledgments: This work and the attendance at the conference were supported by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK), with project number 122F432 and the Scientific Research Projects Coordination Unit of Karadeniz Technical University with project No. FBA-2024-11081.

References:

[1] Y. Xu, Z. Zhao, S. Yin, and Z. Long, "Real-Time Performance Optimization of Electromagnetic Levitation Systems and the Experimental Validation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 3, pp. 3035–3044, Mar. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3167154.

[2] U. K. Ozturk, M. Abdioglu, E. C. Ozkat, and H. Mollahasanoglu, "Extended 2-D Magnetic Field Modeling of Linear Motor to Investigate the Magnetic Force Parameters of High-Speed Superconducting Maglev," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 4, pp. 1–8, Jun. 2023, doi: 10.1109/TASC.2023.3245880.

[3] S. Celik, "Design of magnetic levitation force measurement system at any low temperatures from 20K to room temperature," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 662, pp. 546–556, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.11.230.

[4] G. Bohn and G. Steinmetz, "The electromagnetic levitation and guidance technology of the 'transrapid' test facility Emsland," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 20, no. 5, pp. 1666–1671, Sep. 1984, doi: 10.1109/TMAG.1984.1063246.

[5] H.-W. Lee, K.-C. Kim, and J. Lee, "Review of maglev train technologies," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 7, pp. 1917–1925, Jul. 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.875842.

[6] H. Mollahasanoglu, M. Abdioglu, U. K. Ozturk, H. I. Okumus, E. Coskun, and A. Gencer, "Numerical Investigation of EDS Maglev Systems in Terms of Performance and Cost for Different PMs-Aluminum Rail Arrangements," *J Supercond Nov Magn*, vol. 38, no. 1, p. 52, Jan. 2025, doi: 10.1007/s10948-024-06899-z.

[7] C. Luo, K. Zhang, W. Zhang, and Y. Jing, "3D Analytical Model of Permanent Magnet and Electromagnetic Hybrid Halbach Array Electrodynamic Suspension System," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 1713–1721, Jul. 2020, doi: 10.1007/s42835-020-00449-y.

[8] Y. Hu, Z. Long, J. Zeng, and Z. Wang, "Analytical Optimization of Electrodynamic Suspension for Ultrahigh-Speed Ground Transportation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 8, pp. 1–11, Aug. 2021, doi: 10.1109/TMAG.2021.3082686.

[9] L. Beauloye and B. Dehez, "Permanent Magnet Electrodynamic Suspensions Applied to MAGLEV Transportation Systems: A Review," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 748–758, Mar. 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3193296.

[10] K. Ozturk, B. Savaskan, M. Abdioglu, A. Cansiz, D. B. Dilek, and Z. Karaahmet, "Comparing of the Magnetic Force Parameters of Superconducting Maglev System Using Horizontal and Vertical PMG Geometry in Multi-Surface HTS-PMG Arrangement," *J Supercond Nov Magn*, vol. 34, no. 12, pp. 3151–3161, Dec. 2021, doi: 10.1007/s10948-021-06072-w.

[11] B. Savaskan *et al.*, "Bulk MgB2 superconductor for levitation applications fabricated with boron processed by different routes," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 961, p. 170893, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.170893.

[12] Z. Deng *et al.*, "A High-Temperature Superconducting Maglev Ring Test Line Developed in Chengdu, China," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 6, pp. 1–8, Sep. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2555921.

[13] S. Zhang, Z. Deng, Z. Huang, H. Li, X. Zhou, and W. Zhang, "Measurement of levitation force of high-temperature superconducting maglev under high-speed operation condition," *Cryogenics*, vol. 139, p. 103808, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cryogenics.2024.103808.

[14] L. Liu *et al.*, "Levitation Force Transition of High-Tc Superconducting Bulks in Varying External Magnetic Field," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, pp. 920–923, Jun. 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2041645.

[15] B. Wang *et al.*, "A fast dynamic model of a two-sided permanent magnet electrodynamic suspension system in a maglev train," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 237, no. 8, pp. 996–1008, Sep. 2023, doi: 10.1177/09544097231168035.

[16] U. K. Ozturk, H. Mollahasanoglu, M. Abdioglu, H. I. Okumus, and H. Gedikli, "Design and initial experimental verification of a high-speed electrodynamic levitation measurement system utilizing modular magnetic field sources and aluminium rails," *Measurement*, vol. 256, p. 118256, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118256.

BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ İÇİN MPPT KONTROLLÜ GÜNEŞ ENERJİSİYLE ÇALIŞAN YÜKSELTİCİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ SİSTEMİNİN TASARIMI VE BENZETİMİ

AYŞENUR YILMAZ*, EMRE YİĞİT, MUSTAFA ERGİN ŞAHİN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, 53100, Rize, Türkiye

aysenur_yilmaz21@erdogan.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, güneş enerjisiyle çalışan araç batarya şarjı için bir artırıcı çevirici tasarlanarak enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu sayesinde enerji maliyetleri azaltılmış ve elektrik altyapısının yetersiz olduğu bölgelerde bağımsız çalışabilirlik sağlanmıştır. Batarya kullanımının en aza indirilmesiyle sistem maliyeti düşürülmüş, yapı zorlu çevresel koşullara dayanıklı olacak şekilde optimize edilmiştir. Sistemin merkezinde yer alan MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) kontrollü DA-DA artırıcı çevirici, güneşten elde edilen enerjinin kış koşullarında dahi en verimli biçimde kullanılmasına imkân tanımaktadır. Elektronik devreler MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş olup, çalışmanın özgün yönü güneş enerjisi tabanlı batarya şarj yapısının otonom çizgi takip sistemine entegre edilmesidir. Bu yaklaşım, klasik batarya tabanlı sistemlerin ötesine geçerek uzun süreli, ekonomik ve çevre dostu bir alternatif ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Otonom Çizgi Takip Sistemi, Enerji Verimliliği, Yenilebilir Enerji, Çevirici, Kontrolcü

DESIGN AND SIMULATION OF A SOLAR POWERED BOOST CONVERTER SYSTEM WITH MPPT CONTROL FOR AN ELECTRIC VEHICLE

Abstract

In this study, a boost converter was designed for battery charging in a solar-powered vehicle, aiming to enhance energy efficiency and environmental sustainability. Through the integration of renewable energy sources, energy costs were reduced, and independent operation was achieved in regions with limited electrical infrastructure. Minimizing battery usage lowered the overall system cost, while the structure was optimized to withstand harsh environmental conditions. At the core of the system, the MPPT (Maximum Power Point Tracking) controlled DC-DC boost converter enables the efficient utilization of solar energy even under winter conditions. The electronic circuits were modeled in MATLAB/Simulink, and the originality of this work lies in the integration of a solar-based battery charging system into an autonomous line-following vehicle. This approach moves beyond conventional battery-based systems, offering a long-lasting, cost-effective, and environmentally friendly alternative.

Keywords: Solar Energy, Autonomous Line-Following System, Energy Efficiency, Renewable Energy, Converter, Controller.

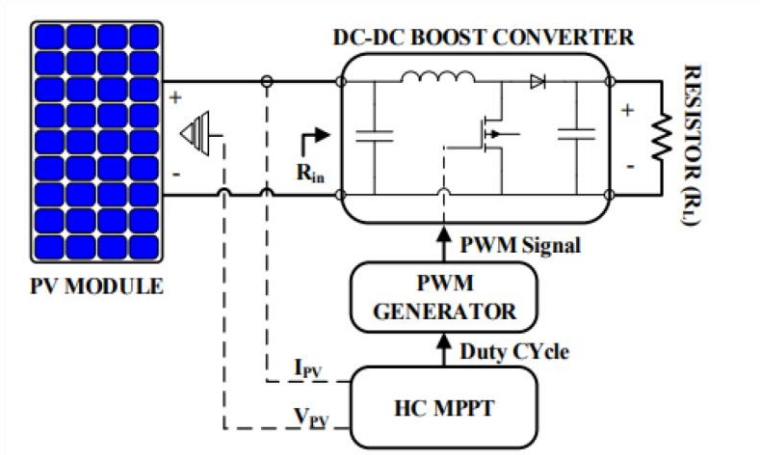
1.Giriş

Dünyanın artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri küresel ölçekte önemli bir sorun haline gelmiştir. Fosil yakıtların tükenmesi ve zararlı emisyonlar; dünya genelinde küresel ısınma, hava kirliliği ve çevre tahribatına yol açmaktadır. Bu nedenle daha temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji, tükenmeyen doğal kaynaklardan elde edilen çevre dostu bir enerji türü olup, özellikle güneş enerjisi en önemli kaynaklardan biri olarak öne çıkmaktadır [1, 2].

Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) sistemlerle doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmekte ve sürdürülebilir enerji üretiminde büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda dünya genelinde bu alana yapılan yatırımlar artmış; Çin, ABD, Japonya, Almanya ve Hindistan lider ülkeler arasında yer alırken, Türkiye de yüksek potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Özellikle Konya, geniş düzlükleri ve güneş ışını geliş açısı sayesinde güneş enerjisi üretimi için elverişli bir bölgedir [3].

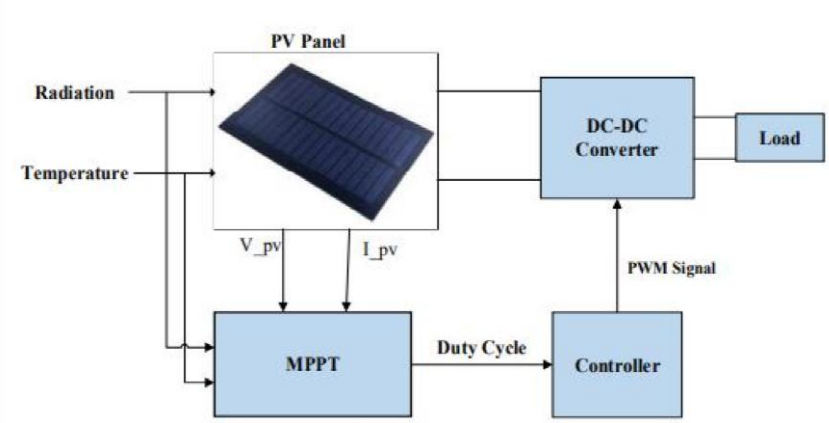
"Güneş Enerjisi İle Çalışan Araç Batarya Şarjı Artıran Çevirici Tasarımı" çalışması, yenilenebilir enerji kullanımının pratik bir örneği olarak değerlendirilmektedir [4]. Çalışmada güneş panelleriyle enerji üretilerek otonom aracın çizgi takip sistemi çalıştırılmakta ve emisyonların önüne geçilmektedir. Bu tür çalışmalar, hem enerji verimliliği sağlamakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır [5]. Fotovoltaik sistemler, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürerek aracın motorları için gerekli gücü sağlamaktadır. Böylece fosil yakıtlara olan bağımlılık azalmakta, tamamen temiz bir enerji kaynağı kullanılmaktadır [6,7]. Çalışmanın temel amacı, yenilenebilir enerjinin kullanımını artırmak ve çevre dostu teknolojilerin gelişimine katkıda bulunmaktır. Dünya genelinde elektrik üretiminin %73,5'i fosil yakıtlardan, %26,5'i ise yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu oran, dönüşüm sürecinin önemini göstermektedir [8].

Güneş paneli kullanımı, yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı sunarak çevre dostu bir çözüm sağlar ve karbon ayak izinin azalmasına katkıda bulunur. Uzun vadede düşük işletme maliyetleriyle ekonomik tasarruf imkanı tanırken, harici enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak enerji bağımsızlığı sağlar [9]. Ayrıca, düşük bakım ihtiyacı sayesinde 25-30 yıl gibi uzun bir ömre sahiptir. Devlet teşvikleri ve vergi avantajları da güneş paneli yatırımını daha cazip hale getirmektedir. Güneş enerjisi kullanılarak tasarlanan otonom çizgi takip sistemleri, özellikle enerjiye erişimin sınırlı olduğu zor arazi şartlarında enerji sürekliliği ve endüstriyel alanlarda maliyet avantajı sağlamaktadır [10]. Enerji altyapısının yetersiz olduğu bölgelerde, üretim süreçlerini optimize eder ve kesintisiz enerji kaynağı ile çalışma avantajı sunar. Bu çalışmada, enerji yönetimi algoritmaları ve depolama birimleri sayesinde çevre dostu, enerji bağımsız ve ekonomik bir çözüm olarak dikkat çekmektedir [11]. Fotovoltaik (PV) sistemlerde maksimum güç noktasının etkin bir şekilde takip edilebilmesi için DA-DA artıran çevirici yapılarının önemi literatürde sıkça vurgulanmaktadır. MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) algoritmalarının doğruluk ve tepki süresini artırmak amacıyla tasarlanan artıran çevirici modelleri, özellikle bağımsız (stand-alone) PV sistemlerde kritik bir rol oynamaktadır [12]. Yapılan çalışmalarda, tasarlanan artıran çeviricilerin geçici rejimlerde daha kararlı çalıştığı ve farklı ışınım koşullarında dahi hızlı tepki verdiği gösterilmiştir. Ayrıca bu konvertör yapılarının, Perturb & Observe (P&O) ve Incremental Conductance (IncCond) gibi yaygın algoritmaların daha kararlı ve verimli çalışmasına olanak sağladığı belirtilmiştir. Bu kapsamda, artıran çevirici tabanlı MPPT sistemlerinin hem enerji verimliliği hem de gerçek zamanlı izleme açısından avantaj sunduğu, yük direnci içeren bağımsız bir PV sistemin blok diyagramı Şekil 1' de gösterilmektedir [13].



Şekil 1. MPPT Destekli artıran çevirici bağımsız fotovoltaik (PV) sistemin blok diyagramı

Benzer şekilde, Incremental Conductance tabanlı MPPT algoritmalarının MATLAB/Simulink ortamında modellenerek performanslarının incelendiği çalışmalarda, fotovoltaik sistemlerin değişken ışınım ve sıcaklık koşullarına maruz kaldığında bile maksimum güç noktasını hızlı ve kararlı bir şekilde takip edebildiği ortaya konmuştur. Artıran çevirici ile entegrasyonu yapılan bu algoritmaların dinamik tepkilerinde klasik yöntemlere kıyasla daha az dalgalanma gözlemlenmiş ve daha kısa sürede kararlılığa ulaşıldığı rapor edilmiştir. Bu durum, Incremental Conductance yönteminin gerçek zamanlı uygulamalar için uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir. Söz konusu yaklaşımın tasarımı yapılmış fotovoltaik DA-DA dönüştürücü sistemi üzerinde doğrulandığı Şekil 2' de görülmektedir [14].

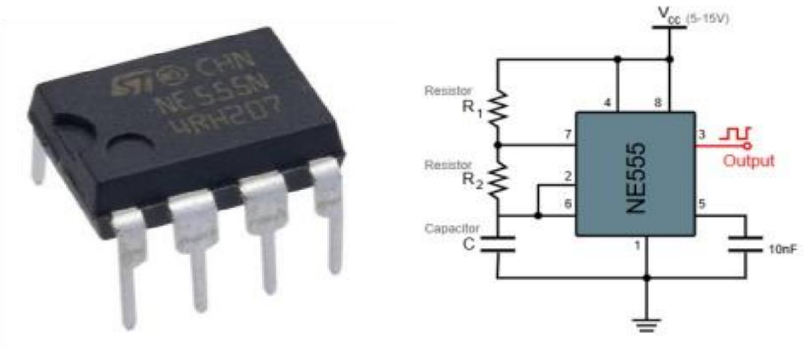


Şekil 2. Tasarımı yapılmış fotovoltaik DA DA dönüştürücü sistemi

Bu çalışmada, güneş paneli tabanlı bir sistemde maksimum güç noktasının donanım tabanlı yöntemlerle takip edilmesi hedeflenmiştir. MPPT kontrolü analog tabanlı bir yaklaşım ile uygulanmış ve düşük maliyetli, gerçek zamanlı bir DA-DA artırıcı dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin güneş enerjisinden maksimum verimle yararlanabileceğini göstermektedir. Bu özgün yaklaşım, özellikle otonom çizgi takip sistemlerinde güvenilir ve ekonomik bir enerji yönetimi sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen literatür çalışmaları doğrultusunda, benzer MPPT algoritmalarının MATLAB/Simulink ortamında uygulanabilirliği incelenmiş ve güneş enerjisinden verimli enerji elde etmenin önemi vurgulanmıştır [14]. Bu çalışma, söz konusu literatürle uyumlu olarak, donanım tabanlı bir çözüm sunarak enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından katkı sağlamaktadır.

2. Artıran Çevirici Sistemin Kurulumu

Bu çalışmada, güneş panelinden elde edilen düşük doğru gerilimi yükseltmek amacıyla donanım tabanlı bir DA-DA artıran (boost) dönüştürücü tasarlanmıştır. Devre, Şekil 3'te gösterilen NE555 zamanlayıcı entegresi kullanılarak kurulmuştur. Bu entegre DIP-8 veya SMD paketlerinde bulunur; iç yapısı iki komparatör, bir RS flip-flop, çıkış sürücü ve boşaltma transistöründen oluşur ve giriş sinyallerini karşılaştırarak zamanlama ve osilatör işlevini gerçekleştirir.



Şekil 3. NE555; paket ve içyapısı

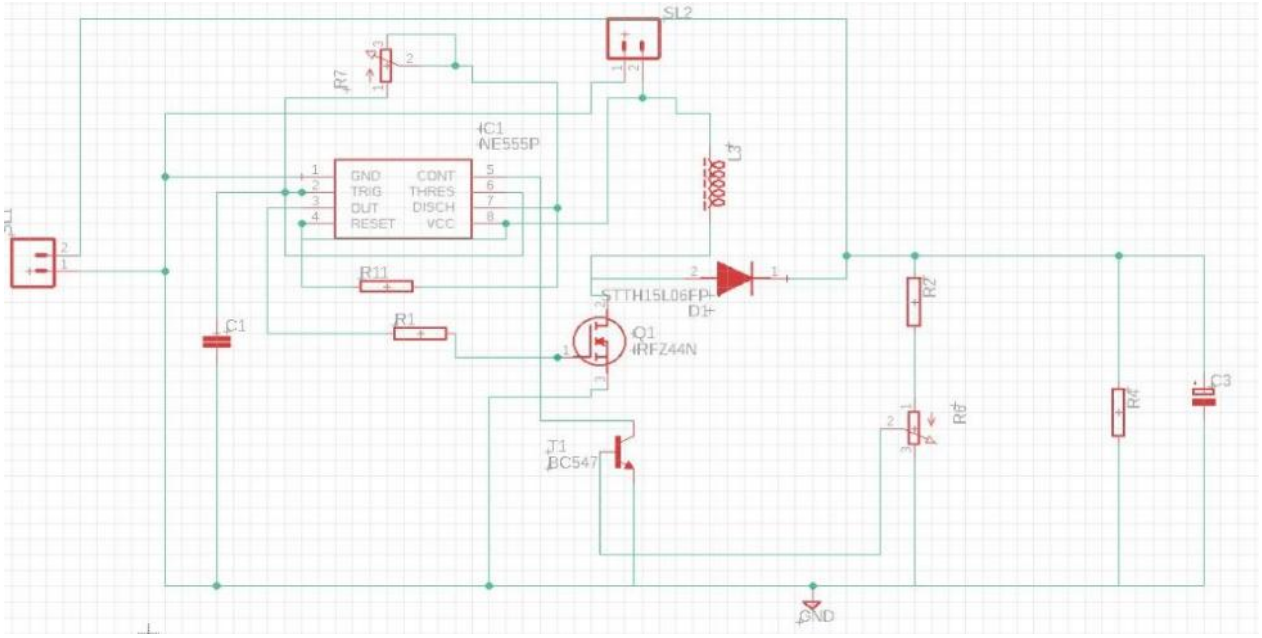
Sistem, mikro denetleyiciye ihtiyaç duymadan çalışmakta ve temel bir MPPT (Maximum Power Point Tracking) işlevini analog olarak gerçekleştirerek güneş panelinden elde edilen enerjinin verimli kullanılmasını sağlamaktadır.

2.1. PWM ve MOSFET Kontrolü

NE555 entegresi astable modda çalıştırılarak sabit frekanslı ve ayarlanabilir görev döngüsüne sahip PWM (Pulse Width Modulation) sinyali üretir. Bu sinyal, devrede anahtarlama elemanı olarak görev yapan IRFZ44N MOSFET'i tetikler [15]. MOSFET açıkken bobin üzerinde enerji birikir, kapandığında ise biriken enerji 15ETH06FP hızlı diyotu üzerinden çıkışa aktarılır. Çıkışta bulunan 2200 µF kapasitör, gerilimi filtreleyerek doğrusal ve sabit bir DA gerilim sağlar.

2.2. Gerilim Regülasyonu ve Enerji Depolama

Şekil 4'te verilen devrenin çıkış gerilimi, NE555'in 5 numaralı kontrol pinine bağlı BC547 transistörü aracılığıyla geri besleme ile kontrol edilmektedir. Bu donanım tabanlı yapı, çıkış gerilimini algılayarak görev döngüsünü değiştirir ve yazılım kullanılmadan gerilim regülasyonu sağlar [16]. MOSFET anahtarlama süresince bobin enerjiyi manyetik alan şeklinde depolar ve kesime geçtiğinde çıkışa aktarır. Bobin değeri ve PWM frekansı, enerji depolama ve aktarım süreçlerinde kritik rol oynar. IRFZ44N MOSFET'in yüksek akım taşıma kapasitesi ve düşük iletim direnci, devrenin güvenli ve verimli çalışmasını destekler. Devre, astable modda çalışan NE555 zamanlayıcı entegresi, IRFZ44N MOSFET, endüktans, hızlı anahtarlama diyodu, çıkış kondansatörü ve gerilim bölücü yapısından oluşmaktadır. Potansiyometre ile eşik değeri ayarlanarak çıkış kararlılığı artırılmakta ve düşük gerilimli bir kaynaktan daha yüksek ve sabit bir doğru gerilim elde edilmektedir. Bu tasarım sayesinde güneş panelinden elde edilen enerji maksimum verimle kullanılabilmektedir.



Şekil 4. NE555 zamanlayıcı entegresi ile oluşturulmuş geri beslemeli artıran çevirici devresi

2.3. Fotovoltaik Panel Karakteristikleri ve MPPT'ye Etkisi

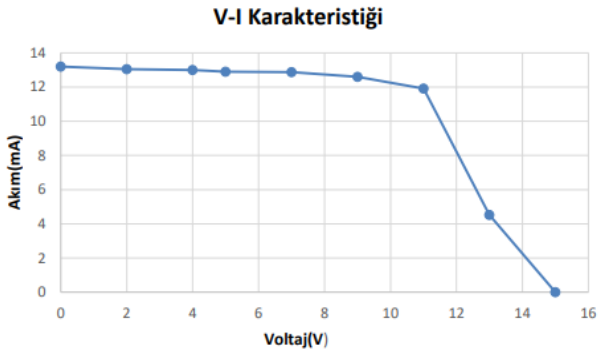
Fotovoltaik (PV) panellerin performansı, akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri ile belirlenir. Bu değerleri belirken kullanılan düzenek Şekil 5' te gösterilmektedir.

Şekil 5. Araç üzerinde ölçüm düzeneği

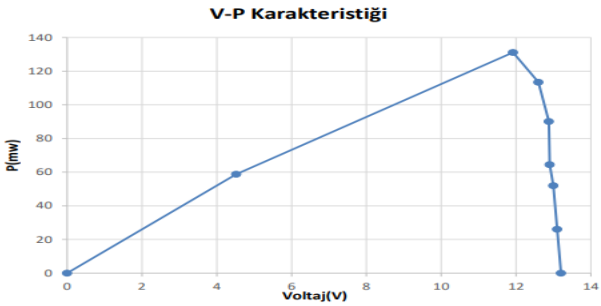
Şekil 6'da gösterilen I-V eğrisi, panelin düşük voltajlarda yaklaşık 13 mA sabit akım ürettiğini ve gerilime bağımlılığının çok az olduğunu göstermektedir. Gerilim arttıkça akım hızla düşmekte ve panel, açık devre gerilimine yaklaşırken güç çıkışı azalmaya başlamaktadır; bu eğri, panelin kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve maksimum güç noktası gibi kritik parametrelerin belirlenmesini sağlar. Şekil 7'de gösterilen P-V karakteristiği ise, panelin farklı yük koşullarında çıkış gücünün gerilime bağlı değişimini ortaya koyar. Güç, gerilim yaklaşık 11,9 V seviyesine ulaştığında maksimum değer olan P ≈ 131 m W'ı bulur ve bu nokta Maksimum Güç Noktası (MPP) olarak tanımlanır [17].

Bu karakteristikler, MPPT algoritmalarının uygulanması açısından kritik öneme sahiptir. I-V ve P-V eğrileri, panelin maksimum güç üreteceği gerilim ve akım seviyelerini göstererek sistemin bu noktaya yakın çalıştırılmasını sağlar [18].

Mevcut sistemde kullanılan artıran dönüştürücü ve gerilim kontrolü sayesinde panel çıkışı MPP civarında tutulmakta ve güç üretimi optimize edilmektedir. Böylece, değişen ışınım ve yük koşullarında enerji verimliliği artırılmakta ve PV sistemin performansı maksimuma çıkarılmaktadır.



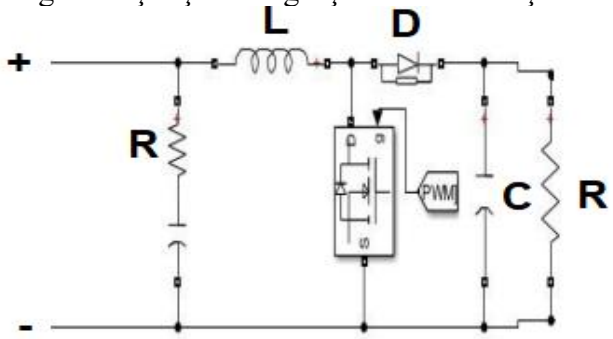
Şekil 6. PV modülünün V–I karakteristik eğrisi



Şekil 7. PV modülüne ait P-V karakteristik eğrisi

3. Artıran (Boost) Çeviriciler

Şekil 8' de artıran çevirici görülmektedir. Artıran çeviriciye ait teorik bilgiler ve devre şemaları burada ele alınacaktır. Bir DA gerilimi farklı bir DA gerilime dönüştüren DA-DA dönüştürücü denilir. Artıran dönüştürücü, çıkış gerilimi giriş geriliminden büyük olduğu DA-DA anahtarlamalı dönüştürücülerdir. Ayrıca step up converter (adım dönüştürücü) olarak da adlandırılırlar [19]. Giriş geriliminden daha büyük bir çıkış gerilimine sahiptirler. Devredeki giriş gücü ile çıkış gücü eşit olacağından çıkış akımı giriş akımından küçüktür [20].



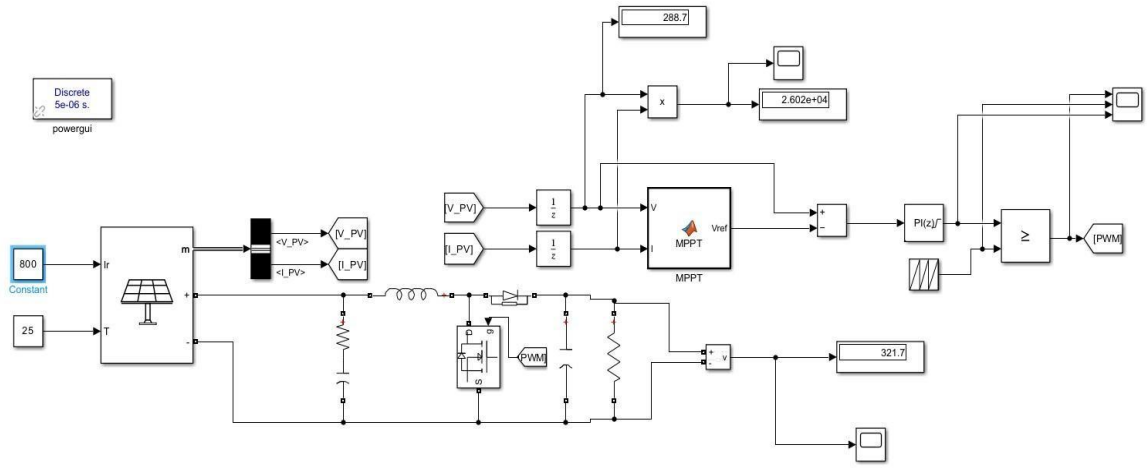
Şekil 8. Artıran çevirici devre şeması

Artıran dönüştürücülerdeki temel mantık, anahtarlama yaparak bir indüktörün manyetik alanı yok ederek mevcut değişliklere karşı koymasıdır. Anahtar kapatıldığında, akım indüktörden saat yönünde akar ve indüktör manyetik bir alan oluşturarak bir miktar enerji depolar. İndüktörün sol tarafının kutupsallığı pozitiftir [21]. Anahtar açıldığında, empedans daha yüksek olduğundan akım azalır. Yüke karşı akımı korumak için önceden yaratılmış olan manyetik alan yok edilecektir. Böylece polarite tersine dönecektir (yani indüktörün sol tarafı negatif olur). Sonuç olarak, iki kaynak seri halinde olacak ve kapasitörün D diyotu üzerinden şarj edilmesi için daha yüksek gerilim olacaktır.

Anahtarlama işlemi hızlı bir şekilde yapılırsa, indüktör şarj aşamaları arasında tamamen boşalmaz ve yük her zaman anahtar açıldığında giriş kaynağından daha büyük bir gerilim görülür. Ayrıca anahtar açıldığında, yüke paralel olarak kapasitör bu gerilime yüklenir. Anahtar kapatıldığında sağ taraf ve sol taraftan kısa devre yapıldığında, kondansatör yüke voltaj enerji sağlayabilir. Bu süre zarfında, blokaj diyotu, kapasitenin anahtardan boşalmasını önler. Anahtar, kapasitenin çok fazla boşalmasını önlemek için yeterince hızlı açılmalıdır.

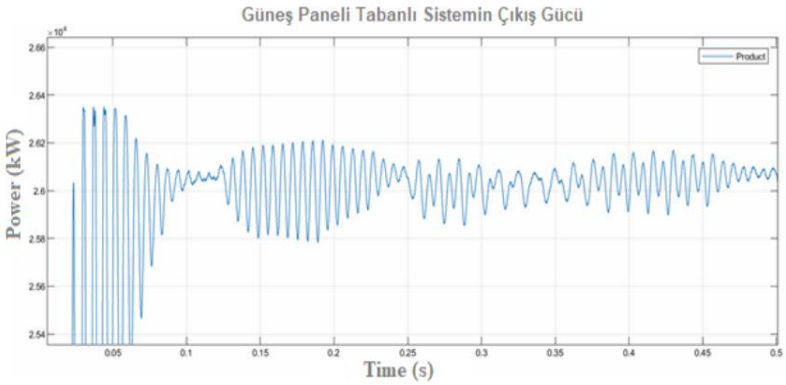
3.1. Benzetim Sonuçları

Önceki kısımda artıran çeviricinin genel yapısı açıklanmış, bu bölümde ise MATLAB/Simulink programı kullanılarak devre tasarlanacaktır. Bu tasarlanan devre Şekil 9'da, gösterilmiştir. Bu çalışmada giriş gerilimi güneş panelinden elde edilen doğru akım (DA) gerilimidir. Güneş panelinden alınan bu gerilim, artıran çevirici devresi aracılığıyla yükseltilerek çıkışa daha yüksek bir DA gerilim sağlanmaktadır. Artıran çevirici devresi, çıkış geriliminin istenen seviyede sabitlenmesi amacıyla bir PI (Oransal– Integral) denetleyici ile kontrol edilmektedir [22]. Şekil 9'un son kısmında, yükseltilmiş gerilimin çıkışa iletildiği ve yük üzerinde incelendiği gibi yapı yer almaktadır.



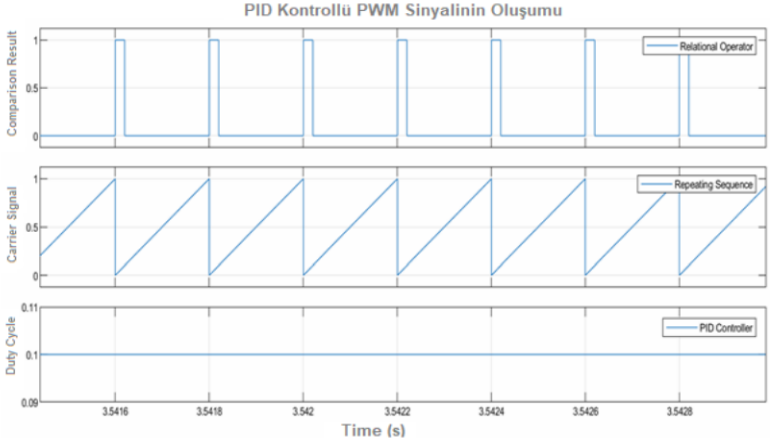
Şekil 9. Güneş panelinin MATLAB/Simulink'de sistemin modellenmiş hali

Daha sonra sistemin sonuçlarında, güneş panelinden elde edilen gerilim ve akım değerleri ışınım ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak analiz edilmiştir. MPPT algoritması, panelin anlık çıkış değerlerine göre referans gerilimi ve maksimum güç noktasını dinamik biçimde belirleyerek hızlıca izleme sağlamıştır. MPPT'nin belirlediği referans gerilim doğrultusunda çalışan artıran dönüştürücü, çıkış gerilimini yükseltmiş ve PI kontrolcü ile dalgalanmalar minimum seviyeye indirilmiştir. Şekil 10'da 800 W/m² ışınım ve 4 Ω yük altında elde edilen çıkış gücü ile sistemin kararlı çalıştığı görülmektedir.



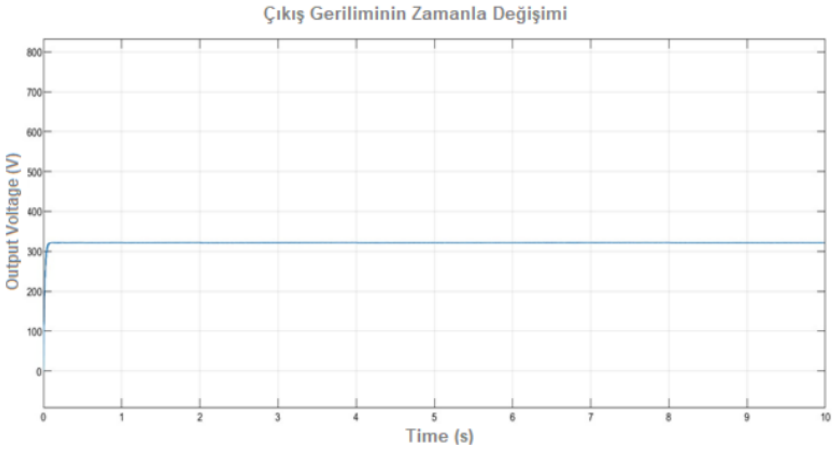
Şekil 10. 800 W/m² ışınım ve 4 Ω yük durumunda çıkış gücü

Ardından PWM üretim sürecinde, üçgen taşıyıcı sinyal (Repeating Sequence) ile PID kontrolcü çıkışı karşılaştırılarak anahtarlama sinyali elde edilmiştir. MPPT ve PI kontrolcü yardımıyla duty cycle dinamik olarak ayarlanmış ve çıkış gücü maksimize edilmiştir. Şekil 11'de taşıyıcı sinyal ile PID çıkışının karşılaştırılmasıyla üretilen PWM sinyali ve PID denetleyici çıkışı gösterilmektedir.



Şekil 11. 800 W/m² ışınım ve 4 Ω yük durumunda PWM üretim süreci ve doluluk oranı

Burada ise Şekil 12' de artıran dönüştürücü sayesinde çıkış gerilimi istenilen seviyeye yükseltilmekte ve zamanla daha kararlı hale geldiğini gösteren grafik bulunmaktadır.



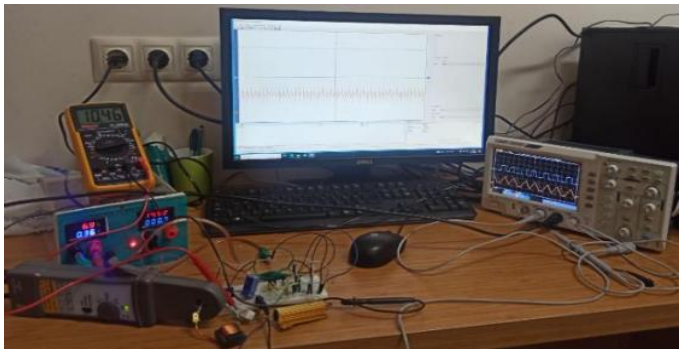
Şekil 12. 800 W/m² ışınım ve 4 Ω yük durumunda çıkış gerilimi.

4. NE555 Tabanlı Artıran Çevirici Tasarımı

Bu çalışmada kullanılan devre, NE555 entegresi tabanlı bir artıran çeviricidir. Artıran çeviriciler, giriş geriliminden daha yüksek bir çıkış gerilimi elde etmek için kullanılan anahtarlamalı güç kaynaklarıdır Şekil 13' te verilen görüntüler, bir elektronik devrenin üstten ve arkadan görünümünü göstermektedir. (a) kısımda, devrenin üst yüzeyi yer almaktadır. Burada bağlantı klemensleri, büyük elektrolitik kapasitör, dirençler, entegre (IC) ve potansiyometre gibi elemanlar montajlı şekilde görülmektedir. (b) kısımda ise aynı devrenin bakır yollarının yer aldığı arka yüzey gösterilmektedir. Burada yolların lehimlenmiş bağlantı noktaları net şekilde izlenebilmektedir. Devrenin ölçüm için kurulmuş ölçüm düzeneği Şekil 14'te sunulmaktadır.

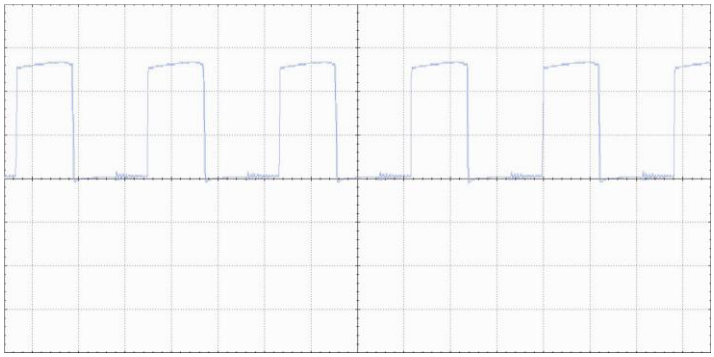
(a) (b)

Şekil 13. Tasarlanan devrenin; (a) önden ve (b) arkadan görüntüsü



Şekil 14. Artıran çevirici için ölçüm düzeneği

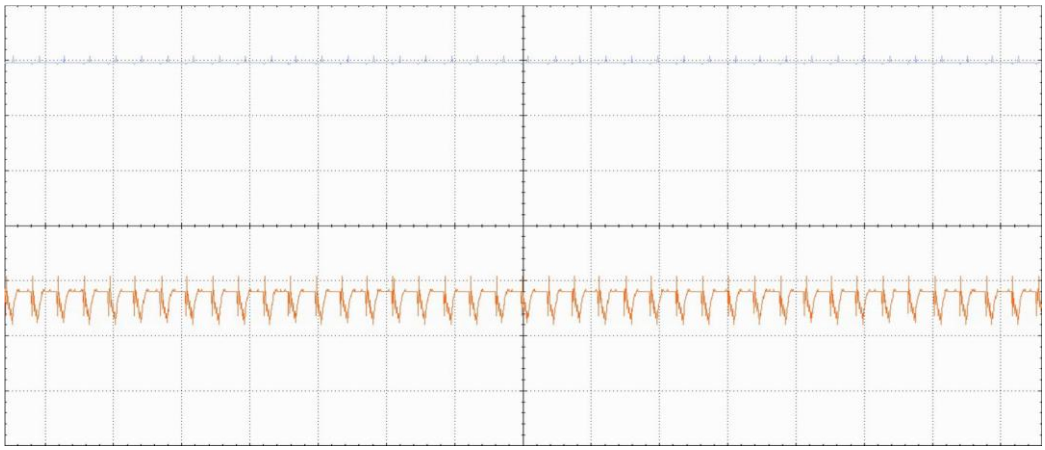
Bu kısımda, NE555 tabanlı artıran dönüştürücünün MOSFET'i sürmek için ürettiği PWM sinyalini göstermektedir. Ölçüm, serbest döngü diyotunun (STTH15L06FP) katot ucundan alınmış olup, sinyalin frekansı yaklaşık 10 kHz ve tepe-tepe genliği 5.60 V olarak ölçülmüş ve Şekil 15' te gösterilmektedir.



CH2 20 us 2.00V /1.0 Frequency:10.642 Hz Period:93.965 Ms PK-PK:5.60V

Şekil 15. NE555 Kontrollü artıran dönüştürücü devresinin PWM çıkış sinyali

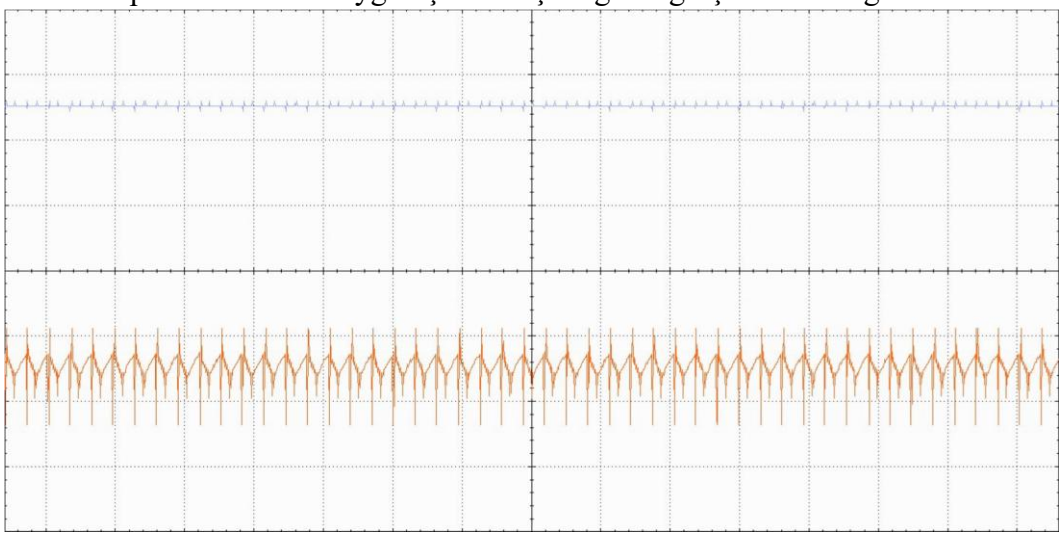
Şekil 16' da, artıran dönüştürücü devresinin giriş ve çıkış gerilimlerinin osiloskop üzerindeki dalga formlarını göstermektedir. CH3 (turuncu) kanalı giriş gerilimini (~5 V, 320 mV tepe-tepe), CH2 (mavi) kanalı ise çıkış gerilimini (~10 V, 4.40 V tepe-tepe) temsil etmektedir. Her iki kanal için frekans yaklaşık 6,4 kHz olup, bu değer NE555 entegresi ile üretilen PWM sinyalinin anahtarlama frekansıdır. Çıkışta gözlenen yüksek frekanslı gürültü, anahtarlama parazitleri ve yetersiz filtrelemeden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, devre girişteki 5 V'u alarak çıkışta ortalama 10 V'a yükseltmekte ve PWM tabanlı anahtarlama etkin şekilde çalışmaktadır.



CH3 500us 5.00V /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272 Us PK-PK:4.40V
CH2 500us 2.00V /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272 Us PK-PK:320mV

Şekil 16. Artıran dönüştürücünün giriş (CH3) ve çıkış (CH2) gerilim dalga şekilleri

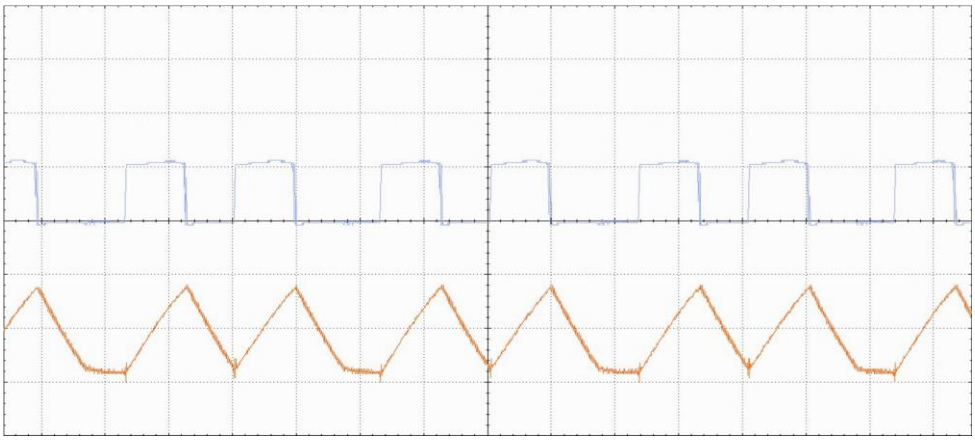
PWM tabanlı anahtarlamalı güç katının ölçülen gerilim ve akım dalga formları, CH2 (mavi) kanalında güç anahtarının sürme gerilimi (~7 V, kare dalga) ve CH3 (turuncu) kanalında akım ölçüm direnci üzerinden elde edilen akım (~360 mV tepe-tepe, üçgen dalga) olarak gözlemlenmiştir. Her iki kanalın frekansı yaklaşık 6,4 kHz olup, PWM anahtarlama frekansına karşılık gelmektedir. Elde edilen sonuçlar, devrenin PWM tabanlı anahtarlama prensibiyle verimli çalıştığını ve akımın kontrollü biçimde değiştiğini göstermektedir. Bu veriler doğrultusunda, güç katının tasarım parametrelerine uygun şekilde işlev gördüğü Şekil 17'de gösterilmektedir.



CH2 20 us 5.00V /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272 Us PK-PK:6.00V
CH3 20 us 200Mv /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272 Us PK-PK:360Mv

Şekil 17. PWM güç katı: anahtar sinyali (CH2) ve indüktör akımı (CH3) dalga şekilleri

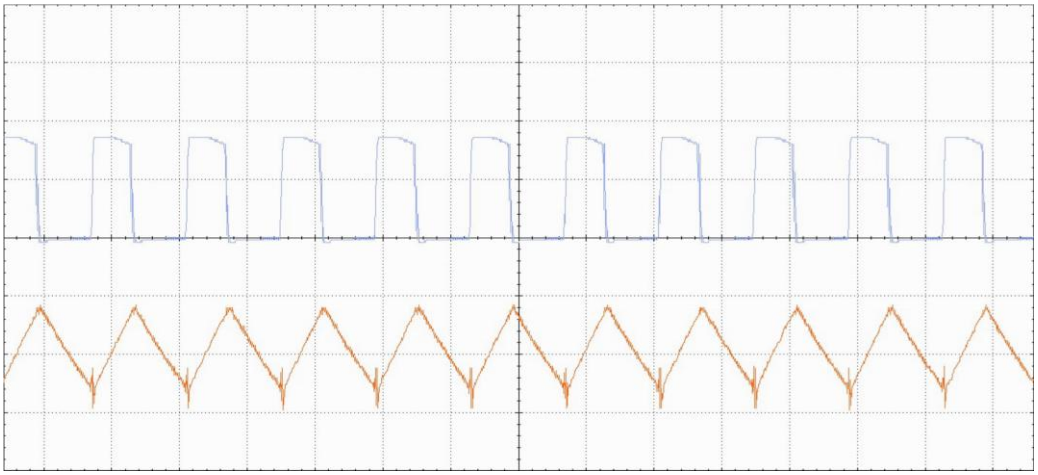
Şekil 18' de, artıran çeviriv, devresinin giriş ve çıkış gerilimlerinin osiloskop üzerindeki dalga formlarını göstermektedir. CH3 (turuncu) kanalı giriş gerilimini (~5 V, 7.40 V tepe-tepe) ve CH2 (mavi) kanalı çıkış gerilimini (~13 V, 800 mV tepe-tepe) temsil etmektedir. Her iki kanalın frekansı yaklaşık 6.399 kHz olup, NE555 entegresi ile üretilen PWM sinyalinin anahtarlama frekansına karşılık gelmektedir. Çıkışta gözlenen düşük genlikli dalgalanma, yeterli filtrelemenin sağlandığını göstermektedir. Sonuç olarak, devre girişteki 7 V'u başarılı bir şekilde yaklaşık 13 V'a yükseltmekte ve PWM kontrollü anahtarlama etkin şekilde çalışmaktadır.



CH2 50 us 5.00V /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272
Us PK-PK:800M vCH3 50 us 5.00V /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272 Us PK-PK:7.40V

Şekil 18. Artıran çevirici devresinin giriş (CH3) ve çıkış (CH2) gerilim dalga şekilleri

Şekil 16' da, PWM tabanlı güç katının ölçülen dalga formları gösterilmektedir. CH2 (mavi) kanalı güç anahtarının sürme gerilimini, CH3 (turuncu) kanalı ise akım ölçüm direnci üzerinden elde edilen akımı temsil etmektedir. CH2 kanalında yaklaşık 9 V tepe-tepe genliğe sahip 156,272 µs periyotlu bir PWM sinyali gözlemlenmiş ve anahtarlama frekansı 6,399 kHz olarak ölçülmüştür. CH3 kanalında ise akım yaklaşık 180 mV tepe-tepe genlikte ve PWM frekansında değişen üçgensi bir dalga göstermektedir. Bu sonuçlar, güç katında PWM tabanlı anahtarlamanın başarıyla uygulandığını ve devrenin tasarım parametrelerine uygun çalıştığını doğrulamaktadır.



CH2 10 us 5.00V /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272 Us PK-PK:9.00V
CH3 10 us 100Mv /1.0 Frequency:6.399 kHz Period:156.272 Us PK-PK:180Mv

Şekil 16. PWM güç katı: anahtar sinyali (CH2) ve indüktör akımı (CH3) dalga şekilleri

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, güneş enerjisiyle çalışan donanım tabanlı bir MPPT kontrollü artıran çevirici devresi tasarlanmış ve başarıyla uygulanmıştır. NE555 tabanlı PWM kontrol ile devre, mikro denetleyiciye ihtiyaç duymadan çıkış gerilimini kararlı şekilde sabit tutmaktadır. Prototip önce breadboard üzerinde test edilmiş ve PCB tasarımı gerçekleştirilmiş olup, ölçümler sistemin hedeflenen çıkış gerilimini sağladığını ve enerji kaybının minimum olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, düşük maliyetli donanım tabanlı MPPT sistemlerinin güneş enerjisi uygulamalarına etkin şekilde entegre edilebileceğini ve farklı uygulamalara uyarlanabileceğini ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda, sistem veriminin artırılması için MPPT algoritmalarının mikro denetleyici tabanlı uygulamaları ve farklı algoritmaların performans karşılaştırmaları önerilmektedir.

6. Kaynaklar

1. Altın,V. "Güneş enerjisinden yararlanılarak elektrik üretimi," Mimar ve Mühendis Dergisi, 33: 28–31, **2004.**
2. Doğan E. and Karakılçık Y., Türkiye'de güneş panellerinden enerji üretimi: Konya ili üzerine bir değerlendirme, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi, **2024**, 26(46):471–485,
3. Doğan, M. Güneş enerjisi santrallerinin incelenmesi ve verimlilik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, **2019**.
4. Yılmaz A., Güneş Enerjisiyle Çalışan Araçlarda Batarya Şarjı İçin Artıran Çevirici, B.Sc. Thesis, Recep Tayyip Erdoğan University, June **2025.**
5. Öztürk H. H. and Kaya D, Güneş enerjisi elektrik üretimi: Fotovoltaik teknoloji, 1st ed., Umuttepe Yayınları, Yayın No: 97, **2013**, 47–371.
6. Karamanav M., Güneş enerjisi ve güneş pilleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Bilgisayar Eğitimi, **2007.**
7. Gibilisco,S. The Illustrated Dictionary of Electronics, 547th ed., McGraw-Hill Companies, **2001**, ISBN: 0-07-137259-9.
8. Şahin M. E., An efficient solar-hydrogen DC-DC buck converter system with sliding mode control, El-Cezeri, **2019,** 6(3):558–570.
9. Bayrak, G., & Cebeci, M., 3.6 kW gücündeki fotovoltaik generatörün MATLAB Simulink ile modellenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, , **2012,** 28(3):198–204**.**
10. Aydoğdu, Ö., et al. PIC tabanlı fırçasız DC motor sürücüsü tasarımı. Selçuk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, **2008.**
11. Ortiz, D. A. T., et al. Performance analysis of a battery charger with BQ24650. In 2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI) (ss. 1–5). IEEE. (Kosta Rika), **2016.**
12. Yap, K. Y., Sarimuthu, C. R., & Lim, J. M.-Y. Artificial intelligence based MPPT techniques for solar power system: A review. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, **2020.**8(6), 1043–1059,
13. Hashim N., Jusoh A., Salam,Z. and Isa N. M., DC-DC boost converter design for fast and accurate MPPT algorithms in stand-alone photovoltaic system, Int. J. Power Electron. Drive Syst. (IJPEDS), **2018,** 9(3):1038–1045.
14. Akın E. and Şahin, M. E. Investigation of Incremental Conductance MPPT Algorithm in MATLAB/Simulink Using Photovoltaic Powered DC-DC Boost Converter, *in* 2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee), Türkiye, **2023,** pp. 1–6,

15. Özer T. and Kaboğlu, A. Gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü tasarımı ve uygulaması, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, **2023**, 13(3):pp. 566–579.
16. Özdemirel B., Ses ötesi kabarcık rezonansına dayanan elastomer eyleyici, Proje, **2015.**
17. Akın E. and Şahin,M. E., Derin öğrenme ve yapay sinir ağı modelleri üzerine bir inceleme, EMO Bilimsel Dergi, **2024**,14(1):27–38,
18. Şahin M. E., Okumuş H. I., and Kahveci H., Sliding mode control of PV powered DC/DC Buck-Boost converter with digital signal processor, in 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), **2015**, pp. 1–8, IEEE.
19. Şahin M. E and Blaabjerg,F., PV powered hybrid energy storage system control using bidirectional and boost converters, Electric Power Components and Systems, **2022,** 49(15): 1260–1277.
20. Zhang G. et al., A 3-Z-network boost converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **2014.** 62(1): 278–288,
21. Hasaneen B. M. and Elbaset Mohammed, A. A., Design and simulation of DC/DC boost converter, in 2008 12th International Middle-East Power System Conference, **2008,** pp. 335–340, IEEE.
22. Şahin M. E. and Okumuş, H.I. Modeling and Simulation of Solar Cell Module in MATLAB/Simulink, EMO Bilimsel Dergi, **2013,** 3(5):17–25,

ASSEMBLY LINE BALANCING USING THE BEES ALGORITHM IN A MOBILE CRANE MANUFACTURING

Sedat ACAR [1], Mete KALYONCU [2]

[1] MPG Machinery Production Group Inc. Co., KONYA/TURKIYE
[2] Mechanical Engineering, Konya Technical University, KONYA/TURKIYE

Abstract

In modern manufacturing environments, achieving efficient production line performance is critical for enhancing productivity, reducing operational costs, and ensuring timely delivery. One of the major challenges in this context is the effective balancing of workloads across workstations while simultaneously optimizing workforce allocation. This study presents a comprehensive approach that integrates a biologically inspired metaheuristic method the Bees Algorithm to address the assembly line balancing and workforce optimization problem in a real-world industrial setting. The proposed methodology focuses on minimizing workstation idle times, evenly distributing workloads, and reducing the total production time. Unlike conventional mathematical programming techniques, which often become computationally expensive in large and complex scenarios, the Bees Algorithm provides a flexible and scalable solution by mimicking the natural foraging behavior of honey bees. In the algorithm, worker, observer, and scout bees collaboratively explore the solution space to iteratively improve task assignments. A case study was conducted in a mobile crane manufacturing facility. The results demonstrate that the proposed method effectively balances workloads across stations, ensures a more even distribution of task durations, and significantly reduces idle times. In particular, idle time was completely eliminated in one workstation, while the total idle time across the entire line was reduced to 3.3 hours. This reflects a considerable improvement in production efficiency. Beyond demonstrating the applicability of the Bees Algorithm in a complex industrial environment, this study also provides a practical framework for workforce optimization that can be adapted to various production systems. The findings highlight the importance of hybrid techniques that combine algorithmic intelligence with real-world constraints, paving the way for more responsive, efficient, and sustainable manufacturing strategies.

Keyword: Optimization, Assembly Line Balancing, The Bees Algorithm, Precedence Matrix, Production Scheduling, Mobile Crane Production.

1. Introduction

Assembly lines are the backbone of mass production systems, enabling industries to achieve high efficiency, consistent quality, and reduced costs. By structuring complex production processes into sequential and interdependent tasks, they allow manufacturers to meet growing market demands while maintaining productivity. However, as product diversity increases and competition intensifies, the challenge of ensuring balanced workloads across workstations becomes even more critical. When an assembly line is unbalanced, it results in bottlenecks, excessive idle times, and reduced throughput, which can severely impact overall system performance.

The Assembly Line Balancing Problem (ALBP) emerges from this challenge, representing a well-known combinatorial optimization problem that has been widely studied in both academia and industry. Traditional methods, such as integer programming or linear optimization, can provide exact solutions for small-scale problems. Yet, in real-world applications where the number of tasks and constraints grows significantly, these methods become computationally infeasible. This gap has led to the increasing use of heuristic and metaheuristic algorithms, which are capable of generating near-optimal solutions within reasonable computational times. [1]

Recent advances in manufacturing technologies, particularly within the Industry 4.0 framework, have further complicated the balancing process. Today's assembly lines often operate under conditions such as mixed-model production, resource constraints, and the integration of human–robot collaboration. These additional requirements demand more sophisticated optimization approaches, as conventional methods alone cannot effectively address such complexities. In this context, swarm intelligence and evolutionary algorithms have gained popularity due to their adaptability and robustness in dynamic environments. [2]

Among these techniques, bio-inspired approaches such as The Bees Algorithm stand out for their ability to balance global exploration with local search. Mimicking the foraging behavior of honey bees, The Bees Algorithm can effectively search large solution spaces while avoiding premature convergence to suboptimal solutions. This makes it particularly suitable for complex optimization tasks like assembly line balancing, where the number of possible task assignments grows rapidly with system size. [3]

Despite the growing body of research, most applications of such algorithms remain within simulated environments or rely on benchmark datasets. Studies that apply swarm intelligence-based methods directly to real industrial settings are still relatively limited. This highlights the need for research that not only develops advanced algorithms but also validates their effectiveness in real-world scenarios, especially in heavy manufacturing environments such as the mobile crane industry. [4]

The Assembly Line Balancing Problem has been studied extensively over the last decades, with contributions focusing on models, solution methods, and practical applications. Boysen, Fliedner, and Scholl (2008) provided one of the most comprehensive early reviews, analyzing different ALBP formulations and their suitability under varying industrial conditions. More recently, Boysen, Schulze, and Scholl (2022) revisited the field to evaluate developments in the past fifteen years, highlighting the shift toward more integrated and resource-constrained balancing approaches.

Exact mathematical models have long served as the foundation of ALBP research. Akpınar and Baykasoğlu (2014) proposed a mixed-integer linear programming model for mixed-model lines with setups, demonstrating the challenges of scalability when applied to real production systems. Similarly, Cakir et al. (2011) addressed stochastic assembly line balancing through a hybrid simulated annealing algorithm, emphasizing the role of uncertainty in task times. These works underline the limitations of exact approaches in large-scale, dynamic environments and the corresponding need for metaheuristics.

Metaheuristic algorithms have been widely applied due to their efficiency in exploring large solution spaces. For instance, Delice et al. (2017) introduced a modified particle swarm optimization (PSO) for two-sided U-type lines, achieving significant improvements in balancing performance. Likewise, Abdullah Make and Ab Rashid (2022) proposed a modified PSO under resource constraints, showing how adaptations of classical metaheuristics can address real industrial needs. Bee-inspired methods, including those by Özbakır and Tapkan (2011), and Tapkan, Özbakır, and Baykasoğlu (2012), have also been shown to perform effectively in balancing constrained and two-sided lines.

The application of line balancing techniques to specific industries further supports their practicality. Bongomin et al. (2020) improved garment assembly efficiency using balancing methods, while Kayar and Akalın (2016) compared heuristic and simulation approaches for apparel production lines. These studies emphasize that the choice of algorithm often depends on the industrial context, complexity of tasks, and production objectives.

In addition, newer approaches increasingly focus on human–robot collaboration and sustainability. Çil et al. (2020) proposed bee algorithm-based models for balancing collaborative human–robot lines, reflecting the impact of automation and Industry 4.0 requirements. Calzavara et al. (2022) extended this perspective by integrating line balancing with material feeding strategies, showing how balancing is linked to broader production planning.

Taken together, the literature demonstrates a clear progression: from exact models toward metaheuristic and hybrid approaches, and from simple single-model problems toward complex, resource-constrained, and collaborative environments. Within this trajectory, The Bees Algorithm emerges as a promising method due to its adaptability, robustness, and natural suitability for large-scale, real-world assembly line problems.

2. Materials and Methods

One of the primary objectives of manufacturing processes is to produce goods in a rapid and efficient manner. The efficiency of production lines directly affects both time and resource utilization, thereby enhancing the competitiveness of enterprises. However, the inherent complexity of production lines and the necessity of balancing workloads make optimization indispensable. Production line optimization ensures that all tasks within the process are planned in the most effective way and that resources are utilized efficiently. This, in turn, reduces operational costs and enables companies to meet customer demands on time. [1]

The efficiency of a production line depends on several factors, including the balanced distribution of workloads across stations, the minimization of idle times, and the appropriate sequencing of tasks within each station. Imbalances in production lines not only reduce efficiency but also extend

delivery times, negatively affecting customer satisfaction. Thus, production line optimization not only increases production speed but also prevents waste and contributes to improved product quality.

The Bees Algorithm has emerged as an effective method for production line optimization. This metaheuristic algorithm mimics the foraging behavior of bees to identify optimal solutions. At its core, the algorithm aims to assign tasks to workstations in the most efficient manner, thereby enhancing the overall performance of the production process. Through The Bees Algorithm, workload balance is achieved, inefficiencies across stations are eliminated, and total production time is minimized. [3]

Another significant benefit of production line optimization lies in resource efficiency. By achieving the targeted production volume, unnecessary resource consumption is avoided, and the environmental impact of operations is reduced. Furthermore, an optimized production line increases flexibility, enabling rapid responses to sudden changes and varying customer demands. As a result, production costs are reduced while maintaining a competitive advantage in the marketplace.

In this study, the application of The Bees Algorithm to production line optimization is investigated, with a particular focus on its advantages. The aim is to eliminate inefficiencies in the production process, improve overall productivity, and contribute to achieving a sustainable manufacturing structure.

The objective function of the problem is to minimize the total idle time of all workstations, as defined in Equation (1). The following equations define the problem constraints. Equation (2) ensures that each task is assigned exactly once to a workstation. Equation (3) requires that the total workload of each workstation does not exceed the cycle time. Equation (4) enforces precedence constraints between tasks. The last two constraints define the decision variables as binary.

Objective Function:

$$min\left(\sum_{m}^{M}(C - WT_m)\right) \tag{1}$$

Constraints:

$$\sum_{m}^{M} x_{mi} = 1 \qquad \forall i = 1,2,\dots,I \tag{2}$$

$$WT_m = \sum_{i}^{I} x_{mi} t_i \leq C \qquad \forall m = 1,2,\dots,M \tag{3}$$

$$\sum_{m}^{M} m \times x_{mi} \leq \sum_{m}^{M} m \times x_{mj} \qquad \begin{matrix} \forall P_{ij}=I \\ \forall i = 1,2,\dots,I \\ \forall m = 1,2,\dots,M \end{matrix} \tag{4}$$

$$x_{mi} \in \{0,1\} \qquad \begin{matrix} \forall i = 1,2,\dots,I \\ \forall m = 1,2,\dots,M \end{matrix} \qquad (5)$$

$$P_{ij} \in \{0,1\} \qquad \begin{matrix} \forall i = 1,2,\dots,I \\ \forall j = 1,2,\dots,I \end{matrix} \qquad (6)$$

The optimization of the assembly line problem in this study was conducted using The Bees Algorithm, a population-based metaheuristic inspired by the foraging behavior of honeybees. Similar to other swarm intelligence methods, The Bees Algorithm relies on the cooperative search of multiple agents, where each bee represents a candidate solution to the problem. The fundamental idea is that scout bees explore the search space randomly, while recruited bees exploit promising regions around elite solutions, gradually improving the allocation of tasks to workstations [5].

In this framework, each candidate solution is represented as a two-dimensional array corresponding to the assignment of tasks across workstations. Each row of the array denotes a workstation, and each column corresponds to a task. The presence of a task in a workstation is indicated by a binary decision variable. This structure allows the algorithm to simultaneously evaluate workload balance, precedence constraints, and idle time minimization. The overall quality of a solution is assessed by the fitness function defined earlier in Equation (1).

The algorithm begins with the initialization of a population of scout bees, each generating a random solution that satisfies basic task assignment rules. The fitness of these initial solutions is evaluated, after which a subset of elite and best solutions is identified. Around these promising solutions, additional bees are recruited to perform local search using neighborhood operators. These operators involve task swapping, insertion, or reallocation between workstations, aiming to enhance workload distribution while respecting precedence rules. [6]

To ensure feasibility, a resequencing mechanism is applied to all candidate solutions. Resequencing checks whether the precedence relationships between tasks are violated. If violations occur, tasks are systematically shifted to downstream stations until the precedence constraints are satisfied. This step guarantees that all solutions remain feasible throughout the optimization process.

Another critical step in the algorithm is the tuning process, which improves workload balance by transferring tasks between overloaded and underloaded workstations. For example, when a station exceeds the upper limit of the cycle time, a task is transferred to a less-loaded workstation, provided that precedence is not violated. This iterative adjustment reduces cycle time variance across stations and improves balance efficiency.

The search process continues through repeated iterations, where scout bees explore new regions of the solution space, while recruited bees intensify the search around elite and best solutions. The stopping criterion is set either as a maximum number of iterations or convergence to a stable fitness value.

One of the strengths of The Bees Algorithm is its flexibility in addressing multi-objective formulations. In assembly line balancing, objectives often include minimizing idle time, reducing the number of stations, and improving line efficiency simultaneously. By employing a weighted

fitness function, the algorithm is capable of handling multiple objectives in a single framework [7].

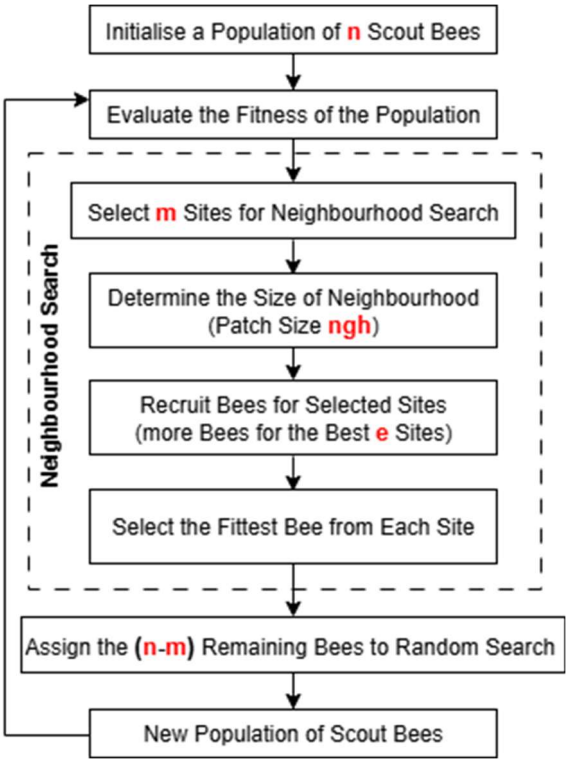


Figure 1. Flowchart of the Bees Algorithm

In this study, the Bees Algorithm which is a meta-heuristic optimization algorithm, is used to solve the optimization problem. It was first developed by Pham et al. In 2006, Bees Algorithm is a swarm intelligence-based screening algorithm that mimics the resource search behavior of honey bees (nectar, water, etc.) [13-21]. The block diagram of the Bees Algorithm is shown in Figure 2. The Bees Algorithm includes a number of parameters that need to be adjusted during optimization. These are the number of optimal screening areas selected from n visited points (m), the number of scout bees (n), the number of bees sent to the best screening area (nep), the number of elite screening areas within the selected m screening area (e), the number of bees sent to the remaining (m-e) screening area (nsp), the size of the screening area (ngh), and the number of iterations accepted as the stopping criterion (itr). The optimization problem starts with sending n random scout bees to the screening area. In the second stage, the suitability of the points scanned by the scout bees is evaluated. In the third stage, m scan area with more suitable values is selected from n scan area. In the fourth and fifth steps, elite scan areas (e) with the best suitability value and scan areas (m-e) within m scan area are selected. Neighborhood scan size (ngh) is defined for these areas. In the selected scan areas, more follower bees (nep) are sent to the best scan area e, which is a more promising solution compared to other selected scan areas, while a more detailed search is performed by sending fewer follower bees (nsp) to other scan areas. The bee with the most suitable value is selected in each scan area. In the sixth, seventh and eighth steps, other bees except the bee with the most suitable value for each scan area are separated from the scan area. Other bees in the swarm (n-m) are sent to the random scan area again to obtain new potential solutions. The

process continues until the optimization stopping criterion (itr) is met. After each iteration, a new swarm consists of representatives from each selected scan area and randomly scanning scout bees.

The parameters of the Bees Algorithm used in optimization studies are given in Table 1.

Table 1. Parameters of the Bees Algorithm

n	m	e	nep	nsp	ngh	itr
30	20	4	9	5	0.02	450

To validate the applicability of the proposed approach, an optimization study was conducted on the production process of a mobile crane manufacturer. The case study focused on a production line consisting of 19 operations related to key subassemblies of the crane, carried out across six workstations. The processing times of these operations are presented in Table 2, which provides the quantitative basis for computing station workloads and the line cycle time within the optimization procedure.

Table 2. Operations and Processing Times

Operation No	Operation Name	Processing Time (hours)
1	Leg Extension Boom Welded Assembly Operation 1	4,8
2	Leg Extension Boom Linear Welding	12
3	Leg Extension Boom Robotic Welding Operation 1	6
4	Leg Extension Boom Welded Assembly Operation 2	6,4
5	Leg Extension Boom Robotic Welding Operation 2	12
6	Leg Extension Boom Manual Welding	14
7	Chassis Welded Assembly Operation 1	9
8	Chassis Manual Welding Operation 1	7,5
9	Chassis Robotic Welding Operation	12
10	Leg Extension Outer Boom Welded Assembly Operation 1	5
11	Leg Extension Outer Boom Linear Welding	4
12	Leg Extension Outer Boom Robotic Welding Operation 1	2
13	Leg Extension Outer Boom Welded Assembly Operation 2	6
14	Leg Extension Outer Boom Robotic Weldzing Operation 2	6
15	Additional Chassis Welded Assembly Operation 1	6
16	Additional Chassis Robotic Welding	2
17	Additional Chassis Welded Assembly Operation 2	1
18	Additional Chassis Manual Welding	4
19	Chassis Manual Welding	9

The precedence relationships among the 19 operations are summarized in Table 3, which represents the priority matrix of the case study. Within the assembly line balancing literature, the precedence matrix is regarded as a fundamental representation tool that formally encodes technological and logical task dependencies. This structure ensures that the sequencing of operations complies with process constraints while providing a transparent and standardized basis

for optimization modeling. The precedence matrix not only guarantees feasibility in line balancing problems but also facilitates the integration of heuristic and metaheuristic approaches by clearly defining permissible task orders. In the context of the present study, Table 3 plays a critical role, as it provides the Bees Algorithm with the necessary structural information to generate balanced and feasible task allocations across the six workstations. [1-10].

Table 3. Priority Matrix

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3. Results and Discussion

The proposed Bees Algorithm was applied to the case study of a mobile crane manufacturing line, which included 19 operations distributed across six workstations. The optimization problem was defined with the objective of minimizing total idle time while ensuring balanced utilization of all stations under precedence constraints. The results are presented in Tables 4–6, while a comparative graphical analysis of the three solutions is provided in Figure 3.

The analysis revealed that the maximum processing time occurred at Workstation 1 with 891 minutes, which defined the cycle time of the line. Although this station operated at full capacity, other stations displayed varying degrees of idle time. In particular, Workstation 5 showed the highest idle time of 231 minutes, while Workstations 6, 7, and 8 exhibited idle times of 41, 51, and 31 minutes, respectively. The total idle time across all stations amounted to 388 minutes, representing a significant improvement compared to the unoptimized state of the line. These results indicate that the proposed method successfully redistributed workloads to achieve a more uniform balance.

This arrangement allocated workloads fairly equally across stations. Workstations 1 and 2 ran very near the cycle time with 21.8 and 21.4 hours of processing, respectively. The maximum imbalance was small, with Workstation 5 attaining full utilization with no idle time, while other stations' idle times were 0.2 to 1.0 hours. This means that the Bees Algorithm was effective at reducing idle capacity at no cost in precedence feasibility.

Table 4. First Solution

Station ID	Assigned Operations	Total Processing Time	Idle Time
1	1 2 10	21,800	0,200
2	3 4 15 16 17	21,400	0,600
3	5 7	21,000	1,000
4	6 8	21,500	0,500
5	9 11 12 18	22,000	0,000
6	13 14 19	21,000	1,000
	Total	**128,700**	**3,300**

Total idle time was the same, but it was concentrated more at Workstation 5 (2.0 hours). By contrast, Workstations 1 and 4 were utilized fully, working precisely at cycle time. The solution here proves that the Bees Algorithm is able to create variable allocation patterns, generating different trade-offs with the same overall efficiency. Practically, such variability is able to deliver different feasible scheduling options to production managers based on operator availability or constraints of a certain resource.

Table 5. Second Solution

Station ID	Assigned Operations	Total Processing Time	Idle Time
1	7 10 15 16	22,000	0,000
2	1 2 11 17	21,800	0,200
3	3 4 8 12	21,900	0,100
4	5 13 18	22,000	0,000
5	6 14	20,000	2,000
6	9 19	21,000	1,000
	Total	**128,700**	**3,300**

This arrangement provided the most balanced workflow distributions, with three stations (1, 4, and 6) operating at near cycle time, while other stations experienced idle times of 0.5 and 1.0 hours. This is the most balanced of solutions with minimal fluctuations across stations. The even utilization of multiple workstations provides evidence of the powerful ability of the Bees Algorithm to accommodate the structure of precedence and time variations.

Table 6. Third Solution

Station ID	Assigned Operations	Total Processing Time	Idle Time
1	1 10 11 15 16	21,800	0,200
2	2 3 12 17	21,000	1,000
3	4 7 13	21,400	0,600
4	5 14 18	22,000	0,000
5	6 8	21,500	0,500
6	9 19	21,000	1,000
	Total	**128,700**	**3,300**

A graphical representation of station activity (Figure 3) confirmed that the distribution of task durations was significantly smoothed compared to the initial configuration. While the first three workstations approached the cycle time closely, the remaining stations carried relatively lighter workloads, suggesting potential for further fine-tuning. Nevertheless, the overall reduction of idle time clearly demonstrates the effectiveness of The Bees Algorithm in balancing workloads and minimizing inefficiencies in the assembly process.

While the Bees Algorithm, all produced the same total idle time, they have different internal patterns of distribution, which may be significant in practical applications. When bottlenecks are caused by operators' skill levels, workstation configuration, or equipment measures, one solution versus another directly impacts productivity and ergonomics. The Bees Algorithm's capability of generating several high-quality solutions increases managerial flexibility and facilitates decisions regarding production scheduling.

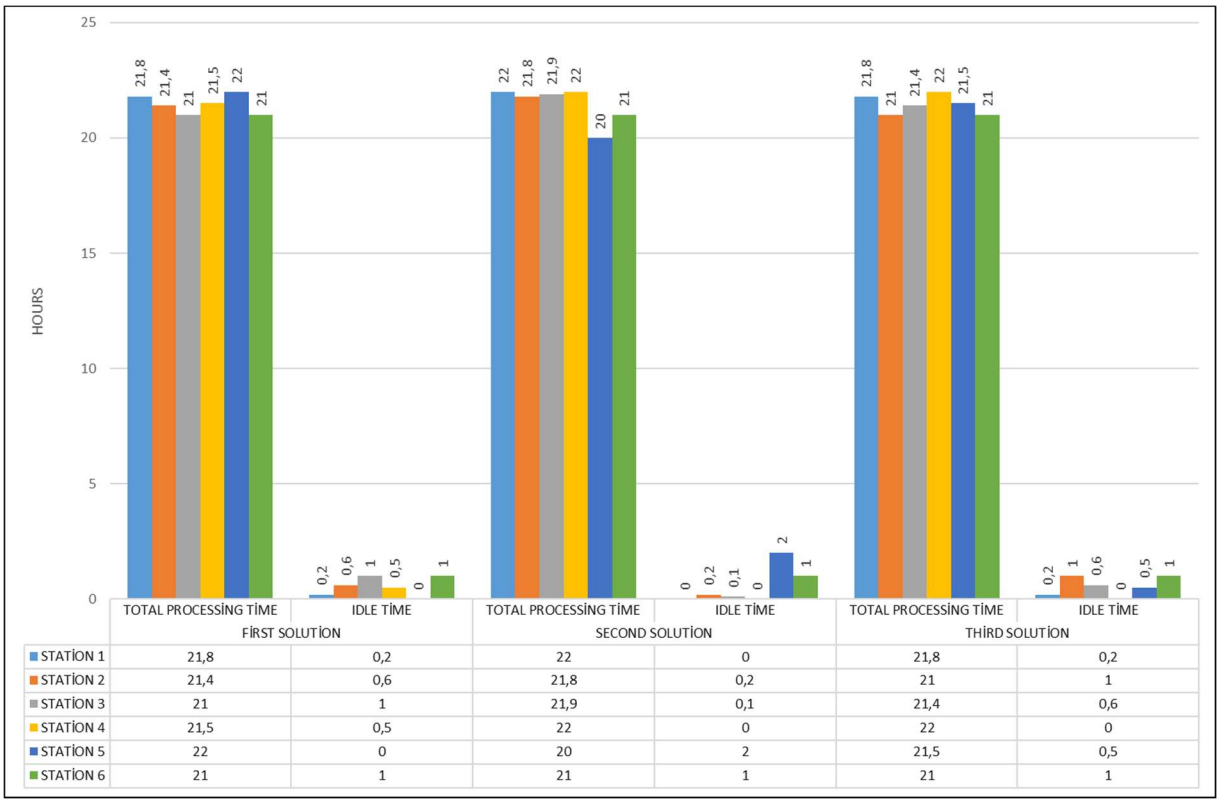


Figure 2. Activity graph of stations

The comparative results are also presented in Figure 3, which graphically illustrates the processing and idle times of each workstation. The figure indicates that, compared to the unoptimized configuration, the workload has become significantly more balanced. Although minor idle times remain, the overall structure ensures that no workstation is critically underutilized, thereby preventing potential bottlenecks.

In summary, the Bees Algorithm provided a more balanced distribution of tasks across the six workstations, effectively minimizing idle times and achieving a cycle time consistent with production requirements. The combination of Tables 4–6 and Figure 3 demonstrates the practical improvements delivered by the optimization process, confirming the algorithm's capability to enhance assembly line performance under real-world industrial conditions.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to MPG Machinery Production Group Inc. for their valuable support and for providing the industrial data used in this study. Special appreciation is also extended to Konya Technical University for their academic guidance and collaboration throughout the research process.

References

1) Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? International Journal of Production Economics, 111(2), 509–528.

2) Çil, Z., Tapkan, P., & Şahin, Y. (2020). A hybrid bees algorithm approach for assembly line balancing problems. Expert Systems with Applications, 160, 113704.

3) Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. (2006). The Bees Algorithm – a novel tool for complex optimisation problems. In Proc. 2nd Int. Conference on Intelligent Production Machines and Systems 454–459.

4) Delice, Y., Ayca, E., Mutlu, M., & Özcan, E. (2017). A modified particle swarm optimization algorithm to mixed-model two-sided assembly line balancing. Journal of Intelligent Manufacturing, 28(1), 23–36.

5) Baykasoğlu, A., & Dereli, T. (2007). Simple and U-type assembly line balancing by using an ant-colony based algorithm. Mathematical and Computational Applications, 14(1), 1–12.

6) Akpınar, S., & Bayhan, G. M. (2011). A hybrid genetic algorithm for mixed-model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 24(3), 449–457.

7) Tapkan, P. Z., Özbakır, L., & Baykasoğlu, A. (2012). Bee colony intelligence in solving assembly line balancing problems. Applied Soft Computing, 12(11), 3340–3351

8) Saif, U., Guan, Z., Zhang, L., Zhang, F., & Mirza, J. (2019). Multi-objective artificial bee colony algorithm for order-oriented simultaneous sequencing and balancing of multi-mixed model assembly lines. Journal of Intelligent Manufacturing, 30(3), 1195–1220

9) Deliktaş, D., & Aydın, D. (2023). An artificial bee colony based hyper-heuristic algorithm with local search for assembly line balancing problems. Engineering Computations, 40(9/10), 2453–2482.

10) Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. European Journal of Operational Research, 168(3), 694–715.

11) Duan, X., Wu, B., Hu, Y., Liu, J., & Xiong, J. (2019). An improved artificial bee colony algorithm with MaxTF heuristic rule for two-sided assembly line balancing problem. Frontiers of Mechanical Engineering, 14(2), 241–253.

12) Liu, J., Zhou, Z., Pham, D. T., Xu, W., Yan, J., Liu, A., & Liu, Q. (2018). An improved multi-objective discrete Bees Algorithm for robotic disassembly line balancing in remanufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97(9–12), 3937–3962.

13) Wang, B., Guan, Z., Saif, U., Xu, X., & He, Z. (2017). Simultaneous order scheduling and mixed-model sequencing in an assemble-to-order production environment: A multi-objective hybrid artificial bee colony algorithm. Journal of Intelligent Manufacturing, 28(2), 419–436.

14) Tapkan, P. Z., Özbakır, L., & Baykasoğlu, A. (2016). Bee algorithms for parallel two-sided assembly line balancing with walking times. Applied Soft Computing, 39, 275–291.

15) Saif, U., Guan, Z., Jahanzaib, M., & Zhang, L. (2016). Hybrid Pareto artificial bee colony algorithm for assembly line balancing with task time variations. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 30(2–3), 231–245.

16) Saif, U., Guan, Z., Liu, W., Wang, B., & Zhang, C. (2014). Multi-objective artificial bee colony algorithm for simultaneous sequencing and balancing of mixed-model assembly lines. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75(9–12), 1809–1827.

17) Özbakır, L., & Tapkan, P. (2011). Bee colony intelligence in zone-constrained two-sided assembly line balancing problem. Expert Systems with Applications, 38(9), 11947–11957.

18) Özbakır, L., & Tapkan, P. (2010). Balancing fuzzy multi-objective two-sided assembly lines via Bees Algorithm. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 21(5), 317–329.

19) Arıkan, M. (2017). A tabu search algorithm for the type-II assembly line balancing problem with workload smoothing. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32(4), 1169–1179.

20) Roshani, A., Roshani, A., & Jolai, F. (2017). A simulated annealing algorithm for multi-manned assembly line balancing. Journal of Manufacturing Systems, 43, 1–10.

21) Kalaycı, C. B., Polat, O., & Gupta, S. M. (2016). A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing. Annals of Operations Research, 242(1), 321–354.

22) Küçükkoc, I., & Zhang, D. Z. (2015). Type-E parallel two-sided assembly line balancing: Model and ant colony optimisation-based approach. Computers & Industrial Engineering, 84, 56–69.

23) Tuncel, G., & Aydın, D. (2014). Two-sided assembly line balancing using teaching–learning-based optimization algorithm. Computers & Industrial Engineering, 74, 291–299.

24) Chutima, P., & Chimklai, P. (2012). Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimization with negative knowledge. Computers & Industrial Engineering, 62(1), 39–55.

25) Sim, K. M., & Thangiah, W. (2012). Maximizing production rate and workload balancing in two-sided assembly lines using harmony search. Computers & Industrial Engineering, 62(2), 398–407.

26) Kim, Y. K., Song, W., & Kim, J. H. (2009). A multi-objective genetic algorithm for mixed-model U-shaped assembly line balancing. European Journal of Operational Research, 196(2), 542–552.

27) Simaria, A. S., & Vilarinho, P. M. (2009). 2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines. International Journal of Production Research, 47(11), 3051–3074.

28) Özcan, U., & Toklu, B. (2009). Multiple-criteria decision making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models. Computers & Operations Research, 36(6), 1955–1965.

29) Baykasoğlu, A., Özbakır, L., & Gorkemli, B. (2012). Multiple-colony ant colony optimization for parallel assembly line balancing with fuzzy parameters. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 23(1), 283–295.

30) Bautista, J., & Pereira, J. (2007). Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. European Journal of Operational Research, 177(3), 2016–2032.

31) Lapierre, S. D., & Ruiz, A. (2006). Balancing assembly lines with tabu search. European Journal of Operational Research, 168(3), 826–837.

32) Hejazi, S. R., & Saghafian, S. (2005). An immune algorithm for balancing assembly lines. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26(11–12), 1126–1134.

33) Kılınçcı, Ö. (2022). Assembly line balancing problem with resource and sequence-dependent setup times (ALBPRS). Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38(1), 557–570.

34) Li, M.-L. (2021). An algorithm for arranging operators to balance assembly lines and reduce operator training time. Applied Sciences, 11(18), 8544.

35) Bongomin, O., Mwasiagi, J. I., Nganyi, E. O., & Nibikora, I. (2020). Improvement of garment assembly line efficiency using line balancing techniques. Engineering Reports, 2(4), e12157.

36) Dalle Mura, M., & Dini, G. (2019). Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach. CIRP Annals, 68(1), 1–4.

37) Foroughi, A., & Gökçen, H. (2019). Stochastic two-sided assembly line balancing with cost-oriented objectives. Assembly Automation, 39(1), 124–139.

38) Bautista, J., & Bataller, M. (2011). A GRASP approach for assembly line balancing with resource selection. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53(1–4), 271–282.

39) Chiang, W. K., & Urban, T. L. (2006). The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure. European Journal of Operational Research, 175(3), 1767–1785.

40) Güngör, A., & Gupta, S. M. (2001). A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. International Journal of Production Research, 39(7), 1427–1467.

ROBOTIC AUTOMATION INTEGRATION IN RUNNER BREAKOUT FOR PLASTIC INJECTION MOLDING: A CASE STUDY IN FURNITURE MANUFACTURING

ÇAĞLA ÖZBİLEK[1], MURAT CIDIK [2], UĞUR ALEV[2], CİHAN MERTÖZ[2], ALİ SERDAR VANLI[1], ANIL AKDOĞAN [*1]

[1] Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Istanbul, TURKEY.
[2] Mesan Plastik ve Metal A.Ş., Istanbul, TURKEY.

Özet

Mobilya imalat sektöründe, küçük boyutlu ve çok gözlü kalıplar kullanılarak plastik enjeksiyon üretimi, yüksek hacimli seri üretim süreçleri açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu üretim sistemlerinde manuel müdahalelerin azaltılması hem üretim verimliliğinin artırılması hem de işçilik maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Şerit dübeller gibi küçük plastik parçaların enjeksiyon sonrası kılavuzlarının manuel olarak kırılması, operatörlerde fiziksel yorgunluğa, iş sağlığı ve güvenliği açısından riskli durumlara ve üretim kalitesinde dalgalanmalara neden olabilir. Kalıp pimlerinin kırılması, yüksek kuvvet uygulaması gerektiren bu işlemler sırasında sıklıkla karşılaşılan bir arıza türüdür. Bu arızalar, kalıp sökme, bakım ve onarım gibi süreçleri gerektirerek zaman ve maliyet açısından yüksek kayıplara neden olmakta ve üretim hattının sürekliliğini aksatmaktadır. Bu çalışma kapsamında, plastik şerit üretim sürecinde kılavuz kırma operasyonu robotik otomasyon entegrasyonu ile yeniden tasarlanmış ve süreç iyileştirilmiştir. Geliştirilen sistem sayesinde kalıp pimi kırılma riski önemli ölçüde azaltılmış ve operatör başına düşen makine sayısı artırılarak üretim verimliliğinde önemli bir artış sağlanmıştır. Aynı zamanda işçilik maliyetlerinde azalma ve operatör ergonomisinde iyileşme gözlenmiştir. Manuel uygulamalarda kırıcı bıçaklara uygulanan ani ve yüksek yükler nedeniyle oluşan arızalar otomasyon sayesinde en aza indirilmiş; yollukların kademeli ve kontrollü bir şekilde kırıcı bıçağa yönlendirilmesiyle hem bıçak ömrü uzatılmış hem de bakım maliyetleri düşürülmüştür. Bu uygulama, Endüstri 4.0 vizyonu doğrultusunda plastik enjeksiyon gibi geleneksel üretim yöntemlerine dijitalleşme ve akıllı sistem entegrasyonu açısından örnek teşkil etmektedir. Proses otomasyonları operasyonel verimliliği sağlamanın yanı sıra sürdürülebilirlik, kalite güvencesi ve rekabet gücü açısından üretim altyapısının geleceğe hazırlanmasına da katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın temel amacı, manuel yolluk koparma prosesini robotik otomasyon ile optimize ederek üretim verimliliğini artırmak, kalıp bütünlüğünü korumak ve dijital dönüşüm sürecine katkı sağlayacak modern bir üretim altyapısının inşasına zemin hazırlamaktır.

Anahtar kelimeler: Enjeksiyon Kalıplama, Yolluk Kırıcı, Robotik Otomasyon

1. Giriş

Plastik enjeksiyon yöntemi, seri üretim kapasitesi, üretim hassasiyeti ve kalıp tekrar edilebilirliği gibi avantajları sayesinde, günümüz imalat sektörlerinde yaygın olarak tercih edilen bir üretim yöntemidir. Plastik enjeksiyon kalıplama, pek çok endüstride yaygın olarak kullanılan plastik şekillendirme tekniklerinden biridir ve mobilya sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Mobilya sektöründe ise bu yöntem; sandalye, masa, bağlantı elemanları ve dekoratif parça üretiminde hız, esneklik ve maliyet avantajı sağlaması bakımından özel bir konuma sahiptir. Özel tasarım plastik mobilya parçaları, yüksek kaliteli ve maliyet açısından verimli parçaları yüksek hacimlerde üretmek isteyen mobilya üreticileri için mükemmel bir çözümdür. Bu teknoloji, belirli sandalyeler ve masalar gibi tek parça mobilya üretiminde de yoğun şekilde kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama makineleri, otomatik ve yüksek hassasiyetli üretim kabiliyeti ile geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla çok daha kısa sürede yüksek adetli üretim yapılmasına olanak tanımaktadır. Plastik, dayanıklılığı ve sağlamlığı ile bilinir; zorlu ortamlara bile dayanabilir ve diğer malzemelere göre çok daha düşük maliyetlidir. Bu firmalar, modern mobilyalar için gerekli hassas ve doğru parçaları üretebilmektedir [1]. Ayrıca, kullanılan plastik hammaddelerin geri dönüştürülebilir olması, bu yöntemin sürdürülebilir üretim hedeflerine de katkı sunmasını sağlamaktadır [2].

Plastik enjeksiyon kalıplama, yalnızca mobilya sektörü özelinde değil, aynı zamanda küresel ölçekte de stratejik öneme sahip bir üretim yöntemidir. 2023 yılında 330 milyar USD seviyelerine ulaşan pazar hacmiyle, bu yöntemin küresel imalat ekosisteminin merkezinde yer aldığı görülmektedir. Pazarın, %3.6 - 4.9 oranlarında yıllık büyümeyle 2030'da 397 - 424 milyar USD aralığına ulaşması beklenmektedir. Özellikle Asya–Pasifik bölgesi bu büyümede öncü konumdayken; ambalaj, otomotiv ve elektronik gibi sektörler başlıca uygulama alanlarıdır. Enjeksiyon kalıplamanın modern imalatta bu denli vazgeçilmez bir yöntem haline gelmesinde, üretim hızının yanı sıra ölçüsel hassasiyet, otomasyon kabiliyeti, kalite kontrol kolaylığı ve Endüstri 4.0 ile uyumlu çalışabilirlik gibi nitelikler belirleyici olmaktadır. Bununla birlikte, geri dönüştürülebilir hammaddelerin kullanımı ve çevresel sorumluluk projeleri doğrultusunda geliştirilen uygulamalar sayesinde, enjeksiyon kalıplama süreçleri sürdürülebilir üretim hedefleriyle de örtüşen bir yapıya kavuşmuştur [3-7].

Bu amaçla bu yayında mobilya aksesuarlarındaki enjeksiyon kalıplama süreçleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, plastik şerit dübel üretim hattında karşılaşılan üretim aksaklıkları tespit edilmiş ve bu süreçler robotik otomasyon entegrasyonu ile yeniden yapılandırılarak verimlilik, kalite ve iş güvenliği açısından önemli iyileştirmeler sağlanmıştır.

1.1 Enjeksiyon Kalıplama Süreci

Enjeksiyon kalıplama süreci, plastik granüllerin kontrollü bir şekilde belirli sıcaklıklarda eritilerek ergiyik hale getirilmesiyle başlar. Eriyik plastik, yüksek basınç altında ve belirli hızlarda enjeksiyon makinesinin nozulundan kalıp boşluğuna doldurulur. Kalıp, genellikle iki veya daha fazla parçadan oluşan ve ürünün şekillendirildiği hassas işlenmiş bir yapıdır. Plastik, kalıp içerisinde soğuyup katılaşarak nihai şekline ulaşır. Bu aşamada üretim, enjeksiyon makinasına kalıbın bağlanması, plastik ham maddenin ve gerekiyorsa boyanın uygun miktarlarda ham madde haznesine yerleştirilmesi ile başlamaktadır. Ardından, makinenin uygun ısı ve basınç değerlerine ayarlanması gerekir. Parçanın kalıp içinde soğuma ve katılaşma süresi, kullanılan malzemenin

özelliklerine ve parça geometrisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kalıp açıldıktan sonra parça kalıptan çıkarılır ve proses bir sonraki döngüye hazırlanmaktadır. Eğer üretilen plastik parça boyama, serigrafik baskı veya gruplama gibi ek işlemler gerektirmiyorsa, enjeksiyon makinasından çıkan ürün doğrudan nihai ürün olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, yüksek hassasiyet, tekrar edilebilirlik ve karmaşık geometrilerin üretimi için ideal bir imalat yöntemidir [8].

Bu kapsamda, özellikle bağlantı elemanları gibi küçük boyutlu plastik parçaların yüksek adetlerde üretilmesi gereken uygulamalarda bu yöntem stratejik bir rol üstlenmektedir. Çok gözlü kalıplar kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde hem çevrim süresinin düşük tutulması hem de parça başına maliyetin minimize edilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu kapsamda, üretim sürecinde manuel müdahalelerin azaltılması ve otomasyon sistemlerinin entegrasyonu, yalnızca verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda ürün kalitesinde süreklilik ve iş güvenliği açısından da kritik faydalar sağlamaktadır.

1.2 Mobilya Aksesuarlarında Enjeksiyon Kalıplama

Plastik enjeksiyon kalıplama, mobilya sektöründe yaygın olarak tercih edilen ve üretim süreçlerine önemli avantaj kazandıran bir yöntemdir. Özellikle büyük hacimli ve tekrarlayan üretimlerde maliyet etkinliği sağlar; zira kalıp tasarımı ve geliştirilmesi genellikle tek seferlik bir yatırım olup, kalıp hazırlandıktan sonra üretim maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu yöntem, mobilya bileşenlerinin gerektirdiği karmaşık şekil ve detayların yüksek hassasiyetle üretilmesini mümkün kılmaktadır ve üretilen parçalar binlerce kez aynı kalite ve ölçüde tekrarlanabilir, böylece ürün tutarlılığı ve kalite sürekliliği sağlanmaktadır. Yüksek basınçla kalıba sıkıca enjekte edilen plastik, detaylı ve karmaşık geometrilerin ekonomik şekilde üretimine olanak tanımaktadır. Bu da tasarımda esneklik sağlar ve üretim zorluğunu azaltır. Kalıpların tasarımı ve makinelerin programlanmasının ardından enjeksiyon kalıplama, yüksek üretim hızıyla büyük miktarlarda parça üretimine imkan vermektedir. Çoklu parça üretim kapasiteleri ve sıcak-kanallı kalıp sistemleri sayesinde çevrim süreleri kısalır ve verimlilik artar. Ayrıca, dolgu maddeleri eklenerek kalıplanan plastik parçaların yoğunluğu düşürülürken dayanıklılıkları artırılabilir, bu da mobilya ürünlerinin sağlamlığı ve uzun ömürlülüğü açısından kritik bir avantajdır. Co-injection (çoklu enjeksiyon) teknolojisi sayesinde aynı kalıp içinde farklı plastik türlerinin bir arada kullanılması mümkün hale gelir; böylece farklı mekanik ve estetik özelliklere sahip bölgeler tek parça olarak üretilebilmektedir. Son olarak, enjeksiyon kalıplama işlemleri genellikle robotik ve otomatik sistemlerle entegre edilerek gerçekleştirilir, bu sayede iş gücü ihtiyacı azalır, üretim maliyetleri düşer ve ürünlerin rekabetçi fiyatlarla pazara sunulması sağlanmaktadır.

1.3 Üretim Sürecinde Operasyonel Engeller

Küçük boyutlu plastik parçaların üretildiği bu sistemlerde, özellikle yollukların parçadan manuel olarak koparılması aşamasında karşılaşılan zorluklar, üretim sürecinin etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle yollukların manuel koparılması gibi tekrarlayan görevler, operatörlerde dikkat kaybına ve verimlilikte düşüşe yol açmaktadır. İşletme içinde yapılan gözlemler, bu tür işlemlerin vardiya bazlı performans dalgalanmalarına neden olduğunu ortaya koymuştur. Şerit dübel gibi parçaların enjeksiyon sonrası yolluklarının koparılması, çoğu zaman operatör müdahalesi gerektiren, fiziksel efor ve dikkat isteyen bir işlem olup; üretim hızını düşürmenin yanı sıra kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları gibi ergonomik sorunlara ve iş güvenliği risklerine de sebep olmaktadır. Ayrıca, manuel koparma işlemleri sırasında uygulanan dengesiz kuvvetler, kalıp

bileşenlerinde özellikle pimlerde hasara neden olarak üretim hattında arıza, plansız duruş ve bakım maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır.

Literatürde, plastik enjeksiyon süreçlerinde kalıp ömrünü artırmak, çevrim süresini kısaltmak ve manuel işlemleri azaltmak amacıyla çeşitli otomasyon uygulamalarının geliştirildiği görülmektedir. Özellikle robot destekli parça alma, kalıp içi etiketleme ve otomatik yolluk ayırma gibi sistemler, üretim hattının sürekliliğini sağlama ve insan müdahalesini en aza indirme yönünde önemli adımlar olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, yolluk koparma işleminin otomasyon sistemlerine entegrasyonu, parça geometrisinin karmaşıklığı, yolluk tasarımı ve kalıp hassasiyeti gibi etkenler nedeniyle sınırlı sayıda uygulamada başarıyla gerçekleştirilebilmiştir. Mevcut sistemlerin bir kısmı yalnızca standart parça tiplerine uyum sağlayabilirken, bazı çözümler ise yüksek maliyetli özel ekipman gerektirmektedir.

Özellikle Endüstri 4.0 ile birlikte enjeksiyon makinelerinin dijitalleşmesi, üretim süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesi, uzaktan kontrol imkânları ve veriye dayalı optimizasyon yetkinlikleriyle geleceğe daha entegre ve akıllı çözümler sunma potansiyelini artırmıştır. Bu dijital dönüşüm sayesinde, süreçlerdeki verimlilik artarken arıza ve duruş süreleri azalmakta, bakım maliyetleri optimize edilmektedir. Ayrıca enerji verimliliği ön planda tutulmakta; geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı ve daha çevreci üretim yöntemleriyle mobilya sektöründe sürdürülebilirlik hedefleri desteklenmektedir. Tüketici taleplerindeki çeşitlilik ve kişiselleşme eğilimi ise modüler ve hızlı değiştirilebilir kalıplar, 3D baskı destekli üretim gibi teknolojilerle karşılanarak, sektördeki rekabet gücü artırılmaktadır. Bu gelişmeler, plastik enjeksiyon teknolojisinin mobilya imalatındaki stratejik önemini daha da pekiştirmekte ve sektöre yönelik otomasyon çözümlerinin yaygınlaştırılması için yeni fırsatlar yaratmaktadır. Bu bağlamda, hem düşük maliyetli hem de mevcut üretim altyapısına kolaylıkla entegre edilebilecek çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

1.4 Enjeksiyon Süreçlerinde Dijitalleşme ve Otomasyon

Son yıllarda plastik enjeksiyon üretim hatlarında dijitalleşme, otomasyon sistemlerinin entegrasyonu ve yapay zekâ uygulamaları, rekabetçi ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu dönüşüm, sadece üretim verimliliğinin artırılmasıyla sınırlı kalmayıp; kalite güvence sistemlerinin iyileştirilmesi, kestirimci bakım uygulamalarının yaygınlaşması, operatör ergonomisinin artırılması ve iş güvenliği risklerinin azaltılması gibi çok boyutlu faydalar sunmaktadır. Özellikle robot destekli optik görüntüleme sistemleri, 2D/3D kamera destekli kalite kontrol uygulamaları ve makine öğrenmesi temelli anomalilik tespit algoritmaları, kalıptan çıkan parçaların yüzey hatalarını, deformasyonlarını veya eksik detaylarını gerçek zamanlı olarak tespit edebilmekte; bu sayede üretim sırasında oluşan kusurların fark edilmesi manuel yöntemlere kıyasla çok daha hızlı ve isabetli biçimde sağlanmaktadır [9]. Bunun yanı sıra, derin öğrenme modelleri ile desteklenen bu sistemler, geçmiş veri kümelerinden öğrenerek süreç içinde sürekli gelişim göstermekte ve yeni kusur türlerini de tanımlayabilir hâle gelmektedir. Aminabadi ve arkadaşlarının (2022) yaptığı çalışmada, plastik enjeksiyon kalıplama süreci için Endüstri 4.0 uyumlu, tam otomatik ve kapalı çevrimli bir kalite kontrol sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada, yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk ve parça ağırlığı gibi üç temel kalite özelliği yapay zekâ destekli modellerle tahmin edilmiş; bu veriler, üretim parametrelerinin (enjeksiyon hızı, tutma basıncı, kalıp sıcaklığı) otomatik ayarlanmasında kullanılmıştır. Derin öğrenme temelli görüntü analizi ile yüzey kalitesi değerlendirilmiş ve kontrol sisteminin, çeşitli kalite hedeflerine yüksek doğrulukla ulaşabildiği gösterilmiştir [10].

Günümüzde üretimde verimliliği artırmak, kaliteyi standartlaştırmak ve iş gücü maliyetlerini düşürmek için robotik otomasyon sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Plastik enjeksiyon makinelerinde robotlar, üretim hızını artırmak, hatalı üretimi azaltmak ve iş güvenliğini geliştirmek için parçaları kalıptan almak, insert yerleştirmek, yollukları ayırmak, kalite kontrol yapmak ve ürünleri paketleyip istiflemek gibi görevleri üstlenir. Bu sistemler ayrıca üretim verilerini toplayıp analiz ederek süreçleri daha esnek, akıllı ve sürekli hâle getirebilir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, robot destekli enjeksiyon hatlarının kullanımı daha da yaygınlaşacak ve daha fazla üretim sürecinde yer alacaktır [11].

Endüstriyel robotlar, sürekli çalışma yetenekleri sayesinde plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde tekrar eden görevlerin otomatik olarak yapılmasını sağlar. Özellikle makine besleme gibi hem hassasiyet hem de iş gücü gerektiren işlemlerde robot kullanımı, operatörlerin yükünü hafifletirken iş kazası risklerini de azaltır. Enjeksiyon sürecinde robotlar, kalıptan çıkan parçaları hızlı ve hassas şekilde almak, malzeme veya parçaları yerleştirmek, yollukları ayırmak, kalite kontrol yapmak ve ürünleri paketleyip istiflemek gibi çeşitli görevleri üstlenmektedir.

Bu tür uygulamalar, yalnızca kalite kontrol adımlarında değil, aynı zamanda otomatik yolluk ayırma, robotik alma-bırakma, ultrasonik kaynak entegrasyonu, kalıp içi etiketleme ve ısı perçinleme gibi ikincil işlemlerde de yaygın olarak kullanılmakta; böylece üretim hattında insan müdahalesine olan gereksinim minimuma indirilmektedir. Özellikle "insert molding" uygulamalarında, altı eksenli robotlar enjeksiyon sırasında veya sonrasında metal parçaların hassas şekilde yerleştirilmesini sağlayarak ürün kalitesini artırmaktadır [12]. Sürecin otomatikleştirilmesi hem hata oranlarının düşmesini hem de operatör kaynaklı performans dalgalanmalarının azaltılmasını mümkün kılmakta; vardiyalar arası tutarlılık sağlanarak ürün kalitesinde süreklilik elde edilmektedir [13].

1.5 Enjeksiyon Kalıplama Sürecinde Robot Kullanımı

Plastik enjeksiyon kalıplama makineleri, üretimde kritik rol oynar ve otomasyon bu makinelerde verimlilik, kalite ve güvenliği artırır. Robotlar tekrarlayan görevleri üstlenerek operatörlerin daha karmaşık işlere yönelmesini sağlar [14].

1.5.1 Makine Besleme (Machine Tending): Robotlar, kalıptan çıkan sıcak parçaları hızlı ve hassas şekilde alarak operatörlerin yanma riskini ortadan kaldırır. Ayrıca parçaların doğru şekilde taşınmasıyla şekil bozuklukları önlenir ve kalite güvencesi sağlanır. Mohammadreza 14 ve arkadaşları, enjeksiyon kalıplama makinelerinde kalıbın olası hasarlardan korunması amacıyla akıllı bir denetim sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, makine görüşü tabanlı olup, kalıp açıldıktan sonra ürünlerin kalıp yüzeyinde doğru şekilde çıkarılıp çıkarılmadığını iki aşamada kontrol etmektedir. Görüntü işleme için LBP (Local Binary Pattern) yöntemiyle özellik çıkarımı yapılmış ve polinom çekirdekli SVM algoritmasıyla sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem, "dolu" ve "boş" durumlarını %96,7 F-skoru ile ayırt ederek yüksek doğruluk sağlamıştır. Bu tür bir sistem, Machine Tending uygulamasına benzer şekilde, insan müdahalesini azaltarak makine güvenliğini artırmakta ve üretim hatalarını önlemektedir [15].

Saeid Aminabadi ve arkadaşları, enjeksiyon kalıplama sürecinde kalite kontrolünü tam otomatik ve kapalı çevrimli hale getirmek amacıyla bir sistem geliştirmiştir. Bu sistemde parça ağırlığı, yüzey kalitesi (örneğin parlaklık), boyutsal doğruluk gibi kalite kriterleri kalıptan çıktıktan hemen

sonra çevrim içi olarak ölçülmüştür. Süreçte kullanılan yapay zeka tabanlı modelleme yöntemleri sayesinde, bu kalite özellikleri ile üretim parametreleri arasında ilişki kurulmuş ve süreç dinamik olarak optimize edilmiştir. Çalışma, sistemin kalite dalgalanmalarını azaltarak hedeflenen kalite seviyesini tutturabildiğini göstermiştir. Böylece üretim süreci sadece otomatikleştirilmekle kalmamış, aynı zamanda kalite kontrol süreci de dijitalleştirilmiş ve daha güvenilir hale getirilmiştir. Bu yaklaşım, plastik enjeksiyon üretiminde Endüstri 4.0'ın prensiplerine uygun olarak hem üretkenliği hem de kalite güvencesini iyileştirme potansiyeli taşımaktadır [16].

1.5.2 Insert Kalıplama (Insert Molding): Küçük parçaların kalıba yerleştirilmesi manuel olarak zor ve hata riskine açıktır. Ayrıca kullanılan pres makineleri operatörler için tehlikelidir. Robotlar bu süreci otomatikleştirerek kaliteyi artırır ve iş güvenliğini sağlar. Yapılan bir çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan busbar parçalarının manuel olarak yürütülen insert enjeksiyon kalıplama süreci, robot tabanlı bir otomasyon sistemi ile geliştirilmiştir. Bu sistem, busbar besleme ve hizalama, insert yerleştirme, enjeksiyon sonrası ürün çıkarma, taşıma, muayene ve istifleme işlemlerini tamamen otomatik hale getirmiştir. Gerçek seri üretimde uygulama sonucunda, üretkenlik günlük 200 adetten 250 adede çıkarak %25 artış göstermiş, hata oranı ise %8'den %5.84'e düşerek %27 iyileşmiştir. Bu sonuçlar, robot destekli otomasyonun hem kaliteyi hem de verimliliği önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır [17].

1.5.3 Overmolding: İki ayrı kalıplanmış bileşenin birleştirilmesi sürecinde robotlar hem hız hem de tutarlılık açısından avantaj sağlar. İnsan kaynaklı yükleme ve boşaltma hataları ortadan kalkar. Örneğin, otomotiv koltuk bileşenlerinde kullanılan tel yapılar, plastik enjeksiyonla kaplanarak hem ağırlık azaltılmakta hem de ürün dayanıklılığı artırılmaktadır. Ancak, bu süreçte tel besleme ve kaplanmış parçaların kalıptan çıkarılması işlemleri manuel yapıldığında zaman kaybı ve kalite sorunları ortaya çıkmaktadır. Yakın tarihli bir çalışmada, tel besleme ve boşaltma işlemlerini otomatikleştiren düşük maliyetli ve kompakt bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, robotik kol yerine mekanik ve pinomatik çözümlerle, sınırlı alanlarda yüksek verimlilik sağlamış, insan iş gücünü azaltmış ve üretim döngü süresini %20 oranında kısaltmıştır. Ayrıca, kullanılan bazı ekipmanların şirket içinden geri kazanılması çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamıştır. Böylece, overmolding sürecinde robotik olmayan otomasyon sistemleriyle hem üretim verimliliği artırılmış hem de maliyetler düşürülmüştür [18].

1.5.4 Montaj (Assembly): Nihai ürünün oluşturulmasında gerekli olan montaj işlemleri, robotlar kullanılarak daha hızlı ve tekrarlanabilir şekilde yapılmaktadır. Bu otomasyon, üretim hızını doğrudan artırırken, manuel iş gücüne olan bağımlılığı azaltmaktadır.

Yapılan bir çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan plastik enjeksiyonla üretilmiş parçaların üzerine klips takma işlemi için eskimiş bir robotik hücre yeniden programlanıp üretim hattına entegre edilmiştir. Robot ve çevresel ekipmanlar yardımıyla klipslerin hassas ve hızlı montajı sağlanmış, böylece manuel montaj işlemi ortadan kaldırılmıştır. Bu dönüşümle, prosesin çevrim süresi iyileştirilmiş, üretim kapasitesi artırılmış ve işçilik maliyetleri önemli ölçüde düşürülmüştür. Ayrıca, robotun yeniden kullanımı sayesinde yatırım maliyeti düşürülmüş ve çevresel sürdürülebilirlik desteklenmiştir. İş güvenliği artarken, insan kaynaklı hata oranı azalmış, üretim kalitesi yükselmiştir. Elde edilen geri dönüş süresi (ROI) 12 ayın altında olup, uygulamanın ekonomik olarak da avantajlı olduğu görülmüştür [19].

1.5.5 Kalıp İçi Etiketleme (In-Mold Labeling): Ürün estetiği için kritik olan bu işlem, robotlar sayesinde her defasında aynı doğrulukta uygulanır ve yüksek kalite standardı sağlanır.

1.5.6 Geri Dönüşüm (Recycling): Kalıplama sürecinde oluşan artık plastik, özellikle yolluklar, robotlar yardımıyla toplanarak geri dönüştürülür. Bu hem malzeme tasarrufu hem de makine verimliliği sağlar. Ananta Sinchai ve arkadaşları, plastik atıkların geri dönüşümünü kolaylaştırmak amacıyla düşük maliyetli ve tamamen otomatik bir plastik enjeksiyon makinesi geliştirmiştir. Otomasyon sayesinde süreç robotik olarak kontrol edilmekte, lazer tabanlı taşma algılama sistemi ile malzeme israfı minimize edilmektedir. HDPE malzeme üzerinde yapılan deneylerde, 200–210 °C sıcaklık aralığında en tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma, küçük ölçekli geri dönüşümde otomatik, verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunarken, sıcaklık kontrolü ve otomasyon sistemlerinin daha da geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir [20].

Otomasyonun bu çok yönlü etkileri, sadece kaliteyi artırmakla kalmayıp, çevrim sürelerinin optimize edilmesini, makine başı üretim kapasitesinin artırılmasını ve işçilik maliyetlerinin düşürülmesini de sağlamaktadır. Öte yandan, otomasyon sistemlerinin Endüstri 4.0 ilkeleriyle entegre biçimde yapılandırılması, üretim altyapısının dijital ikizler, bulut tabanlı veri yönetimi ve uzaktan izleme sistemleri ile desteklenmesini mümkün kılarak, reaktif değil proaktif bir üretim yönetim modeline geçilmesine zemin hazırlamaktadır. Kalıp içi etiketleme gibi proseslerde robotların kullanımı, önceden basılmış etiketlerin kalıp içine doğru ve dayanıklı bir şekilde yerleştirilmesini sağlayarak ürün kalitesini yükseltmektedir.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından, yolluk ve yolluk kanallarının robotik ayırıcılar tarafından hızla çıkarılması ve granülatöre yönlendirilmesi, üretim hattında geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini artırmaktadır. Bu gelişmeler ışığında, plastik enjeksiyon gibi yüksek hacimli ve tekrarlayan üretim döngülerine sahip sektörlerde, otomasyon uygulamalarının entegre edilmesi artık bir tercih değil, bir gereklilik hâline gelmiştir. Hem kalıp sağlığını korumak hem operatör üzerindeki fiziksel yükü azaltmak, hem de üretim hattının sürekli çalışabilirliğini sağlamak açısından otomasyon sistemleri vazgeçilmez bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak çalışmanın temel amacı, plastik enjeksiyon üretim sürecinde manuel olarak yürütülen yolluk ayırma işlemlerinin otomasyon sistemleriyle optimize edilerek, operatör performansının ve üretim sürekliliğinin artırılmasıdır. Robotik otomasyon yalnızca üretim aşamasında değil, post-proses aşamalarında da yüksek tekrarlanabilirlik ve verimlilik sağlayarak manuel işlemlere kıyasla daha kaliteli ve hızlı sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Çalışma, Endüstri 4.0 yaklaşımı doğrultusunda yerel üretim ortamlarında uygulanabilir ve düşük maliyetli bir çözüm modeli sunmayı hedeflemektedir.

2. Malzeme ve Metot

Bu bölümde, çalışmada ele alınan üretim sürecine yönelik problemlerin detaylı analizi yapılmakta ve mevcut durum değerlendirilmesi sunulmaktadır. Ardından, bu sorunlara çözüm getirmek amacıyla tasarlanan robotik otomasyon sisteminin yapısı ve işleyişi açıklanmaktadır. Kullanılan ekipmanların teknik özellikleri tanıtılarak sistemin fonksiyonel kapasitesi ortaya konmaktadır. Son olarak, uygulamanın gerçekleştirildiği ortam ve deneysel kurulum detaylandırılmakta; performans değerlendirme kriterleri ışığında sistemin etkinliği analiz edilmektedir.

2.1 Problem Tanımı ve Mevcut Durumun İncelenmesi

Enjeksiyon hattında, çok gözlü kalıplarla üretilen şerit dübel salkımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu ürünlerin yolluklarının manuel olarak ayrılması sürecinde çeşitli zorluklar yaşanmaktadır.

Yolluklu ürün bazen kalıptan düşmeyip, kalıp dişi tarafında kalmakta ve kalıp kapanırken bu durum pimlerin ezilmesine yol açmaktadır. Bu nedenle kalıp pimleri sık sık değiştirilmekte ve kalıpta çelik deformasyonları oluşmaktadır. Ürünler kalıptan düştükten sonra, operatörler tarafından manuel yolluk ayırma işlemi uygulanmakta, ardından ürünler kolilere dizilmektedir. Ancak bir operatör, aynı anda iki enjeksiyon makinesinden sorumlu olduğundan, kalıp başında sürekli bulunamamaktadır; bu da pim kırılması ve çelik ezilmesi gibi ekipman sorunlarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, operatörün yollukları makinenin yanındaki kırma makinesine düzenli olarak atamaması ve yollukları biriktirerek düzensiz atması, kırma bıçaklarının daha hızlı aşınmasına ve ömrünün kısalmasına yol açmaktadır. Manuel müdahaleye bağlı olarak operatörlerde fiziksel yorgunluk ve iş yükü artmakta, bu durum ergonomik riskleri ve hata oranlarını yükseltmektedir. Tüm bu sorunlar, üretim sürecinin kesintisiz ve verimli ilerlemesini engellemekte ve üretim çevrim süresini olumsuz yönde etkilemektedir.

Şekil 1 Enjeksiyon yöntemiyle imal edilen şerit dübel salkımı resmi

2.2 Çözüm Yaklaşımı ve Otomasyon Sistemi Tasarımı

Mevcut üretim hattında tespit edilen yolluk ayırma sorunlarını etkin bir şekilde çözmek ve üretim verimliliğini artırmak amacıyla, manuel yolluk ayırma işlemlerinin neden olduğu problemleri ortadan kaldıracak bir robotik otomasyon sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, enjeksiyon kalıplama çevrimiyle tam entegre olacak şekilde tasarlanmış olup, yolukların ve ürünlerin kalıptan kontrollü, hızlı ve güvenli bir biçimde ayrılmasını sağlamaktadır. Otomasyon sistemi sayesinde, kalıp pimlerinde ve kalıp üzerinde oluşan ezilmelerin ve kırılmaların önemli ölçüde azalması hedeflenirken, aynı zamanda ekipmanların kullanım ömrünün uzatılması amaçlanmaktadır.

Tasarlanan sistem, üretim sürecindeki duruş ve arıza sürelerini minimize ederek toplam çevrim süresinin kısalmasına katkıda bulunmakta; böylece üretim hattının verimliliğini ve sürekliliğini artırmaktadır. Ayrıca, operatörlerin yolluk ayırma sırasında maruz kaldığı fiziksel yük ve ergonomik riskler azaltılarak iş sağlığı ve güvenliği koşulları iyileştirilmektedir.

Otomasyon çözümünün temelinde, enjeksiyon makinesi ile senkronize çalışan, yüksek hassasiyetli 3 eksenli endüstriyel robot kolu yer almaktadır. Robot kolu, enjeksiyon kalıbı açıldığı anda devreye girerek, özel tasarım sistemi ile yolluğu parçalardan ayırmakta ve sabitlenmiş kırma düzeneğine yönlendirmektedir. Bu sayede hem kalıp hem de yolluk ayırma ekipmanı korunmakta ve süreçte oluşabilecek hatalar minimize edilmektedir.

Robot kolunun taşıma kapasitesi ve hareket açıklıkları, üretim hattının ihtiyaçları doğrultusunda optimize edilmiştir. Tasarım aşamasında enerji verimliliği, kullanıcı dostu arayüz ve operasyon güvenliği gibi unsurlar öncelikli olarak ele alınmış; böylece üretim kalitesi artırılırken, operatörlerin iş yükü ve riskleri azaltılmıştır.

2.3 Kullanılan Ekipmanlar

Bu çalışmada enjeksiyon kalıplama işlemleri, ARBURG marka ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION model makine ile gerçekleştirilmiştir. Ekipman, 470 mm kolon açıklığı ve 1500 kN kapama kuvvetine sahiptir. Ayrıca, 400 serisi enjeksiyon ünitesi ile donatılmış olan sistemin toplam ağırlığı yaklaşık 5100 kg'dır. Hassas üretim kabiliyeti ve güvenilir performansı sayesinde, özellikle yumuşak robot bileşenlerinin düşük maliyetli ve hızlı prototip üretimi için uygun bir altyapı sunmaktadır.

Kullanılan robotik sistem de, FRANCIA-308i model üç eksenli servo robot olup, enjeksiyon kalıplama sürecinin otomasyonunu sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Robotun taşıma kapasitesi 3 kg'dır ve eksen hareket açıklıkları sırasıyla X: 600 mm, Y: 800 mm, Z: 1400 mm olup, dikey ekseni teleskopik değildir. Sistem, YUCON-800 kontrol ünitesi ile donatılmıştır; bu ünite, 8" renkli dokunmatik ekranı, Türkçe menü desteği ve video animasyonlarla desteklenen kullanıcı arayüzü sayesinde son derece kullanıcı dostu bir yapı sunmaktadır. "Kolay Öğrenim" (Easy Teaching) özelliği sayesinde operatör, robot kolunu elle yönlendirerek pozisyonları kolayca öğretebilmekte ve bu süreç yalnızca birkaç dakika sürmektedir.

Robot sisteminde kullanılan Tamagawa servo motorlar, THK lineer kızaklar ve SMC pinomatik bileşenler, yüksek hassasiyetli pozisyonlama, düşük enerji tüketimi ve uzun ömürlü kullanım sağlamaktadır. Ayrıca Absolute Encoder teknolojisi sayesinde enerji kesintilerinde yeniden kalibrasyona gerek duyulmadan sistem kaldığı yerden çalışmaya devam edebilmektedir. Robot, enjeksiyon makinesinin itici pimiyle senkronize çalışarak ürünü güvenli biçimde kalıptan alır; bu sayede robot eline, kızaklara veya ürüne zarar gelmesi önlenir.

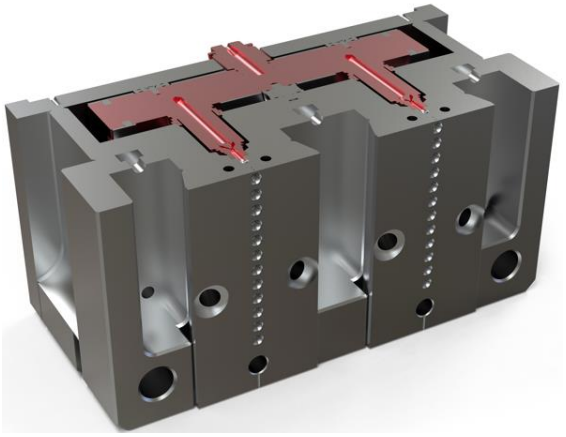
EcoMod ve Servo Sleep gibi enerji tasarrufu sağlayan modlar sayesinde sistem sürdürülebilir üretimi desteklemektedir. IMC Lite altyapısı ile üretim istatistiklerinin izlenmesi ve kalite kontrol süreçlerinin entegrasyonu da mümkündür. Kurulum yapılan uygulamada, 150 tonluk enjeksiyon makinesiyle birlikte 2 gözlü şerit dübel kalıplarından yolluk ve ürün alma işlemleri otomatikleştirilmiş, ürünlerin kutuya düşürülmesi ve yollukların ayrı bir kutuya atılması çevrim süresi 22 - 25 s arasında olacak şekilde optimize edilmiştir.

2.4 Sistem Uygulaması ve Değerlendirme Ölçütleri

Geliştirilen robotik otomasyon sisteminin üretim sürecine etkilerini incelemek amacıyla, deneysel olarak kurgulanmış karşılaştırmalı bir uygulama yapılmıştır. Uygulama, Mesan Plastik ve Metal San. A.Ş. üretim tesisinde yer alan 150 ton kapasiteli enjeksiyon makinesi üzerinde, çok gözlü bir şerit dübel kalıbı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenlemede, dış değişkenleri minimumda tutmak adına, üretim sürecinin her iki aşamasında da aynı makine, aynı kalıp, aynı operatör ve aynı çevresel koşullar kullanılmıştır.

Birinci durumda, enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra yolluk ayırma işlemi manuel olarak, operatör tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte operatör, parçaları kalıptan aldıktan sonra yollukları elle koparmış ve bu işlem sırasında oluşan üretim süresi, fiziksel efor düzeyi ve oluşan arıza durumu gözlemlenerek kayıt altına alınmıştır.

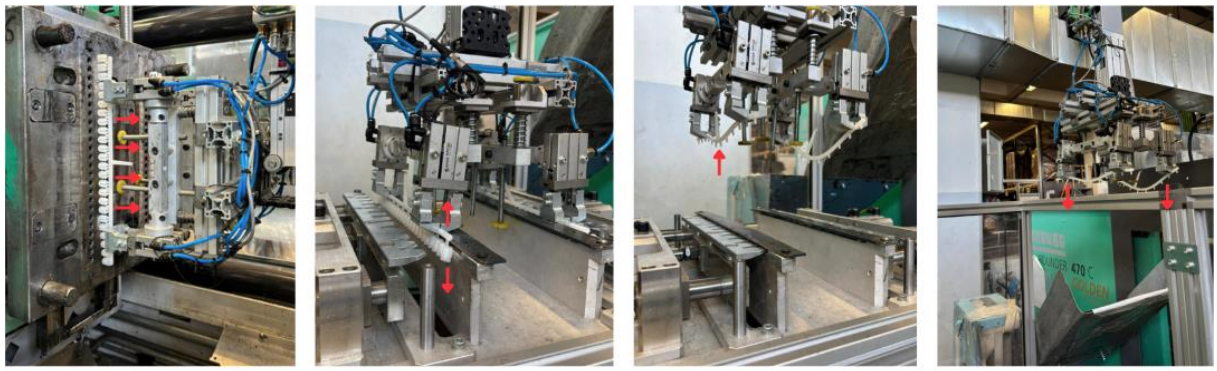
İkinci durumda**,** aynı üretim hattında, aynı kalıp ve operatörle bu kez robotik otomasyon sistemi devreye alınarak üretim yapılmıştır. Bu fazda, kalıptan çıkan parça ve yolluk robot tarafından kavranmış, yolluklar önceden konumlandırılmış yolluk ayırıcı bıçağa yönlendirilerek otomatik biçimde ayrılmıştır. Ayrıca bu aşamada, kalıpta yer alan meme ünitesi, sıcak meme sistemine dönüştürülmüştür (Şekil 2). Bu tercih, kalıp içi yollukların dişi tarafta kalma olasılığını minimize etmek ve üretim sürecinin duraksama riskini daha da azaltmak amacıyla yapılmıştır. Böylece hem robotik sistemin daha kararlı çalışması sağlanmış, hem de yolluk ayrılma problemlerine bağlı plansız duruş ihtimali düşürülmüştür. Genel sistemin işleyişi ve robotik otomasyon düzeni Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 2 Kalıpta sıcak meme uygulaması

Şekil 3 Şerit dübel üretiminde kullanılan enjeksiyon kalıplama ve otomasyon sistemi

Otomasyon sistemi, kalıp açılma sinyali ile senkronize olarak çalışmakta, robot hareketi PLC tabanlı kontrol sistemiyle yönlendirilerek yüksek tekrarlanabilirlikte operasyon gerçekleştirmektedir. Şekil 4'te prosesin adımları görülmektedir.



Şekil 4 a) Ürünün kalıptan robotla alınır b) Yolluğu ayırmak için kesme bıçaklarına yönlendirilir c) Kesme işlemi sonrası ürün koliye, yolluk da kırma hattına gider d) Yolluk, kırma makinesine yönlendirilir

Her iki fazda da üretim süreci belirli çevrim sayıları üzerinden izlenmiş; üretim süreleri, ekipman kullanımı, operatör etkileşimi ve bakım ihtiyacı gibi kriterler ölçülmüştür. Karşılaştırma için kullanılan temel değerlendirme ölçütleri şunlardır:

- Çevrim süresi
- Manuel müdahale gereksinimi
- Kalıp ve bileşen arızaları (özellikle pim kırılmaları)
- Operatör başına düşen makine sayısı
- Kırma bıçağı kullanım süresi ve bakım ihtiyacı
- Plansız duruş ve kesinti sıklığı
- Operatör ergonomisi ve iş güvenliği riskleri

Elde edilen veriler doğrultusunda, her iki fazın performans metrikleri analiz edilerek, robotik otomasyon sisteminin üretim süreci üzerindeki etkileri bir sonraki bölümde detaylı olarak tartışılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama hattında manuel yolluk ayırma işlemi ile robotik otomasyon entegrasyonunun üretim süreci üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 10 vardiya süresince yapılan gözlemler ve ölçümler ışığında elde edilen başlıca bulgular aşağıda detaylandırılmıştır:

3.1 Kırma Bıçakları ve Ekipman Dayanıklılığı

- Otomasyonun devreye alınmadığı dönemde, kırma bıçakları ortalama 3 ayda deformasyona uğrayarak değiştirilmekteydi.
- Robotik sistem kullanımıyla bıçakların dayanıklılığı %40 artış göstererek yaklaşık 4.2 aya yükselmiştir.

- Bu artış, robotik ayırma işleminin sağladığı homojen yük dağılımı, kontrollü kuvvet uygulaması ve yollukların belirli aralıklarla eşit dozajda beslenmesi sayesinde gerçekleşmiştir.
- Otomasyon öncesinde yolluklar birikerek topluca kırma işlemine gönderildiği için bıçaklara ani ve dengesiz yük binmekte, bu da ekipmanın aşırı zorlanmasına yol açmaktaydı; robotik sistem sayesinde ise dengeli ve sürekli besleme sağlanarak bu durum önlenmiştir.
- Daha uzun bıçak ömrü sayesinde bakım ve yedek parça maliyetlerinde önemli azalma yaşanmış, plansız duruş süreleri toplamda %30 oranında düşürülmüştür.

3.2 Kalıp Pimi Kırılmaları ve Maliyet Tasarrufu

- Manuel süreçte 10 vardiya boyunca toplam 10 kalıp pimi kırılması gerçekleşmiştir.
- Her kırılan pim için kalıbın sökülüp kalıphaneye gönderilmesi, pimin değiştirilmesi ve kalıbın yeniden bağlanması ortalama 2 saatlik üretim kaybına neden olmuştur; toplamda 20 saatlik plansız duruş süresi yaşanmıştır.
- Robotik otomasyon ve sıcak meme sistemine geçişle kalıp pimlerinde kırılma olayı neredeyse tamamen ortadan kalkmış, böylece toplam 20 saatlik plansız duruş ve ilgili iş kaybı engellenmiştir.
- Bu gelişme kalıp bakım maliyetlerinde %25'e varan tasarruf sağlamış, ekipman ömrü uzamıştır.

3.3 Operatör Verimliliği ve İş Gücü Kullanımı

- Otomasyon öncesinde bir operatör 2 enjeksiyon makinesine bakarken, sistem devreye girdikten sonra bu sayı 3 adete yükselmiştir. Bu, insan kaynağı kullanımında %50 oranında artış anlamına gelmektedir.
- Yolluk ayırma gibi ergonomik riski yüksek manuel işler robotlara devredildiği için operatörlerin fiziksel iş yükü ve yorgunluğu önemli ölçüde azalmış, iş güvenliği standartları iyileşmiştir.
- İşgücü optimizasyonu, operasyonel maliyetlerde yaklaşık %20 tasarruf olarak geri dönmüştür.

3.4 Üretim Sürekliliği ve Verimlilik Artışı

- Sıcak meme sistemine geçişle birlikte kalıp içi yollukların dişi tarafta kalma sorunu tamamen ortadan kalkmış, makine duruşları minimum seviyeye inmiştir.
- Otomasyon öncesi haftalık ortalama 5 plansız duruş yaşanırken, sistem entegrasyonu sonrası bu sayı haftada 1 kereden aza düşmüştür.
- Duruşların azalmasıyla günlük üretim adedi artmış, çevrim süresi sabit kalmasına rağmen kesintisiz üretim sayesinde toplam verimlilik yükselmiştir.
- Azalan personel ihtiyacı ve artan üretim hacmi sonucunda birim üretim maliyetlerinde %10 - 12 arasında düşüş sağlanmıştır.

3.5 Operatör Ergonomisi ve İş Güvenliği

- Manuel yolluk ayırma işlemi, sıcak ürünlere doğrudan temas, eldiven kullanımı gerekliliği ve uygulanan kuvvet nedeniyle ergonomik riskler ve iş kazası ihtimalini artırıyordu.

- Robotik otomasyon sayesinde yolluk ayırma tamamen robot tarafından gerçekleştirilmiş, operatörlerin sıcak parçalarla fiziksel teması ortadan kalkmıştır.
- Böylece operatörlerde kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları ve iş kazaları riski önemli ölçüde azalmış, iş sağlığı ve güvenliği koşulları iyileştirilmiştir.
- Ayrıca, operatörlerin manuel işlere ayırdığı zaman ve efor azalarak üretim kalitesi ve iş sürekliliği artmıştır.

Bu sayısal ve nitel analizler, robotik otomasyon sisteminin enjeksiyon kalıplama hattında verimlilik, kalite, iş güvenliği ve maliyetler açısından önemli iyileştirmeler sağladığını açıkça göstermektedir. Ayrıca, Endüstri 4.0 prensiplerine uygun şekilde dijitalleşen süreçler, üretim altyapısının sürdürülebilir ve rekabetçi hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada özetle, enjeksiyon kalıplama hattında manuel yolluk ayırma ile robotik otomasyon entegrasyonunun üretim sürecine etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, robotik sistem ve sıcak meme uygulamasının kırma bıçaklarının dayanıklılığını %40 artırarak yaklaşık 4.2 aya yükselttiğini, bıçaklara dengesiz yük binmesini önleyerek bakım ve yedek parça maliyetlerini azalttığını göstermektedir. Manuel süreçte 10 vardiya boyunca toplam 10 kalıp pimi kırılırken, robotik otomasyon ile bu olay neredeyse tamamen ortadan kalkmış, böylece 20 saatlik plansız duruş ve üretim kaybı engellenmiş ve kalıp bakım maliyetlerinde %25'e varan tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca operatör verimliliği artmış, bir operatörün sorumlu olduğu makine sayısı 2 adetten 3 adete yükselmiş, ergonomik riski yüksek yolluk ayırma işleri robotlara devredildiği için fiziksel iş yükü ve yorgunluk azalmış, kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları ve iş kazası riski önemli ölçüde düşmüştür. Sıcak meme sistemi sayesinde kalıp içi yolluk kalma sorunu ortadan kalkmış, plansız duruşlar haftada ortalama 5 defadan 1 defanın altına düşmüş, üretim sürekliliği ve toplam verimlilik artmış, birim üretim maliyetleri %10 - 12 oranında azalmıştır. Tüm bu bulgular, robotik otomasyonun enjeksiyon kalıplama süreçlerinde verimlilik, kalite, iş güvenliği ve maliyet avantajları sağladığını ve Endüstri 4.0 odaklı dijitalleşen süreçlerin üretim altyapısının sürdürülebilir ve rekabetçi olmasına katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır.

References

[1] Industry Standard Design Magazine (2023, March 15). *What is injection molding and its 5 key advantages in furniture manufacturing*.

[2] https://www.fuhrung.com/technical-blog/the-application-and-advantages-of-injection-molding-machines-in-furniture-manufacturing.html

[3] Grand View Research (n.d.). *Injection molded plastic market size, share & trends analysis report by raw material (PP, ABS, HDPE, LDPE, PS, PE, PVC, PET, PU, PEEK), by application (packaging, building & construction, automotive & transportation, electrical & electronics, medical), by region, and segment forecasts, 2024 - 2030.*

[4] Grand View Research. (2024, May). *Injection molding market size, share & trends analysis report by material (Plastics, Metal, Others), application (Packaging, Consumables & Electronics, Automotive & Transportation), region, and segment forecasts, 2024–2030.*

[5] BCC Research. (2024, July). *Injection molding global markets and technologies*. BCC Publishing.

[6] Straits Research. *Plastic injection molding market size, share & trends analysis report by raw material (polypropylene, acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polystyrene, polyethylene, polyvinyl chloride (PVC), polycarbonate, polyamide, acrylonitrile butadiene styrene, high density polyethylene, other raw materials), by application (packaging, building and construction, consumer goods, electronics, automotive and transportation, healthcare, other applications) and by region (North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) forecasts, 2025–2033*.

[7] Market Research Future. *Extensive Demand for Injection Molded Plastics in Packaging Industry to Boost the Global Market at a CAGR of around 3.69% during the Forecast Period Source.*

[8]: Saraç, Tuğba, and Aydin Sıpahıoğlu. "PLASTİK ENJEKSİYON MAKİNALARININ ÇİZELGELENMESİ PROBLEMİ." *Journal of Industrial Engineering (Turkish Chamber of Mechanical Engineers)* 20.2 (2009).

[9]: Kaulen, Nicolas, et al. "Robot-aided quality inspection of plastic injection molding parts using an AI anomaly detection approach." (2025).

[10]: Aminabadi, Saeid Saeidi, et al. "Industry 4.0 in-line AI quality control of plastic injection molded parts." *Polymers* 14.17 (2022): 3551.

[11]: GR Robot, "Plastik Enjeksiyon Makinelerinde Robotla Otomasyon Uygulamaları," https://www.egrrobot.com/plastik-enjeksiyon-makinelerinde-robotla-otomasyon-uygulamalari/

[12]: Polly. (2020, June 26). *How Robotics Work in the Plastic Injection Molding Industry*.

[13]: Automation in plastic injection moulding – overview, applications and benefits, OGM.

[14]: Bernier, C. (2022, December 21). *Injection molding robots: Automating the complete process*. HowToRobot.

[15]: Asadi, Mohammadreza, Seyedeh Sogand Hashemi, and Mohammad Taghi Sadeghi. "Injection molding inspection system based on machine vision." *2021 9th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*. IEEE, 2021.

[16] Aminabadi, Saeid Saeidi, et al. "Industry 4.0 in-line AI quality control of plastic injection molded parts." *Polymers* 14.17 (2022): 3551.

[17]: Kim, Jong-Su. "Development of a injection molding automation system of busbar insert for the electric vehicle." *Design & Manufacturing* 18.2 (2024): 35-40.

[18] Silva, F. J. G., et al. "A Novel automated system for the handling of car seat wires on plastic over-injection molding machines." *Machines* 9.8 (2021): 141.

[19]: Costa, Rúben, et al. "Increasing the sustainability of manufacturing processes in plastic injection: recovering out-of-service robots to eliminate manual assembly operations." *Sustainability* 14.19 (2022): 12300.

[20]: Sinchai, Ananta, Kunthorn Boonyang, and Thanakorn Simmala. "Development of a Low-Cost Automated Injection Molding Device for Sustainable Plastic Recycling and Circular Economy Applications." *Inventions* 9.6 (2024): 124.

AŞIRI PLASTİK DEFORMASYONUN Zn-15Al-3Cu ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ALPER KAĞAN BEKİRCAN [1], MUHAMMET UZUN [1], SADUN KARABIYIK[1], MURAT HACIOSMANOĞLU[2], YASİN ALEMDAĞ[*1], ALİ PAŞA HEKİMOĞLU[2], TEMEL SAVAŞKAN[3]

[1] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE
[2] Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE
[3] Haliç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

Özet

Zn-Al-Cu esaslı alaşımlar yüksek özgül mukavemet ve aşınma direnci ile ön plana çıkmakta ve düşük maliyetlerde üretilebilmektedir. Bu alaşımların üstün mukavemet ve aşınma özellikleri çinko ve alüminyumca zengin katı çözelti fazlarına (η ve α) ve bakırca zengin metaller arası bileşiklere (ε, θ ve T′) dayandırılmaktadır. Çinkoca zengin fazın oksidinin yağlayıcı gibi davranarak, alüminyumca zengin fazın oksidinin ve bakırca zengin sert fazların ise yük taşıma görevi yaparak alaşımın aşınma performansını artırmaktadır. Ancak düşük süneklik bu alaşımlar için bir dezavantaj olup, uygulanan geleneksel ısıl işlemler ile yeterli süneklik elde edilmemektedir. Yeterli süneklik için aşırı plastik deformasyonu (APD) içeren bir takım termomekanik işlemler geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında su verme işlemi uygulanmış Zn-15Al-3Cu alaşımına çok yönlü dövme işlemi (ÇYD) uygulanmış, bu işlemin söz konusu alaşımın yapı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda Zn-15Al-3Cu alaşımı 340 °C sıcaklıkta 36 saat süre ile çözeltiye alınmış, su verilerek soğutulduktan sonra oda sıcaklığında dokuz pasoya kadar çok yönlü dövülmüştür. Dövme işlemi her bir pasoda gerçek birim şekil değiştirme oranı 0,69 olacak şekilde serbest şekil değişimine tek yönde izin veren bir kalıpta oda sıcaklığında yapılmıştır. Alaşımın içyapısı optik mikroskop (OM) ve X-ışınları difraksiyonu (XRD) ile incelenmiş, mekanik özellikleri ise mikrosertlik ve çekme deneyleri yardımıyla belirlenmiştir. Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin kırık yüzeyleri tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Döküm durumundaki alaşımın içyapısının η, α ve ε ($CuZn_4$) fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Su verilmiş durumundaki alaşımın içyapısının ise çinkoca zengin β fazı ile bu fazı ağ şeklinde çevreleyen η fazından oluştuğu görülmüştür. ÇYD işleminden sonra η fazının kırılarak içyapıya dağıldığı ve artan çevrim sayısıyla bu dağılımın homojenleştiği görülmüştür. Alaşımın sertlik, akma ve çekme dayanımının artan paso sayısı ile düştüğü, sünekliğinin ise %6,5 seviyesinden %114'e çıktığı belirlenmiştir. Dökülmüş ve çözündürülmüş durumdaki alaşımın kırılma yüzeylerinin klivaj düzlemlerinden, ÇYD sonrası ise bu yüzeylerin çukur ve çekme yönünde uzamış liflerden oluştuğu gözlenmiştir.

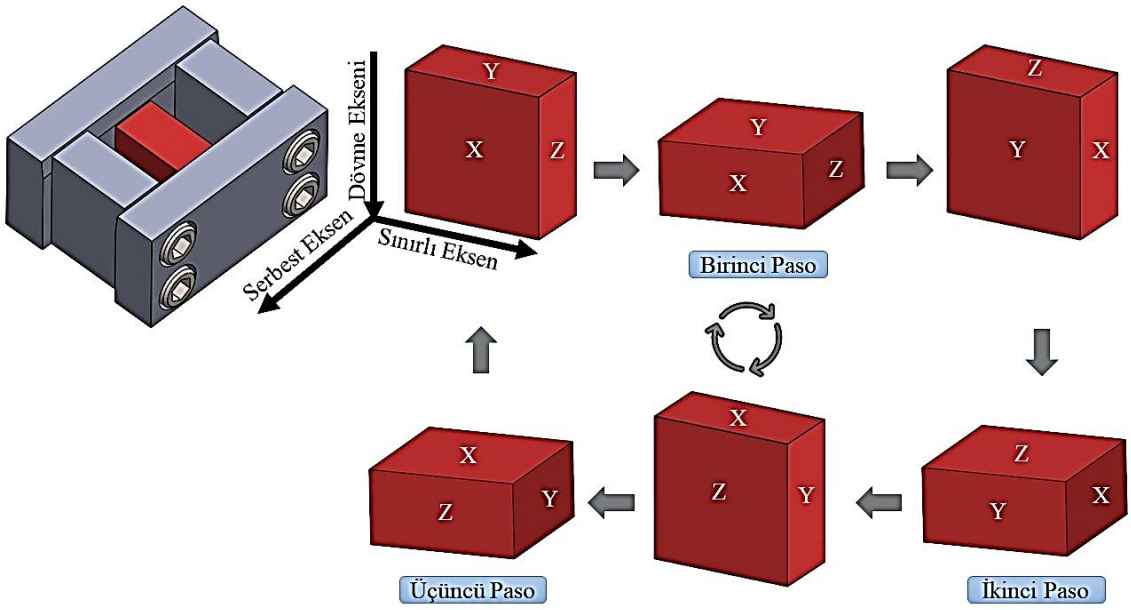
Anahtar Kelimeler: Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlar, Aşırı Plastik Deformasyon, Çok Yönlü Dövme, Mekanik Özellikler, Mikroyapı, Kırılma Yüzeyleri

1. Giriş

Bronz, pirinç ve dökme demir gibi metallere göre daha düşük üretim maliyeti, yoğunluk, sürtünme katsayısı ve daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu ortaya konulan çinko-alüminyum esaslı alaşımlar özellikle kaymalı yatak uygulamalarında bu geleneksel malzemelerin yerine başarı ile kullanılabilme potansiyeline sahiptir [1,2]. Ancak söz konusu alaşımların düşük süneklik sergilemesi endüstriyel kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Düşük süneklik özelliği bu alaşımların dentritik yapısı ile birlikte içyapısında bulunan çinko ve bakırca zengin fazlardan kaynaklanmaktadır [3]. Döküm sonrası doğrudan yaşlandırma (T5) ve aşırı yaşlandırma (T7) gibi çeşitli ısıl işlemlerle bu alaşımların süneklik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik bazı araştırma çalışmaları yapılmış, ancak söz konusu çalışmalarda sınırlı iyileşmeler elde edilebilmiştir [4]. Aşırı plastik deformasyon yöntemleri kullanılarak yapılan bir takım çalışmalarda ise Zn-esaslı alaşımların sünekliğinin bu yöntemler ile önemli oranda artırılabileceği gözlenmiştir [5,6]. Söz konusu yöntemlerin başında eş kanallı açısal presleme (EKAP), birikimli bağ haddesi (BBH) ve çok yönlü dövme (ÇYD) işlemleri gelmektedir [7]. Bu yöntemler arasında ÇYD işlemi diğer yöntemlere kıyasla endüstriyel uygulanabilirlik ve düşük yatırım maliyeti ile ön plana çıkmaktadır [8]. Literatürde bu yöntemlerin ikili Zn-Al alaşımlarının mekanik özelliklerine etkilerinin araştırıldığı bazı çalışmalar mevcuttur [9,10]. Ancak farklı paso sayılarında uygulanan ÇYD işleminin çözündürme ve su verme işlemleri uygulanmış Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapı ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada farklı paso sayılarında uygulanan ÇYD işleminin çözündürülüp su verilen üçlü Zn-15Al-3Cu alaşımının yapı ve mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

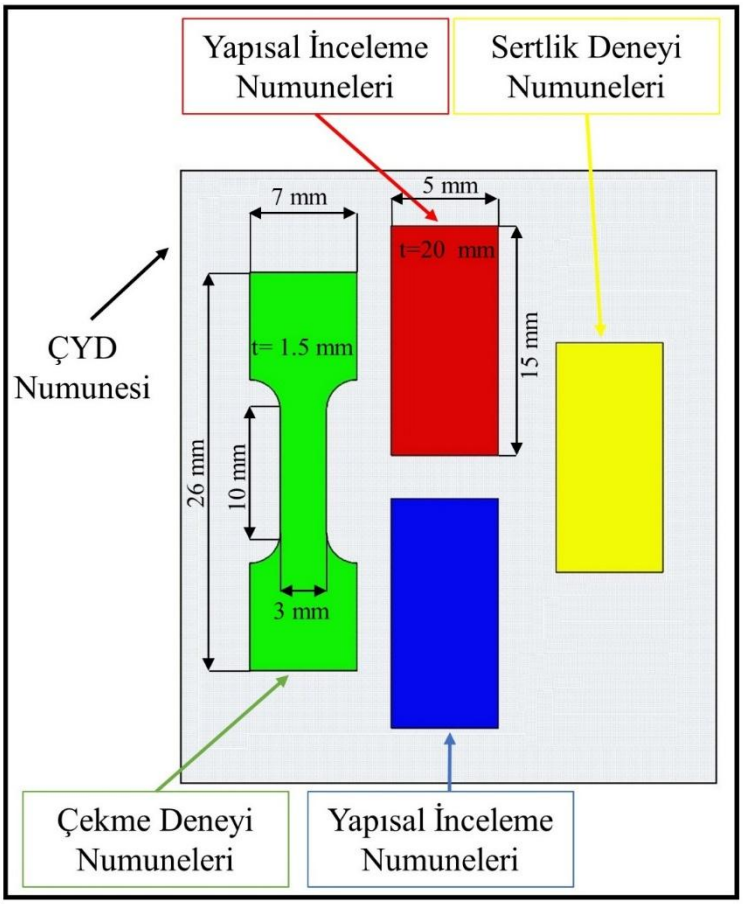
2. Yapılan Çalışmalar

Zn-15Al-3Cu alaşımı, sırasıyla %99,9 ve %99,7 saflıktaki çinko ve alüminyum ile %99,99 saflıktaki elektrolitik bakır kullanılarak üretildi. Söz konusu alaşım elementleri indüksiyon ocağında ergitildikten sonra yaklaşık 490 °C'lik bir döküm sıcaklığından oda koşullarında tutulan çelik bir kalıba dökülerek katılaştırıldı. Elde edilen alaşım külçelerinden Şekil 1'de işlem sırası verilen dövme işlemi için 40x40x20 mm^3 boyutlarında numuneler üretildi. Bu numenelere 340 °C sıcaklıkta 36 saat çözeltiye alma ısıl işlemi uygulandı ve su verilerek hızlı bir şekilde oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Söz konusu numunler bir yönde serbest şekil değişimine olanak tanıyan açık bir kalıba yerleştirildi. Kalıp ve numunler yerleştirme işlemi öncesinde yüksek basınç gresi kullanılarak yağlandı. Bu işlemlerin ardından numunler 150 ton kapasiteli bir preste 1 mm/s pres hızında ve oda sıcaklığında üç ana eksen yönünde ÇYD işlemine tabi tutuldu. Numunelere her bir pasoda 0,69'luk gerçek birim şekil değişimi uygulandı. Dövme işlemi üç paso (bir çevrim), altı paso (iki çevrim) ve dokuz paso (üç çevrim) şeklinde gerçekleştirildi.



Şekil 1. Dövme işleminde kullanılan kalıbın ve bir çevrim çok yönlü dövme işleminin şematik gösterimi

Metalografik incelemeler ile sertlik ve çekme deneylerinde kullanılan numunelerin boyutları Şekil 2'de verilmiştir. Metalografik incelemeler için numuneler standart metalografi yöntemleri ile hazırlandı ve %3 oranında nitrik asit (HNO_3) içeren Nital çözeltisi içerisinde dağlandı. Bu numunelerin içyapıları optik mikroskop (OM) ile incelendi ve görüntüleri çekildi. Numunelerin içyapısını oluşturan fazlar X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemi ile belirlendi. Numunelerin sertlikleri Vickers mikrosertlik ölçüm cihazında 4,91 N yük altında 10 saniyelik batma süresinde ölçüldü. Çekme deneyleri 5 x 10^{-4} s^{-1}'lik deformasyon hızında ve oda sıcaklığında yapıldı. Çekme deneyi sonrası elde edilen kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. Çekme deneyleri ve mikrosertlik ölçümleri sırasıyla en az beş ve on defa tekrar edilerek elde edilen değerlerin ortalaması çekme dayanımı ve mikrosertlik değeri olarak alındı.



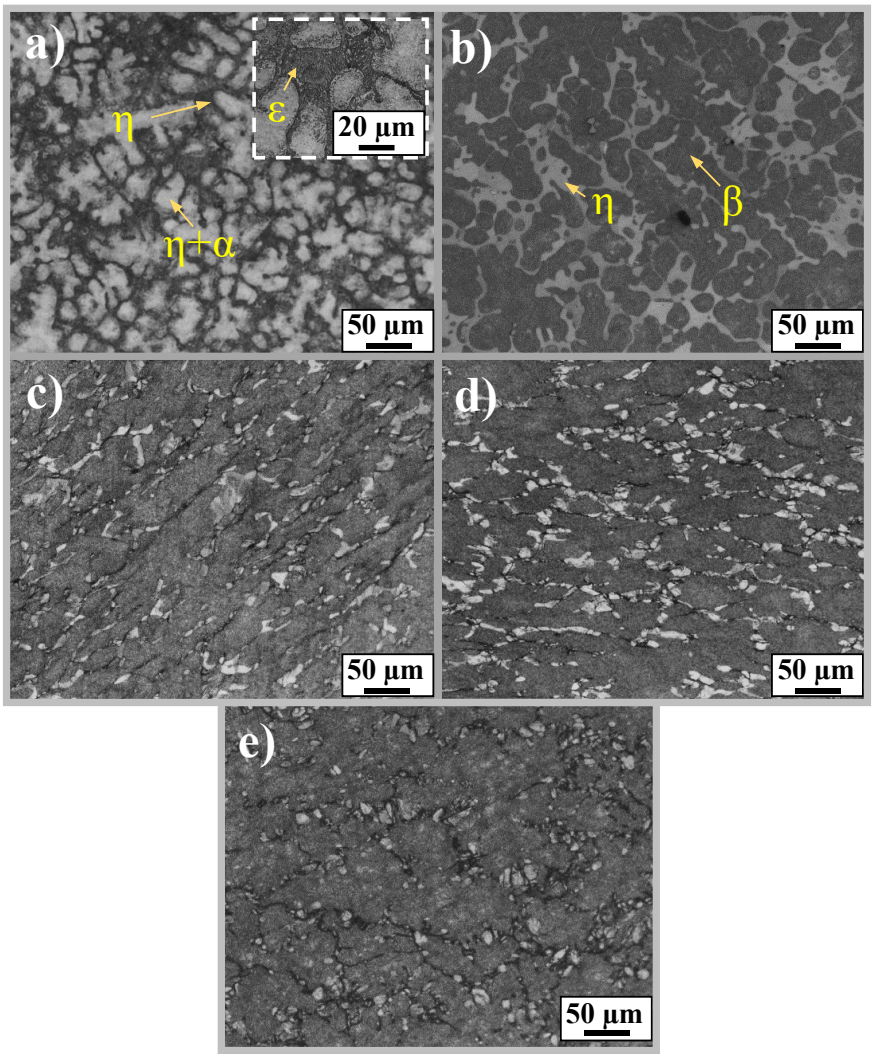
Şekil 2. Yapısal incelemelerde ve mekanik deneylerde kullanılan numunelerin dövülen parçadan alındıkları yerlerini ve boyutlarını gösteren şematik resim

3. Bulgular ve Tartışma

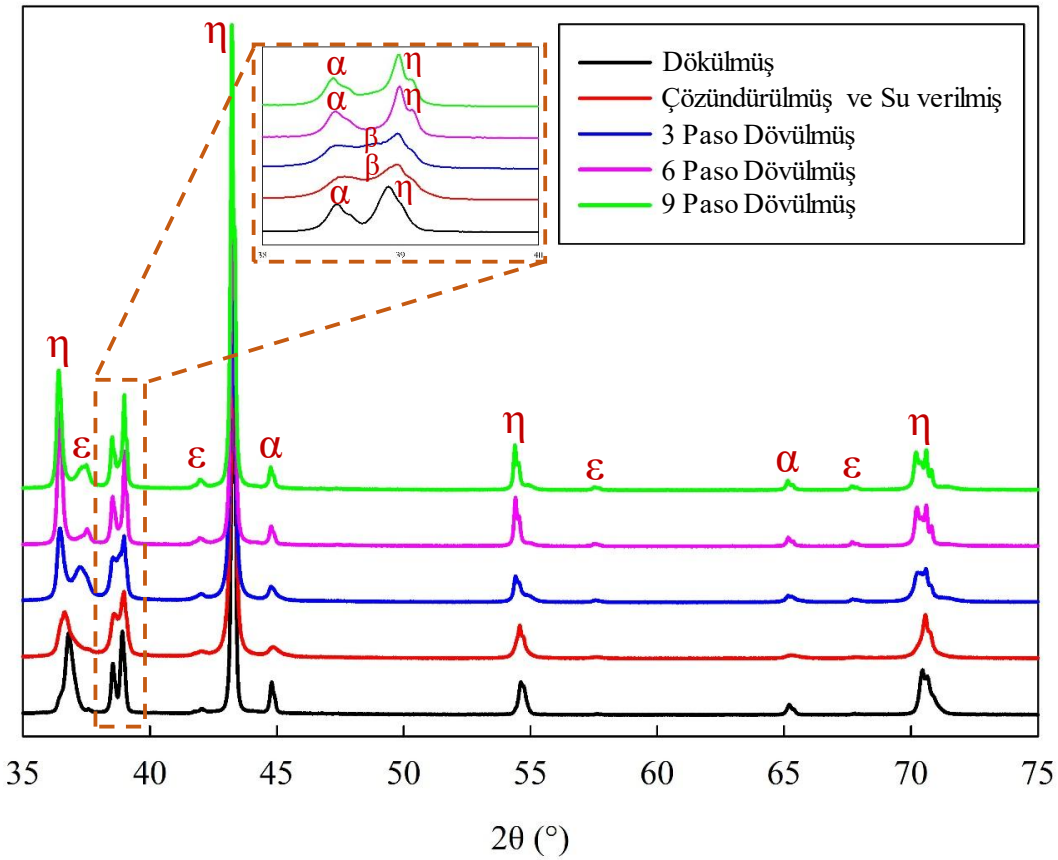
Dökülmüş, çözündürülmüş, su verilmiş ve 3 çevrime kadar dövülmüş Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapısına ait OM görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir. Dökülmüş durumdaki Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapısının η, β (α+η) ve ε ($CuZn_4$) fazlarından oluştuğu belirlenmiş olup, bu fazlar Şekil 4'de verilen XRD desenleri ile doğrulanmıştır. η fazı katılaşma sırasında alüminyumun çinko içerisinde çözünmesiyle oluşmaktadır. β fazı ise yüksek sıcaklık fazı olup alüminyum ve çinkonun birbiri içerisinde çözünmesiyle oluşan bir katı çözeltidir [3,11]. β fazı döküm sonrası katılaşma koşullarına bağlı olarak ötektoid dönüşüm ile α ve η fazına ayrışabilmektedir. Genellikle çinkoca zengin dendiritik η faz bölgesinde yer aldığı gözlenen ε ($CuZn_4$) fazının ise η ve α fazları içerisinde çözünemeyen bir başka deyişle çözünürlük sınırını aşan fazlalık bakırın çinko ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşan bir bileşik olduğu bilinmektedir [1,3,11].

Çözündürme işlemi ardından su verilmiş durumundaki alaşımın içyapısının çinkoca zengin β fazı ile bu fazı ağ şeklinde çevreleyen η fazından oluştuğu görülmüştür (Şekil 3-b). β fazı çözündürme işlemi sırasında η+α fazın dönüşümü sonucunda oluşmaktadır [10,12]. Şekil 4'de sunulan XRD sonuçlarında yaklaşık 38-39° Bragg açıları arasında meydana gelen pik değişimi bu bulguyu doğrular niteliktedir. Çözündürme işleminin ayrıca döküm durumunda η dentritleri içerisinde yer alan ε ($CuZn_4$) fazının nispeten çözünmesine yol açtığı gözlenmiştir.

Üç paso dövme işlemi sonrasında β dendritlerini çevreleyen η fazının parçalanmış bir şekilde içyapıda dağılım sergilediği ve boyutunun belirgin bir biçimde inceldiği görülmektedir (Şekil 3-c). Artan paso sayısı ile söz konusu η faz bölgelerinin azalarak dağılımının homojenleştiği, yapısal yönlenmelerinin azaldığı ve ayrıca β faz bölgelerinde daha belirgin bir şekilde η çökeltilerinin oluştuğu görülmüştür. XRD desenleri altı ve dokuz paso dövme işleminden sonra η fazının daha net ve ayrık bir şekilde ortaya çıktığını bir başka deyişle yoğunluğunun arttığını doğrulamaktadır.



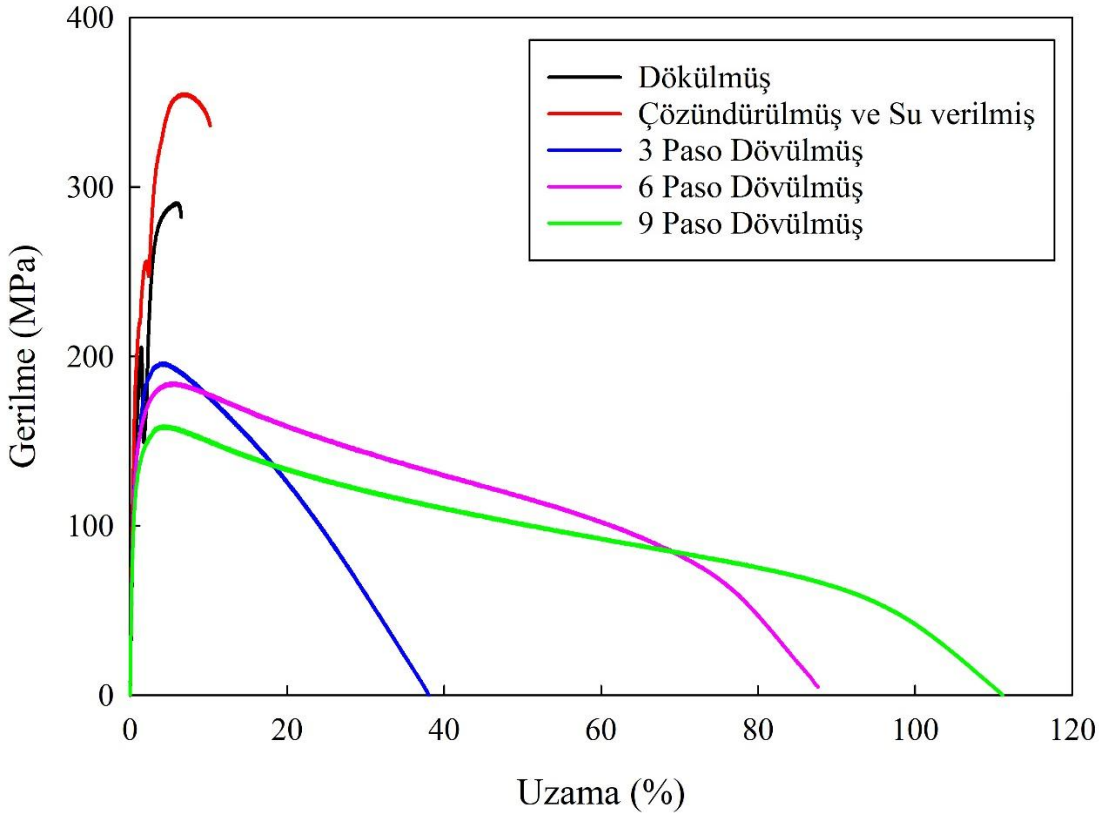
Şekil 3. a) Dökülmüş, b) çözündürülmüş ve su verilmiş ve c-e) sırasıyla üç, altı ve dokuz paso dövme işlemi uygulanmış Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapısına ait OM görüntüleri



Şekil 4. Dökülmüş, su verilmiş ve çok yönlü dövülmüş Zn-15Al-3Cu alaşımına ait numunlerin XRD desenleri

Çekme deneyine tabi tutulmuş Zn-15Al-3Cu alaşımına ait numunelerin mühendislik gerilmesi-yüzde uzama eğrileri Şekil 5'te, bu eğrilerden belirlenen çekme verileri ile numunelerin sertlikleri Tablo 1'de verilmiştir. Su verme işleminden sonra numunenin akma ve çekme dayanımları ile sertliği ve kopma uzaması bir miktar artış sergilemiştir. Bu artış β ve η fazlarındaki değişime dayandırılarak açıklanabilir [3,12]. Şöyle ki, dökülmüş durumda alaşımın içyapısı tane sınırlarında ağ yapısı oluşturacak şekilde daha yoğun miktarda η fazı ile çevrili β faz bölgelerinden oluşmakta iken çözündürme ve su verme işleminden sonra η fazının yoğunluğunun azaldığı, η ve ε fazlarının önemli ölçüde çözündüğü ve yapının daha homojen bir hale geldiği, kalan η fazlarının ise daha ince, dağınık ve ayrık hâlde olduğu gözlenmiştir, Şekil 3. Dökülmüş durumda tane sınırlarındaki ağ şeklindeki çinkoca zengin η ve ε bileşiğinin çatlak oluşumunu ve ilerlemesini kolaylaştırarak alaşımın nispeten düşük dayanım sergilemesine neden olduğu ve malzemenin plastik deformasyon kapasitesini sınırladığı düşünülmektedir. Buna karşın, çözündürme ve ani su verme sonrası, bu fazların süreksiz dağılım göstermesinin dislokasyonların ilerlemesini yavaşlattığı ve deformasyon sırasında çatlak ilerlemesine karşı direncin artmasına neden olduğu düşünülmektedir [3,12]. Bu değişimlere ilave olarak çözündürme ve su verme işlemi sonrasında β fazı içerisinde çinkoca zengin η çökeltilerinin oluşmasının ve bu çökeltilerinin β fazı içerisinde neredeyse homojen bir dağılım göstermesinin katı çözelti ve dispersiyon sertleşmesi mekanizmalarının oluşumuna yol açarak mukavemet ve sünekliğin artmasına önemli ölçüde katkı sağladığı düşünülmektedir [12,13].

Üç paso dövme işleminden sonra numunenin kopma uzamasının %9,70'ten %42,60'a yükseldiği ancak çekme ve akma dayanımını ile mikrosertliğinin sırasıyla 365,10 MPa'dan 187,40 MPa'a, 264,10 MPa'dan 143,40 MPa'a ve 129,10 HV'den 98,50 HV'e düştüğü belirlenmiştir. Kopma uzamasında meydana gelen bu artış β fazı etrafında yer alan η fazının kırılarak içyapıya dağılması sonucu çatlak oluşturma eğiliminin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Numunenin mekanik özelliklerinde ve sertliğinde meydana gelen düşüş ise çinko esaslı fazların dövme enerjisi ile yeniden kristalleşmesi sonucu dislokasyon yoğunluğunun azalmasından kaynaklanmış olabilir [6,14]. Diğer taraftan numunenin sünekliğinin artan paso sayısıyla artttığı, mukavemet ve sertlik değerlerinin kademeli bir şekilde azaldığı görülmüştür. Numunenin sünekliğindeki artış β fazını çevreleyen η fazının boyutunun küçülerek içyapıya homojen bir şekilde dağılmasından kaynaklanmış olabilir. Diğer taraftan β fazının altı paso dövme işleminden sonra η+α fazına ayrışması dislokasyon hareketlerini kolaylaştırarak alaşımın mekanik ve sertlik değerlerinin düşmesine yol açmış olabilir [12].

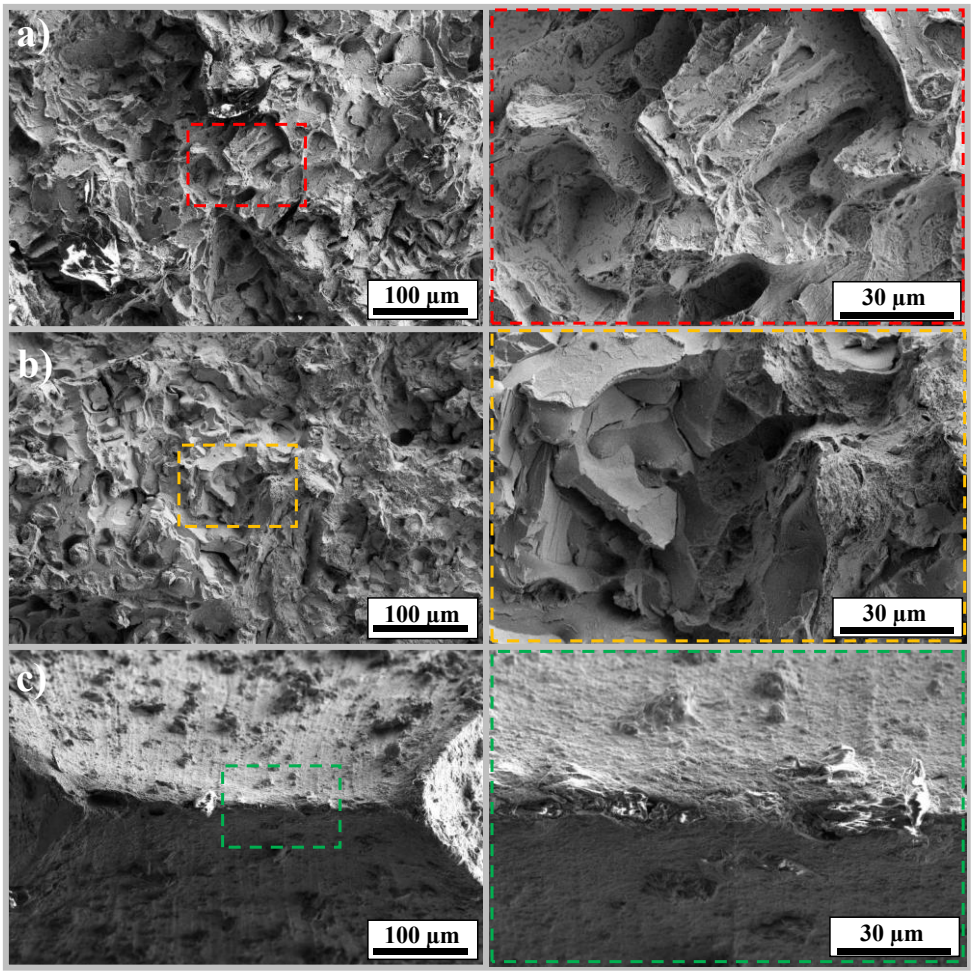


Şekil 5. Zn-15Al-3Cu alaşımının uygulanan işlemler sonrası elde edilen mühendislik gerilme yüzde uzama eğrileri

Tablo 1. Zn-15Al-3Cu alaşımına uygulanan işlemler sonrası elde edilen mekanik deney sonuçları

Numune Durumu	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Mikrosertlik ($HV_{0,5}$)
Dökülmüş	285,60 ± 13,30	216,10 ± 6,50	6,50 ± 1,80	105,10 ± 5,40
Çözündürülmüş ve Su verilmiş	365,10 ± 12,90	264,10 ± 9,10	9,70 ± 1,80	129,10 ± 3,80
3 Paso Dövülmüş	187,40 ± 8,10	143,40 ± 9,90	42,60 ± 8,60	98,50 ± 17,20
6 Paso Dövülmüş	177,10 ± 11,70	132,10 ± 13,20	80,50 ± 7,70	79,80 ± 6,50
9 Paso Dövülmüş	164,40 ± 4,60	122,40 ± 3,30	114,40 ± 4,90	71,50 ± 1,50

Çekme deneyine tabi tutulmuş numunelerin kırılma yüzeylerine ait SEM fotoğrafları Şekil 6'da sunulmuştur. Dökülmüş ve su verilmiş numunlerin kırılma yüzeylerinde gevrek kırılmayı karakterize eden yoğun klivaj düzlemlerinin yer aldığı görülmüştür. Dokuz paso dövülmüş numunenin yüzeyinde ise sünek kırılmayı karakterize eden çekme yönünde uzamış lifler ve kopma sonucu oluşmuş çukurların hakim olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6. Çekme deneylerine tabi tutulmuş a) dökülmüş, b) su verilmiş ve c) dokuz paso dövülmüş numunelerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri

4. Sonuçlar

Bu çalışma su verilmiş Zn-15Al-3Cu alaşımının iç yapısındaki β dendritlerini çevreleyen η fazının çok yönlü dövme işleminden sonra parçalandığını ve yapıya dağıldığını göstermektedir. Artan paso sayısı söz konusu η fazının boyutunu küçültmekte ve dağılımını homojenleştirmektedir. Belirtilen yapısal değişimler alaşımın sünekliğini önemli oranda artırmakta akma ve çekme dayanımları ile sertliğini ise düşürmektedir. Süneklikteki artış alaşımın gevrek kırılma davranışını sünek kırılma davranışına dönüştürmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimince desteklenen FBA-2025-2011 numaralı proje kapsamında, Karadeniz Teknik Üniversitesi ve Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Makine Mühendisliği ve Merkezi Araştırma Laboratuvarındaki cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazarlar emeği geçen tüm çalışanlara değerli katkılarından dolayı teşekkürlerini sunmaktadır.

Kaynaklar

[1] Savaşkan T., Hekimoğlu A.P., Pürçek G., Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys, Tribology International. **2004**, 37(1):45-50.
[2] Hekimoğlu, A. P., Savaşkan, T., Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun yağlı durumdaki aşınma karakteristikleri. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, **2018**, 33(1).
[3] Savaşkan T., Murphy S., Decomposition of Zn–Al alloys on quench–aging, Materials Science and Technology. **1990**, 6(8):695-704.
[4] Savaşkan, T., Azakli, Z., Hekimoğlu, A. P., Effect of heat treatment on mechanical and wear properties of Zn–40Al–2Cu–2Si alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, **2021**, 31(9):2651-2663.
[5] Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z. J., Zhang, Z. F., Effect of chemical composition and grain size on RT superplasticity of Zn-Al alloys processed by ECAP. Letters on materials, **2015**, 5(3):328-334.
[6] Cho, T. S., Lee, H. J., Ahn, B., Kawasaki, M., Langdon, T. G., Microstructural evolution and mechanical properties in a Zn–Al eutectoid alloy processed by high-pressure torsion. Acta materialia**, 2014**, 72:67-79.
[7] Kumar, H., Devade, K., Singh, D. P., Giri, J. M., Kumar, M., Arun, V., Severe plastic deformation: A state of art. Materials Today: Proceedings, **2023**.
[8] Uzun, M., Karabiyik, S., Alemdag, Y., Savaşkan, T., Effect of thermomechanical treatment on the microstructure and mechanical properties of Al-40Zn-3Cu alloy. Journal of Alloys and Compounds, **2025**, 1022:179894.
[9] da Silva, N. A. N., Pereira, P. H. R., Correa, E. C. S., Aguilar, M. T. P., Cetlin, P. R., Microstructural evolution and mechanical properties in a Zn–Al–Cu–Mg hypoeutectic alloy processed by multi-directional forging at room temperature. Materials Science and Engineering: A, **2021**, 801:140420.
[10] Sharath, P. C., Udupa, K. R., Kumar, G. P., Effect of multi directional forging on the microstructure and mechanical properties of Zn-24 wt% Al-2 wt% Cu alloy. Transactions of the Indian Institute of Metals, **2017**, 70(1):89-96.
[11] Savaşkan, T., Hekimoğlu, A. P. Microstructure and mechanical properties of Zn–15Al-based ternary and quaternary alloys. Materials Science and Engineering: A, **2014**, 603:52-57.

[12] Yang, L. I. U., JIANG, H. F., Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZA27 alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, **2013**, 23(3):642-649.
[13] Savaşkan, T., Hekimoğlu, A. P., Effect of quench–ageing treatment on the microstructure and properties of Zn-15Al-3Cu alloy. International Journal of Materials Research, **2015**, 106(5):481-487.
[14] Purcek, G., Saray, O., Kucukomeroglu, T., Haouaoui, M., Karaman, I., Effect of equal-channel angular extrusion on the mechanical and tribological properties of as-cast Zn–40Al–2Cu–2Si alloy. Materials Science and Engineering: A, **2010**, 527(15):3480-3488.

INVESTIGATING ALKALI–SILICA REACTION RESISTIVITY OF LIMESTONE AND QUARTZ AGGREGATES UTILIZED IN GAZİANTEP REGION

AHMET TAŞDEMİR [*1], ANIL NİŞ [2], ABDULKADİR ÇEVİK[3]

[1] Affiliation : Gaziantep University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Gaziantep, TÜRKİYE.
[2] Affiliation İstanbul Gelişim University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, İstanbul, TÜRKİYE.
[3] Affiliation : Gaziantep University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Gaziantep, TÜRKİYE

Abstract

Alkali-silica reaction (ASR) is one of the main durability problems that affects material deterioration and structural performance that lowers the service life of concrete structures. The silica content of the aggregate that will be dissolved in the high alkali pore solution is one of the primary causes of ASR. The ASR resistance of two locally accessible aggregates (quartz and limestone) in Gaziantep province, Turkey, as well as the physical and chemical effects of using them to produce mortar and concrete specimens based on Portland cement, were examined experimentally in this paper. For this purpose, mortar and concrete specimens produced with crushed limestone aggregate and quartz aggregate were exposed to ASR curing. ASTM C1260 and ASTM C1293 standards were followed to produce and test mortar and concrete specimens, respectively. ASR expansion, Ultrasonic pulse velocity (UPV), capillary water absorption, flexural strength and compressive strength and microstructural analysis (SEM-EDS) were conducted on specimens respectively. According to experimental test results, specimens showed cracks and the mortar and concrete made of quartz surpassed the ASTM standard expansion limitations. After curing, the compressive strength and flexural strength was decreased by up to 12% and 18% respectively when limestone was used in production, but they decreased by up to 15% and 22% respectively when quartz was used. Because curing environment was harsher in mortar this reduction was greater in mortar than in concrete. Conversely, ASR-cured specimens had greater flexural strength values than control specimens. Crack propagations in mortars were comparable to concrete, altough ASR products were observed on both materials in SEM analysis results. This study demonstrated the potential of local aggregates in Gaziantep province in terms of ASR prior to their use as building materials. Based on results crushed limestone can be used in production, but quartz aggregate might cause durability issues.

Keyword: Alkali silica reaction (ASR), Gaziantep aggregate, limestone aggregate, quartz aggregate, mortar and concrete, SEM-EDX

1. Introduction

Alkali silica reaction (ASR), regarded as concrete cancer, is one of the fundamental chemical problems encountered in the construction industry and reduces the lifespan of structures [1]. Concrete is now the most extensively utilized construction material in the world due to its tremendous versatility. The global output of concrete, which exceeds 10 billion tons yearly, is increasing by 2% every year. Still, the usage of concrete is at an all-time high [2].
In Portland cement (OPC)-based materials, Na+, K+, and OH- ions maintain the pH value of concrete at 12.5, and as the content of these alkali ions increases, the pH value of concrete increases [1]. Reactive silica present in aggregates dissolves, especially in solutions with high pH. Some aggregates (e.g., rhyolite) containing certain silica minerals (opal, obsidian, cristobalite, tridymite, etc.) and reactive minerals found in alkali hydroxides (Na and K) form a calcium alkali silicate hydrate gel known since the 1930s as the alkali-silica reaction (ASR) [2–4]. In ASR formation, alkali cations (Na^+ and K^+) are balanced by hydroxide ions (OH-) in addition to other low cations. This results in the formation of a structure with a high relative pH value [1]. In the presence of reactive aggregates, OH^- and alkali Na^+ and K^+ cations react with reactive silica (SiO_2) as shown in Equation below [5],

$$\text{Si-OH } OH^- + Na^+, K^+ \rightarrow \text{Si-O-Na, K} + H2O \quad (1)$$

$$\text{Si-O-Si} + 2OH^- + 2Na^+, K^+ \rightarrow 2(\text{Si-O-Na, K}) + H2O \quad (2)$$

Since the type of aggregate is significant on effecting ASR resistivity when used in production of construction materials such as mortar and concrete, they should be tested before using. However, there are very limited testing methods existed to prove the reactivity of aggregate in terms of ASR which detect the harmfulness of them in production whether deleterious. Mass sources of aggregates are varied in the world and need to be tested before using in production of construction materials. Therefore, in this study we aimed to to contribute the suggestion to construction material producers and users by examining ASR resistivity of two types of aggregates utilized in Gaziantep province Turkey by producing mortar and concrete with them and exposing ASR curing on them. Moreover, the effects on physical and mechanical properties of materials will be compared to reveal the ASR resistivity.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

In this study, potential reactive and nonreactive mortar and concrete specimens in terms of alkali silica reaction (ASR) were produced by following widely used ASTM C1260 [6] and ASTM C1293 [7] standards, respectively. Each mortar and concrete specimens were produced in both potential reactive and nonreactive form by using reactive (quartz) aggregates or nonreactive (crushed limestone) aggregates for comparison. Quartz and crushed limestone utilized by local companies in Gaziantep province. Quartz and crushed limestone aggregates used in the study are shown in Figure 1 and X-ray diffraction (XRD) test results showing the phase composition and crystal structure of the aggregates were given in Figure 2.
High alkali (0,8 Na_2O equivalent) Portland cement in addition to extra NaOH in pallet form were used to produce concretes to satisfy criteria of ASTM C1293 standard [7]. Same cement were also used in mortar for comparison. Extra Required polycarlboxylic superplasticizer was also added to mixes in proper amount to achieve adequate workability.

Physical and chemical properties of materials used raw materials are given in Table 1 while properties of sodium hydroxide and superplasticizer are given Table 2.

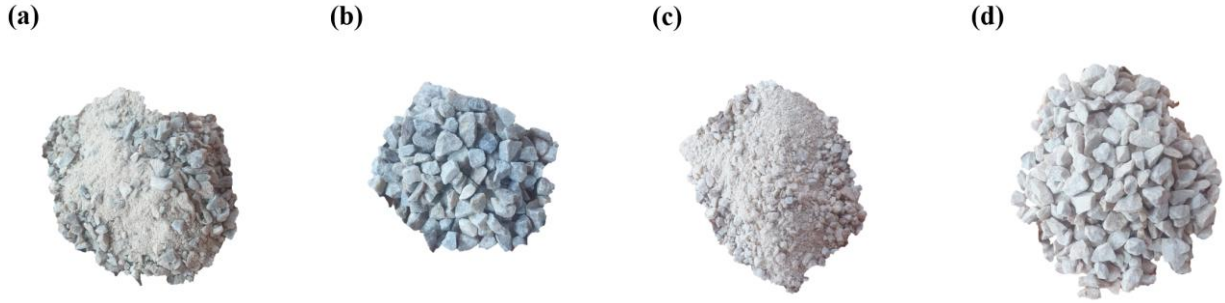


Figure 1. Aggregates, a) fine and b) coarse quartz; c) fine and d) coarse limestone

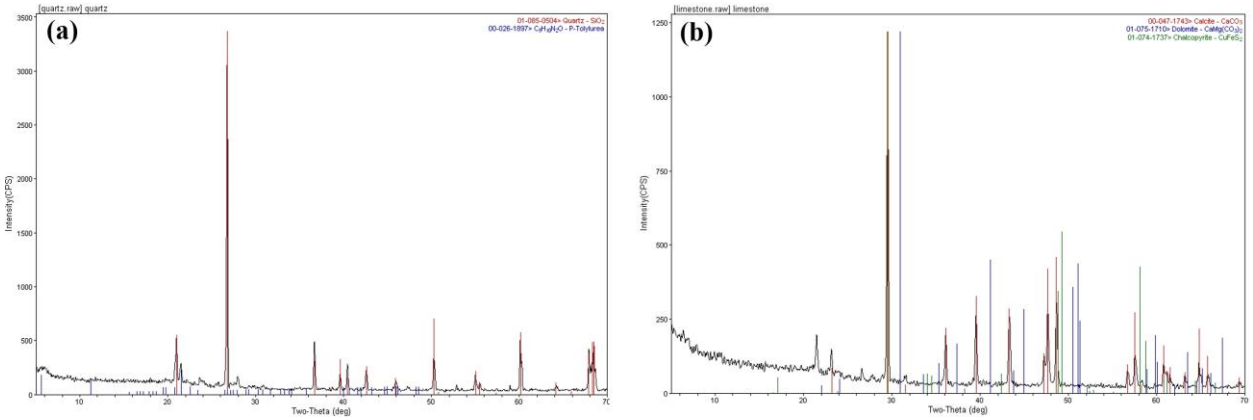


Figure 2. X-ray diffraction (XRD) analysis results, a) quartz, b) limestone aggregates

High alkali (0,8 Na_2O equivalent) Portland cement in addition to extra NaOH in pallet form were used to produce concretes to satisfy criteria of ASTM C1293 standard [7]. Same cement were also used in mortar for comparison. Extra Required polycarlboxylic superplasticizer was also added to mixes in proper amount to achieve adequate workability. Physical and chemical properties of materials used raw materials are given in Table 1 while properties of sodium hydroxide and superplasticizer are given Table 2.

Table 1. Physical properties and chemical contents of raw materials used in production

Material	Physical Properties			Chemical Contents %								
	Specific Gravity	Los of Ignition	Color	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Other
Quartz	2.65	-	grey	90,70	4,84	1,55	0	0,11	0	1,93	0.08	0,90
Limestone	2.51	-	cream	1,907	-	0,957	96,93	-	-	-	-	0,206
Portland Cement (CEM I 42,5R)	3.14	3.02	dark grey	18,10	4,80	3,21	63,26	3,16	3,22	0,57	0,40	9,72

Table 2. Properties of sodium hydroxide and superplasticizer used in production

Sodium hydroxide (NaOH)	**NaOH**	**NaCl**	**Na_2CO_3**	**Fe**	**Ar**	**Density (20°C)**	**Molecular Weight**	**Form/ Color**
	min. 98.0 %	max. 0,10 %	max. 0.40 %	Max. 0.15	<2	2,13 g/cm3	40,01 mol/g	Solid Flake Pallet/ Off white
Superplasticizer	**Material structure**	**Chlorine Ion Content (%) (EN 480-10)**	**Alkaline Content (%) (EN 480-12)**	**pH value**	**Corrosion behaviour**	**Density**	**Dynamic Viscosity (23°C)**	**Form/ Color**
	Polycarboxylate ether-based SP	< 0,1	< 3,0	5-8	Comply with EN 934 1,2012 Standard[8]	1 – 1.1 g/cm3	< 60 mPa.s	Liquid / Green

2.2. Experimental Program

Mortars were produced in three different forms, 25x25x285 mm^3 mortar bars and 40x40x160 mm^3 prisms and 70x70x70 mm^3 cubes. All mortar specimens were produced by using nonreactive limestone aggregate and quartz aggregate having sizes of less than 4,75 mm. Concretes were produced as 75x75x285 mm^3 concrete prisms. Less than 4,75 mm were used as fine aggregate and less than 8mm as coarse aggregate to prepare concrete specimens. Mix design of fine aggregate used to produce mortar were sieved according to ASTM C1260 standard and coarse aggregates were included to fine aggregate to produce concrete where aggregate mix met the requirements of the aggregate grading curve in DIN EN 12620 standard, conforming to the region of A-B as shown in the Table 3, which corresponds to the area of well-graded aggregate [9]. Mortar and concrete specimens were produced according to ASTM C1260 [6] and ASTM C1293 [7] standards respectively. Extra NaOH in pallet form was also added to concrete mix to increase alkali content specifically Na2O(eq) value in cement to 1,25% and satisfy content criteria of ASTM C1293 standard. Mix design for preparation of reactive and nonreactive mortars and concretes are given in Table 4.

Table 3. The sieve analysis of the used aggregates (percent aggregate passed through sieves)

Sieve size (mm)	**0.15**	**0.25**	**0.425**	**0.85**	**2**	**4.75**	**9.5**
Fine aggregate (%)	0	15	40	65	90	100	100
Coarse aggregate (%)	0	5	13,3	21,6	30	34	100

Tablo 4. Material mix design used to prepare mortars and concretes

Materials	Quantities			
	RM	NRM	RC	NRC
Cement	440	440	500	500
Fine Quartz	990	-	575	-
Coarse Quartz	-	-	1150	-
Fine Limestone	-	990	-	575
Coarse Limestone	-	-	-	1150
Water	206,8	206,8	225	225
Superplasticizer	-	-	3	3
Extra NaOH(s)	-	-	2,9	2,9

Figure 2. Testing procedures of specimens, a) ASR expansion measurements, b) UPV, c) capillary water absorption, d) flexural strength e) compressive strength f) SEM-EDX analysis

All mortar and concrete specimens were demoulded after 1 day from casting and were cured according to relevant ASTM standards [6, 7], mortars were soaked in a container were kept in an 80 °C oven which having water for 1 day, then having 1 N preheated NaOH solutions for 28 days, while concretes were cured in a water bath having 38 °C and 95% humidity for 360 days. During ASR curing, 25x25x285 mm^3 mortar bars and 75x75x285 mm^3 concrete prisms were taken out from bath and ASR expansions were measured. Length expansions were calculated as percentage changes in the lengths of mortar bars (285 mm) at 1, 3, 5, 7, 10, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56th days in line with the previous study [10],while that was calculated as percentage changes in the lengths of concrete prisms (285 mm) at 4, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270, and 360th days. For mechanical tests, 40x40x160 mm^3 mortar prisms were taken out from the containers after 28 days of curing and ultrasonic pulse velocity (UPV) test, capillary water absorption test, 3-point bending test, similarly and 70x70x70 mm^3 mortar cubes were taken out from the containers after 28 days compressive strength tests were applied to relevant specimens respectively. Same tests were also applied on 75x75x285 mm^3 concrete prisms after 360 days of curing. Both mortar and concrete specimens having same mix designs were also produced as control and all were kept in lab conditions for 28 days. Same mechanical tests were also applied on these control specimens too. Finally, samples were taken from broken mortar and concrete specimens exposed those were exposed to ASR for petrographic analysis such as scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). Figure 3 shows some testing procedures of mortar and concrete specimens.

3. Results and Discussions

3.1. ASR Expansion Results

56-days ASR expansion results of reactive and nonreactive mortars and 360-days ASR expansion results of reactive and nonreactive concretes and their visual inspections after ASR exposure are shown in Figure 4 and Figure 5 respectively.

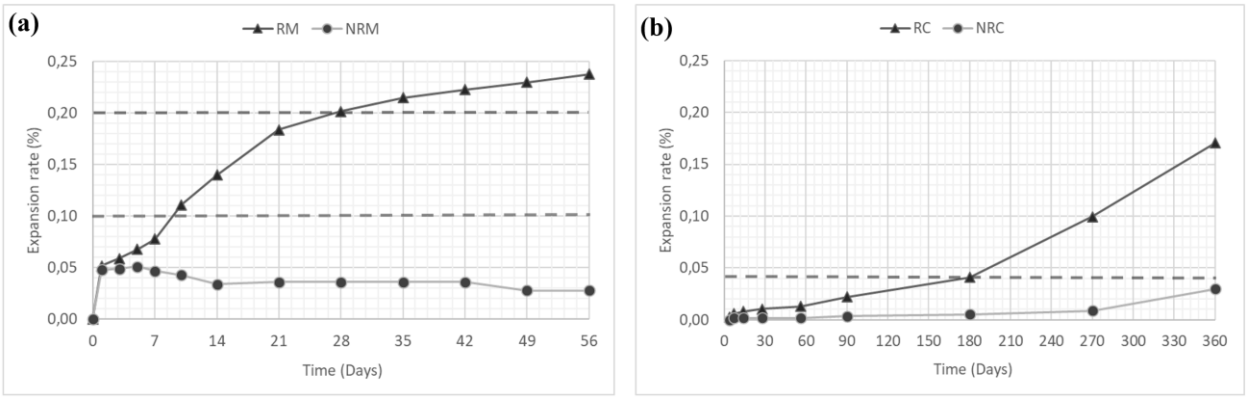


Figure 3. ASR expansion results of a) mortar bars b) concrete prisms (mortars - 56 days, concretes - 360 days)

According to the results shown in Figure 4(a), the expansion rate in ordinary Portland cement (OPC)-based mortar with reactive quartz aggregate was found to be 0.202% on day 28. This value reached 0.24% on day 56. Based on the results, the quartz used is considered potentially reactive. In ASR measurements performed with limestone aggregate, the expansion rate was found 0.03%

on both the 28th and 56th days. For this reason, the limestone aggregate used is not potentially reactive. According to the results shown in Figure 4(b), the expansion values obtained at the end of 360 days in the ASR measurements performed on samples produced with crushed limestone are less than the limit value of 0.04% specified in the ASTM C1293 standard [7], and therefore the aggregate is considered nonreactive.

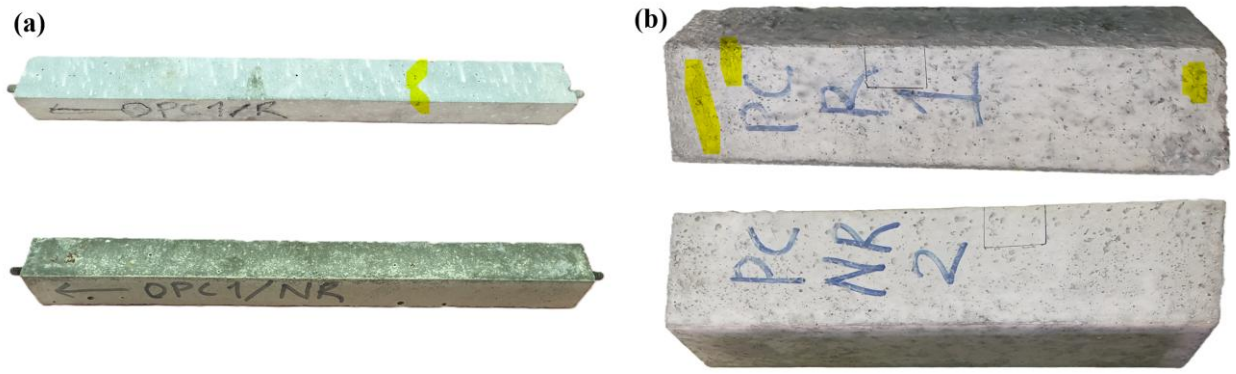


Figure 4. Visual inspections of reactive and nonreactive a) mortar, b) concrete specimens after ASR exposure (Yellow marked areas represent surface cracks)

In the ASR test performed on samples produced using quartz aggregate, the expansion amount in all samples exceeded the limit value of 0.04% in the ASTM C1293 standard [7], so quartz is considered potentially reactive. Based on the visual inspections after ASR curing, ASR crackings were observed on both mortar and concrete specimens produced with quartz aggregate while no crackings were found on specimens produced with limestone aggregate as shown in Figure 5. In a more advanced stage of harmful ASR, the alkali-silica gel reaction product may be extruded along fissures, even outside the concrete. While some species live with the leftover material and exhibit stationary behavior, some species with a strong gel affinity will be carried with the extruded gel [11, 12]. Both mortar and concrete expansion results according to relevant standards revealed consistent results on aggregates reactivity.

3.2. Ultrasonic Pulse Velocity Test Results

After ASR curing, ultrasonic pulse velocity (UPV) test was performed on 40x40x160 mm^3 mortar and 75x75x285 mm^3 concrete prism specimens in addition to control specimens. UPV test results of mortars and concretes are shown in Figure 5.
According to test results, UPV values for different materials mainly tends to decrease with curing in line with previous research [13]. Decrements in UPV results in mortars can be considered as slightly higher than in concrete specimens. Quartz based materials have higher strength results compared to limestone-based materials. Since, the silica dissolved in the quartz aggregate contributes to the formation of C-S-H and N-A-S-H gels might have filled these pores and resulted increment in strengths hence UPV results. Because some SiO2 species, such as opal, chert, and chalcedony, are particularly interesting in relation to the alkali–silica interaction [12, 14].

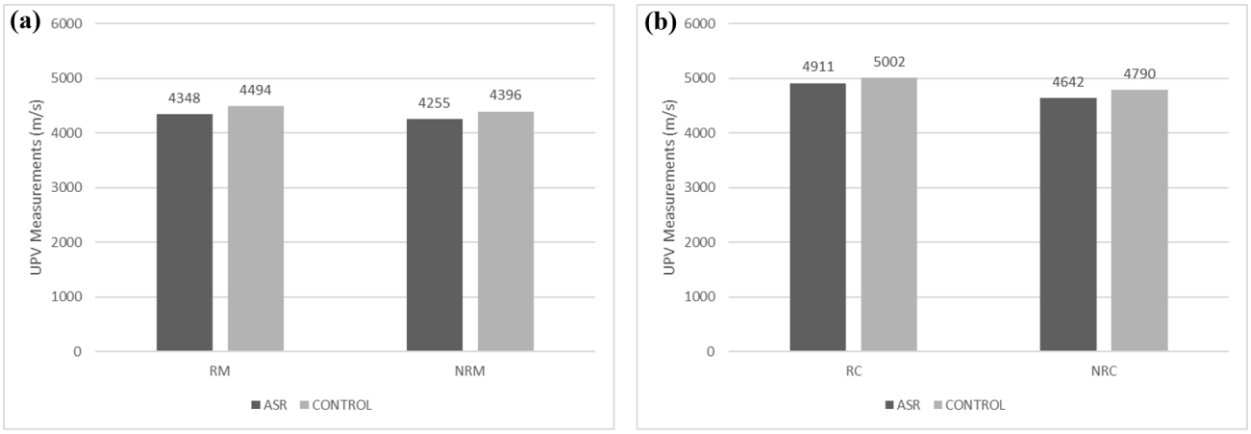


Figure 5. UPV test results of reactive and nonreactive a) mortar prisms b) concrete prisms with and without ASR exposure (ASR exposed concretes - 360 days, other specimens - 28 days)

3.3. Water Absorption Results

The capillary water absorption tests were also conducted according to ASTM C1585 standard [15] for mortar and concrete specimens. Figure 7 shows the capillary water absorption results of various reactive and nonreactive materials. Water absorption values in all type of both mortars and concretes reduced after ASR exposure as expected. Because of the humid curing environment caused water intake and specimens become more saturated and there is not enough space to take extra water. Especially water absorption differences in cured and uncured mortars are comparable to those in mortars.

These results can be attributed to the formation of compact structures due to the quick strength gaining process for the materials. Given that measurements of the amount of water flowing through concrete are frequently made using water absorption tests, such as the capillary sorptivity test in a reference study [16]. Concrete durability is correlated with a lower water sorptivity index, which measures the microstructural characteristics of the material and its curing effectiveness [16].

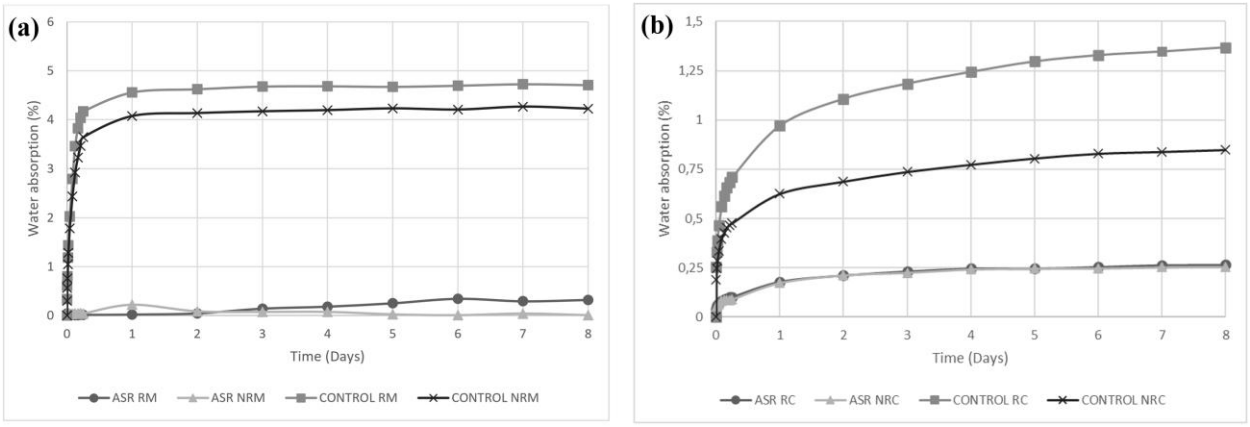


Figure 7. Capillary water absorption test results of reactive and nonreactive a) mortar prisms b) concrete prisms with and without ASR exposure (ASR exposed concretes - 360 days, other specimens - 28 days)

3.4. Flexural Strength Results

Flexural strength tests were performed on specimens following the ASTM C348 [17] standard for mortars and the ASTM C293 [18] standard for concretes. Figure 8 represents the flexural strength results for mortar and concrete prisms. Mortars consist of two sets those were kept in laboratory conditions and exposed to 1 N NaOH solution in 80 °C for 28 days both, while concretes were kept in laboratory conditions for 28 days and exposed to water steam in 38 °C for 360 days. Figure 9 represents the stress strain graphs for different mortar and concrete prisms.

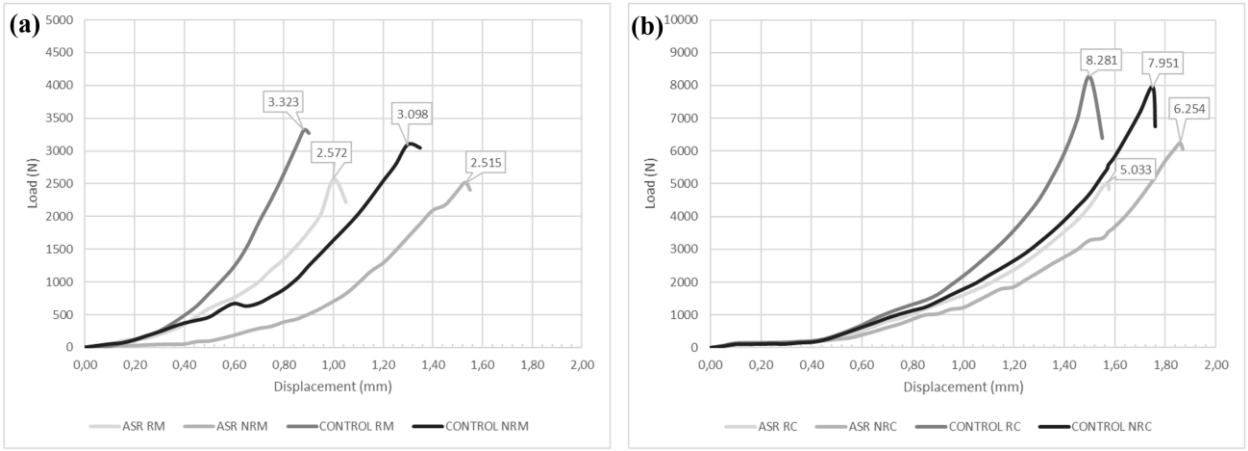


Figure 8. Flexural strength test results of reactive and nonreactive a) mortar prisms b) concrete prisms with and without ASR exposure (ASR exposed concretes - 360 days, other specimens - 28 days)

Considering flexural strength values, cured specimens on both mortar and concrete reduced the flexural strength. Also, nonreactive specimens have lower flexural strength results compared to reactive specimens. The primary cause of the greater flexural strength in reactive mortar and concrete is most likely the densification of ITZ (filling of porosity by gels and potential reaction of the silica of gels with portlandite to generate C-S-Hs) [19]. These results are consistent with the UPV test results. However, the flexural strength reduction in mortars are lower than the reduction in concretes especially produced with quartz. The sharp reduction in flexural strength of concrete was also observed in previous study after when ASR expansion 0,04% [20]. Also, it should be noted that control specimens in concrete were tested at 28-day age while ASR cured ones at 360 days age This also has an effect on higher reduction in flexural strength [21]. After curing, the flexural strength was decreased by up to 18% when limestone was used in production, but they decreased by up to 22% when quartz was used.

3.5. Compressive Strength Results

Compressive strength tests were performed on mortar and concrete specimens using the standard procedure ASTM C109 [22]. Compressive strength tests were conducted on 70x70x70 mm^3 cube mortar specimens exposed to ASR for 29 days at 80 °C (1 day in water, 28 days in 1N NaOH solution) and were carried out on 75x75x75 mm^3 cubic concrete specimens after ASR exposure for 360 days at 38°C (water steam). These tests were also applied on uncured (control) specimens.

Figure 9 shows the changes in compressive strengths of mortar and concrete specimens with ASR exposure.

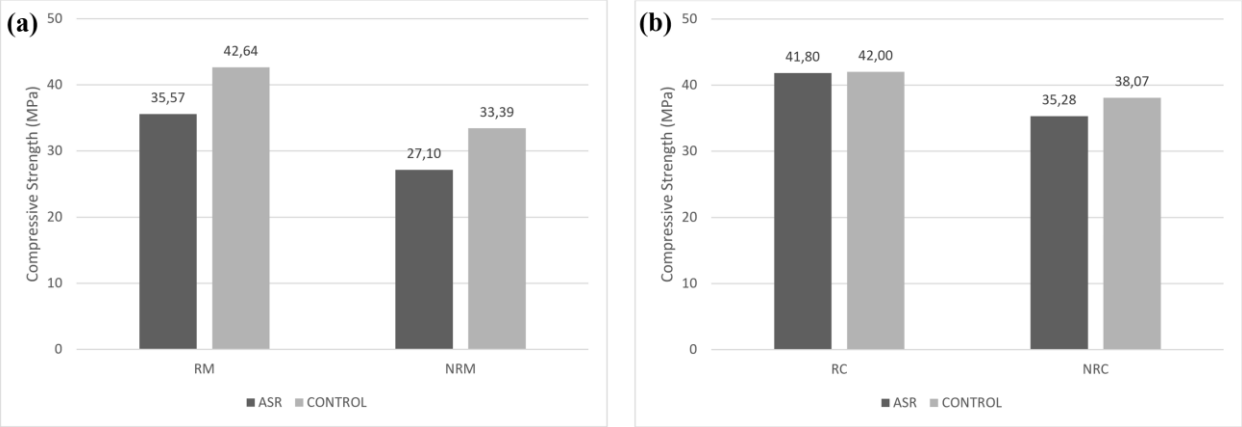


Figure 9. Compressive strength test results of reactive and nonreactive a) mortar prisms b) concrete prisms with and without ASR exposure (ASR exposed concretes - 360 days, other specimens - 28 days)

The presence of NaOH and harsher conditions in mortar environment has caused more decreament in compressive strength in mortars compared to concretes as expected [21]. The results of compressive strength tests are also in line with the results of previous tests conducted. After curing, the compressive strength was decreased by up to 12% when limestone was used in production, but they decreased by up to 15% when quartz was used. Compressive strength reduction is lower than the flexural strength reduction after ASR exposure in line with a previous study conducted by Tariq et al. (2020) [21].

3.6. SEM-EDX Analysis Results

After compressive strength test samples were taken for petrographic analysis. SEM Microghraphs of different reactive and nonreactive mortar and concrete samples exposed to ASR environment for 28 days and 360 days are given below in Figure 10. According to the findings of SEM analyses, a denser microstructure and the lack of ASR formation are seen in cement mortars made with limestone aggregate whereas gel formation and crack maps are seen when the internal structure of mortars made with quartz aggregate is examined (Figure 10.a) [23]. When looking at the internal structure of the concrete, reactive quartz has caused macro cracking in both the matrix phase and the interface region, while capillary cracking is present despite the concrete's good microstructure being observed by ASR tests over a one-year period. Additionally, concrete made with quartz exhibits ASR products that resemble leaf like forms [24]. Despite the presence of needle-shaped ASR products, the matrix phase of concrete made with limestone has a denser microstructure than that made with quartz, and there are no macrocracks. These results are in line with the expansion outcomes of ASR. EDS results of reactive mortars and concretes exposed to ASR curing are given in Table 5. The Ca/Si ratio significantly decreases with using quartz (from 4.9 to 1.6 in mortar and from 6.7 to 1.3 in concrete) when comparing the EDS results of the quartz and limestone aggregate-based samples in line with a literature study [25]. This indicates that the silica in the reactive aggregate has dissolved and reacted with calcium. Similarly, a decrease in the Al/Si, Mg/Si, and Na/Si atomic ratios was observed as a result of ASR.

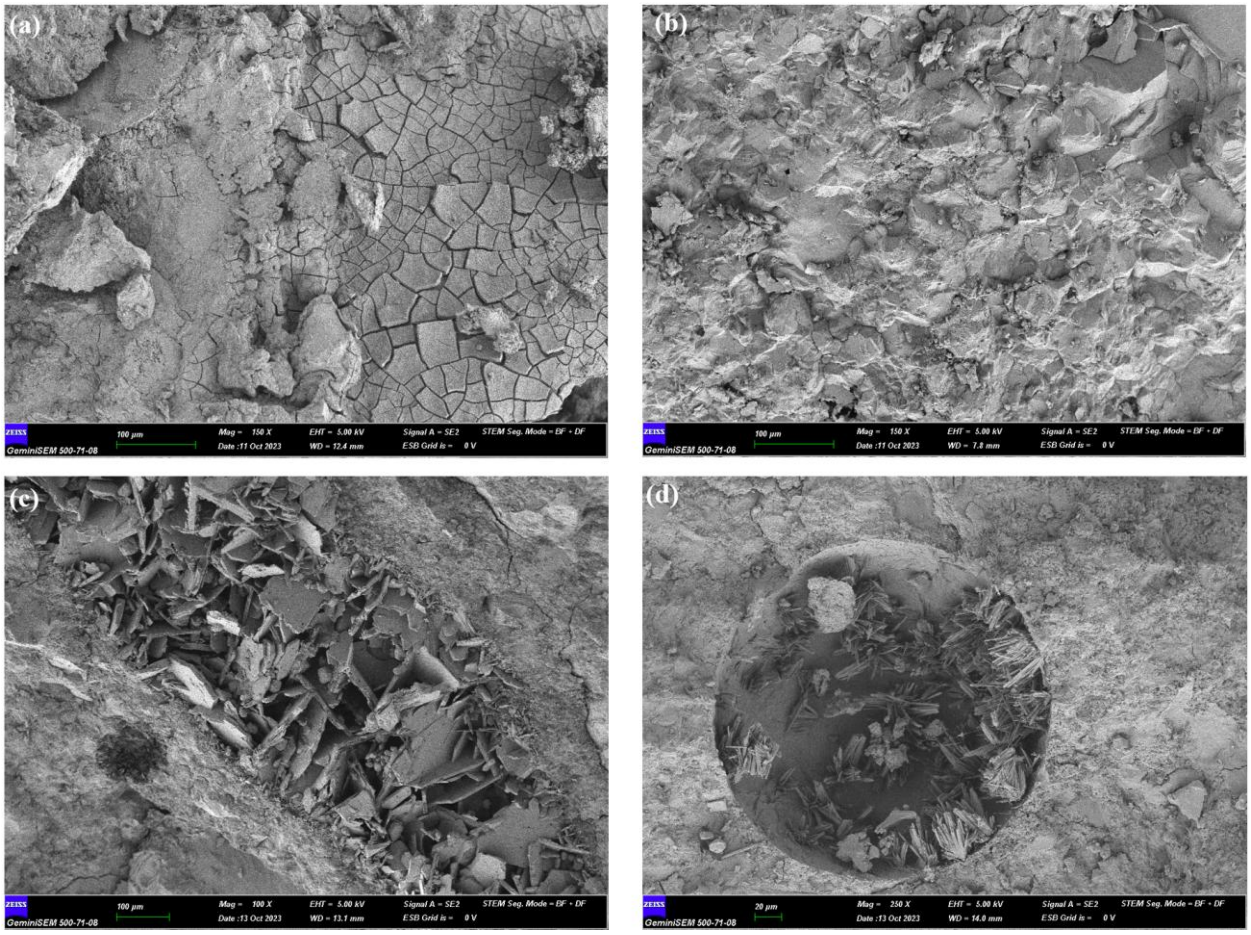


Figure 10. SEM test results of reactive and nonreactive mortar and concretes after ASR exposure a) RM b) NRM c) RC d) NRC (mortars 28 days, concretes 360 days)

Table 5. EDS test results of reactive and nonreactive mortar and concretes after ASR exposure a) RM b) NRM c) RC d) NRC (ASR exposed concretes-360 days, ASR exposed mortars-28 days)

Atomic Ratio	**RM**	**NRM**	**RC**	**NRC**
Ca/Si	1,158	4,938	1,301	6,697
Al/Si	0,150	0,297	0,133	0,303
Mg/Si	0,059	0,262	0,047	0,376
Na/Si	0,531	1,535	0,038	0,554
Na/Al	3,531	5,167	1,828	1,567

4. Conclusions

On the basis of experimental test results were obtained from different reactive and nonreactive mortar and concrete specimens, following conclusions can be sorted,

(1) ASR results for the mortar and concretes revealed that using quartz exhibited the highest expansion and showed ASR cracks compared to limestone-based samples, especially when the test duration extended to 56 days for mortars. Therefore, testing durations of mortar prism test should be extended for better comparison.

(2) The results of the capillary water absorption test and the UPV test are similar to the compressive strength results. After comparing the cured samples to the uncured(control) ones, the compressive strength decreased on both mortar and concrete samples, and ASR cracks were observed on mortar and concrete produced with quartz aggregate after the 56-day and 360 days of ASR exposure respectively. However, more reduction were observed on mortars compared to concretes. The influence of curing conditions, such as high temperature (80 °C), and the role of NaOH because of the ASTM C1260 standard [6], can be attributed to this phenomenon.

(3) Flexural strength results were also inline with the other tests. However, the reduction in concrete specimens are higher than in mortars. This difference could be explained the sharp flexural strength reduction after exceeding 0,04% expansion limit observed in prior study [20].

(4) SEM and EDX results can be also used to check ASR effects on microstructure for better evaluation and confirmation.

As a result, in these experiments, it has been proven by the accelerated mortar bar experiment (ASTM C1260 [6]) and concrete prism test (ASTM C1293 [7]) that the ASR phenomenon occurs on OPC based mortar and concretes and validated. Furthermore, ASR has mechanically and physically effected the specimen structures. These effects much more observable when quartz aggregate was used in production. Especially ASR length expansion in mortars gradually increased when the standard testing duration is extended to 56 days instead of 28 days. Based on these results quartz aggregate utilized in Gaziantep region must not be used in production of construction materials and, testing duration of mortars suggested to be extended to 56 days at least for better comparison in future studies which utilize different aggregates.

Acknowledgments

Authors would like to thank the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK) under grant number 120M763 for providing the support to conduct our research.
The experimental study of the article has been conducted in the civil engineering laboratory at Gaziantep University. The authors acknowledge the contribution of +Erciyes University (ERÜ) Technology Research and Application Center (TAUM) for SEM-EDX analysis.

References

1. Neville, A.M., Properties of Concrete PDF eBook, **2012**
2. Stanton, T.E., Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **1940**
3. Hashemi, A., Microwave material characterization of alkali-silica reaction (ASR) gel in cementitious materials, **2016**
4. Hashemi, A., Horst, M., Kurtis, K.E., Donnell, K.M., and Zoughi, R., Comparison of alkali–silica reaction gel behavior in mortar at microwave frequencies. IEEE Trans Instrum Meas. **2014**, 64:1907–1915
5. Glasser, L.S.D., and Kataoka, N., The chemistry of 'alkali-aggregate'reaction. Cem Concr Res. **1981,** 11:1–9
6. American Society of Testing Materials, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) ASTM C1260. **2023**
7. American Society of Testing Materials, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction ASTM C1293. **2023**

8. British Standards Institution, BS EN 934-2,2009+A1,2012 Admixtures for concrete, mortar and grout. **2012**
9. Din, E.N., 12620; Aggregates for Concrete. DIN German Institute for Standardization. **2008**
10. Wang, W., Noguchi, T., Maruyama, I., and Tomoyose, A., Comparison of alkali-silica reactivity between portland cement and alkali-activated slag mortars subjected to accelerated mortar bar test. **2021,** 43(1)
11. Taylor, H.F.W., Cement chemistry. Thomas Telford London **1997**
12. Broekmans, M.A.T.M., Structural properties of quartz and their potential role for ASR. Mater Charact. **2004,** 53:129–140
13. Saint-Pierre, F., Rivard, P., and Ballivy, G., Measurement of alkali–silica reaction progression by ultrasonic waves attenuation. Cem Concr Res. **2007,** 37:948–956
14. French, W.J., Concrete petrography, a review. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. **1991,** 24:17–48
15. ASTM C1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes ASTM C 1585,2007. American Society for Testing and Materials. **2020**
16. Kanaan, D., Safhi, A. el M., Suleiman, A.R., and Soliman, A.M., Fresh, Hardened, and Microstructural Properties of Ambient Cured One-Part Alkali-Activated Self-Consolidating Concrete. Sustainability (Switzerland). **2023,** 15
17. American Society for Testing and Materials, ASTM C348-02, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-cement Mortars. Annual Book of ASTM Standards, **2002**
18. ASTM-C293, C293 - 16 Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). ASTM International. **2016**
19. Yurtdas, I., Chen, D., Hu, D.W., and Shao, J.-F., Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar. Constr Build Mater. **2013,** 47:165–174
20. Hafçı, A., Turanlı, L., and Bektas, F., Effect of ASR expansion on mechanical properties of concrete. Cement-Wapno-Beton= Cement Lime Concrete. **2021,** 26:12–23
21. Tariq, H., Azam, R., Ahmed, A., Abbass, W., and Abbas, S., The effect of alkali content of cement on ASR expansion, Evaluation and its mitigation using fly ash. Revista Romana de Materiale. **2020,** 50:361–368
22. ASTM International, ASTM C109 / C109M - 20b. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards. **2020,** 04
23. Cyr, M., and Pouhet, R., Resistance to alkali-aggregate reaction (AAR) of alkali-activated cement-based binders. In, Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. **2015,** 397–422.
24. Leemann, A., Shi, Z., and Lindgård, J., Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. Cem Concr Res. **2020,** 137:106190
25. Doğruyol, M., Determination of ASR in concrete using characterization methods. Buildings. **2024,** 14:657

SAF BOR ESASLI KARIŞIM İLE AISI 4140 ÇELİĞİNİN BORLANMASI

SADUN KARABIYIK [1], YASİN ALEMDAĞ [*1], MUHAMMET UZUN[1], GENÇAĞA PÜRÇEK[1], FURKAN ALPTEKİN[2]

[1] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, TRABZON, TÜRKİYE
[2] TİSAŞ Trabzon Silah Sanayi A.Ş, Organize Sanayi Bölgesi, Nejmettin Karaduman Cd., TRABZON, TÜRKİYE

Özet

AISI 4140 (42CrMo4) çeliği son yıllarda savunma sanayinde namlu başta olmak üzere birçok parçanın yapımında kullanılmaktadır. Ancak söz konusu çeliğin yüzey sertliğinin bazı uygulamalar için yeterli olmadığı bilinmektedir. Bu nedenle nitrürleme, semantasyon ve borlama gibi yöntemlerle söz konusu çeliğin yüzey sertliği artırılmaktadır. Bu yöntemler arasında kutu borlama uygulama kolaylığı ve düşük yatırım maliyeti ile ön plana çıkmaktadır. Borlama işlemi ile oluşturulan FeB ve Fe_2B tabakaları söz konusu çeliğin yüzey sertliğini artırmaktadır. Ancak bu tababakaların türleri ve kalınlıkları borlama karışımının kimyasal kompozisyonuna, uygulama sıcaklığına ve süresine göre değişim sergilemektedir. Nitekim uygun bor karışımı, sıcaklık ve süresi kullanılarak söz konusu çeliğin yüzeyinde çift fazlı (FeB+Fe_2B) tabakalar yerine tek fazlı Fe_2B tabakası oluşturulabilmektedir. Borlama karışımı, bor kaynağı, aktivatör ve seyrelticiden oluşmaktadır. Bor kaynağı olarak saf bor, boraks, bor karbür ve borik asit gibi farklı kaynaklar kullanılmaktadır. Ancak saf borun bor kaynağı olarak kullanıldığı sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada saf bor oranın AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının türüne, kalınlığına ve sertliğine etkisi araştırılmıştır. Borlama işleminde Ø 25 mm x 5 mm boyutunda numuneler kullanılmıştır. Bor karışımındaki saf bor oranı %5'den %95'e kadar değiştirilmiştir. Aktivatör olarak KBF_4 kullanılmıştır. Borlama işlemi 800°C ve 900 °C sıcaklıklarda 1 ve 3 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal incelemelerde optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDS) ve X-ışını kırınımı difraktometresinden (XRD) yararlanılmıştır. Tabakaların sertlikleri Vickers sertlik ölçüm yöntemi ile ölçülmüştür. Çelik yüzeyinde oluşan çift fazlı borür tabakalarının kalınlıklarının artan saf bor oranı, işlem sıcaklığı ve süresi ile arttığı belirlenmiştir. %5 oranında saf bor içeren karışımda 900 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile gerçekleştirilen borlama işlemi ile tek fazlı borür tabakası elde edilmiştir. Tabakaların alt kısmında bir difüzyon bölgesinin oluştuğu gözlenmiştir. FeB ve Fe_2B tabakalarının sertliği sırasıyla yaklaşık olarak 2200 HV ve 2000 HV belirlenmiş, saf bor oranın söz konusu tabakaların sertliğini etkilemediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140, Kutu Borlama, Saf Bor, Mikroyapı

1. Giriş

Islah çelikleri ve alaşımlı çelikler, yüzey sertleştirme işlemlerine uygun oluşları, dövülerek şekillendirilebilirlikleri ve üstün mekanik özellikleri sebebiyle birçok savunma sanayi ürününde temel imalat malzemesi olarak tercih edilmektedir [1, 2]. Söz konusu çelikler içerisinde AISI 4140 (42CrMo4) çeliği ithal menşeili 32CrMoV12-10 çeliğine alternatif olarak özellikle silah namlularının imalatı olmak üzere ülkemiz savunma sanayinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [3, 4]. Diğer taraftan bu çelik, mil, aks ve dişli çark gibi birçok makine elemanının da imalatında kullanılmaktadır [5]. Hareketli çalışan birçok parçanın kullanım ömrünün yüzey özelliklerinin geliştirilmesiyle uzatılabildiği bilinmektedir. Geleneksel yüzey sertleştirme tekniklerine alternatif olarak bilinen difüzyon esaslı kaplamalar, bu kapsamda birçok çeliğin yüzeylerinde aşınma ve korozyon direnci yüksek kaplama tabakalarının oluşturulması için kullanılmaktadır. Başta fiziksel (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri olmak üzere, borlama, karbürleme ve nitrürleme işlemleri söz konusu difüzyon esaslı kaplama işlemlerine örnek olarak verilebilmektedir. Bu yöntemler içerisinde kutu borlama ekonomik oluşu ve uygulama basitliği ile ön plana çıkmaktadır [6-8]. Kutu borlama işlemi, ısıya dayanıklı bir kutu içerisindeki borlama karışımına gömülen numunenin, belirli bir sıcaklık ve sürede fırında tutulması ile gerçekleştirilmektedir. Borlama karışımları içerisinde bor kaynağı olarak bor karbürün (B_4C), aktivatör olarak potasyum tetrafloroboratın (KBF_4) ve seyreltici olarak ise silisyum karbürün (SiC) kullanıldığı karışım birçok ticari borlama işleminde için tercih edilmektedir [7, 9]. Ancak bor karbürün ithal bir ürün oluşu karışımın maliyetini artırmaktadır. Bu durum alternatif bor kaynaklarının araştırılmasının hususunda bir gereklilik ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda boraks, borik asit (H_3BO_3) ve saf bor gibi alternatif bor kaynakları denenmiş ve bu kaynaklar ile çeliklerin ve titanyum alaşımlarının yüzeylerinde kararlı borür tabakaları oluşturulabilmiştir [10-12].

Borür tabakalarının ve borlama sırasında oluşan difüzyon bölgesinin bileşimi ve kalınlığı; bor kaynağının bor oranın yanı sıra, borlama işlemi parametrelerine ve çeliğin kimyasal bileşimine bağlıdır [13, 14]. Borlama işlemi sırasında oluşan borür tabakası, FeB ve Fe_2B fazlarından, difüzyon bölgesi ise borür tabakası içerisinde çözünürlüğü düşük olan alaşım elementlerinin ana malzeme ve bor ile oluşturdukları bileşiklerden oluşmaktadır [13, 14]. Farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip borür tabakalarının [15], mekanik etkiler altında çatladığı ve zamanla yüzeyden soyulduğu bilinmektedir [12]. Diğer taraftan tek fazlı borür tabakası çift fazlı borür tabakalarına göre daha üstün aşınma direnci sergilemektedir [12, 16]. Bu nedenlerle son yıllarda yapılan araştırmalar çelik yüzeylerinde tek fazlı borür tabakalarının oluşturulması üzerine yoğunlaşmıştır [12, 16]. Söz konusu araştırmalar uygun işlem parametreleri ve borlama karışımları kullanılarak çeliklerin yüzeylerinde tek fazlı (sadece Fe_2B) borür tabakası oluşturulabildiğini göstermiştir [10]. Ancak yapılan literatür incelemelerinde saf bor esaslı borlama karışımlarının titanyum alaşımlarında denendiği [11], çelik yüzeylerin borlanmasında henüz kullanılmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada saf bor esaslı karışımlar ile AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinin borlanabilirliğinin ve bor oranının söz konusu çelik yüzeyinde oluşabilecek borür tabakalarının türüne, kalınlığına ve sertliğine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

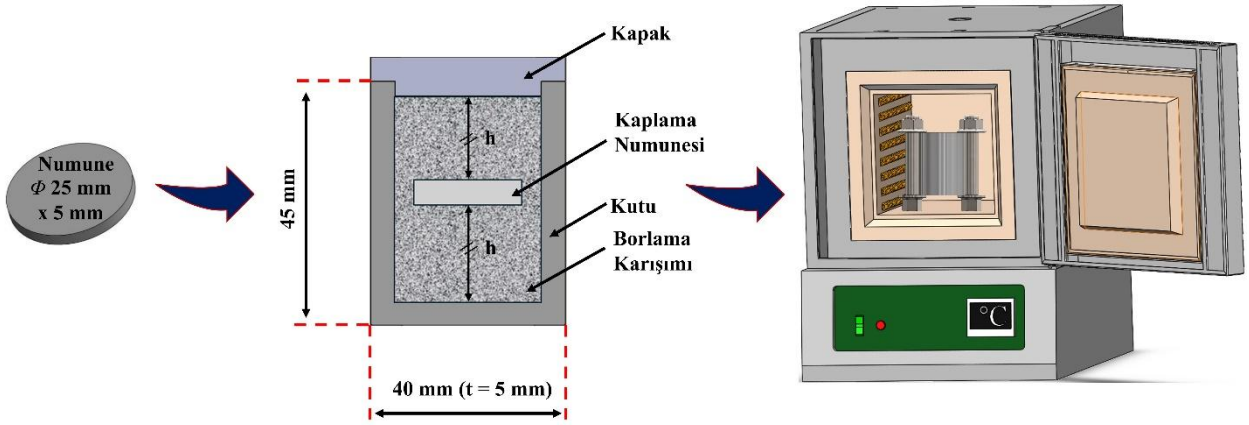
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada taban malzeme olarak AISI 4140 (42CrMo4) çeliği kullanıldı. Söz konusu çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Bu çelikten 5 mm kalınlığında 25 mm çapında numuneler hazırlandı. Bu numuneler 320, 800, 1200 ve 2500 numaralı zımparalar kullanılarak taşlandı ve kutu borlama işlemine tabi tutuldu.

Tablo 1. Çeliğin kimyasal bileşimi

Çelik	Elementler (% ağırlık)								
	C	Cr	Mn	Mo	Ni	Si	P	S	Fe
42CrMo4	0,39	0,92	0,94	0,18	0,15	0,2	0,018	0,011	Kalan

Kutu borlama işlemi ve borlama numunesinin kutu içerisindeki yerleşimine ait şematik resim Şekil 1'de verilmiştir. Kaplama işlemi için kullanılan kutular AISI 420 serisi paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Borlama işlemlerinde kullanılan karışımların kimyasal bileşimleri ve borlama koşulları Tablo 2'de verilmiştir. Borlama karışımları tane boyutu 1 µm'den daha düşük saf bor (%95-97) tozu ve potasyum tetrafloroborat (KBF_4) bileşiği kullanılarak mekanik karıştırma yolu ile hazırlandı. İki eşit miktara bölünen karışımlardan ilki kutunun dip kısmına döküldü ve üzerine numune yerleştirildi. Diğer kısmı ise numunenin üzerine döküldükten sonra kutular bir cıvata ve somun ikilisi ile sıkıca kapatıldı. Daha sonra bu kutular elektrikli bir fırın içerisine yerleştirildi ve numuneler söz konusu tabloda belirtilen sıcaklık ve sürelerde borlama işlemlerine tabi tutuldu. Borlama işleminin ardından kutular havada soğutuldu ve numuneler içerisinden çıkarıldı. Söz konusu numuneler borlama işleminde kullanılan borlama karışımlarına göre kodlandı.



Şekil 1. Borlama işleminin ve kaplama numunesinin kutu içerisindeki yerleşiminin şematik gösterimi

Tablo 2. Borlama koşulları, borlama karışımlarının kimyasal bileşimleri ve numune kodları

Borlama koşulları	Borlama karışımı (% ağırlık)	Numune kodu
	5 B + 95 KBF_4	B0595
800 °C-3 saat	10 B + 90 KBF_4	B1090
900 °C-1 saat	50 B + 50 KBF_4	B5050
900 °C-3 saat	90 B + 10 KBF_4	B9010
	95 B + 5 KBF_4	B9505

Numuneler borlama işlemlerinden sonra ikiye bölünerek kesitleri standart zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutuldu. Ardından numuneler %4'lük Nital çözeltisi (%4 nitrik asit + %96 etil alkol) ile dağlandı. Oluşan tabakaların, difüzyon bölgelerinin ve taban malzemelerin mikroyapısı optik mikroskop (OM) ve enerji dispersif spektrometresine (EDS) sahip bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelendi. Tabakaları oluşturan fazlar numunelerin yüzeylerinden yapılan X-ışını difraktometresi (XRD) analizleri tespit edildi. XRD analizleri 5°-95° Bragg açıları arasında ve 1,5 derece/dk tarama hızında gerçekleştirildi. Tabakaların ortalama kalınlıkları bir görüntü analiz yazılımı yardımıyla numunelerin kesit SEM

fotoğrafları üzerinden ölçüldü. Borür tabakalarının sertlik ölçümlerinde Vickers mikrosertlik yöntemi kullanıldı ve ölçümler 50 gr'lık yük altında gerçekleştirildi. Kalınlık ölçümleri 15, sertlik ölçümleri ise 10 kez tekrarlandı ve bu ölçümlerin ortalaması alındı.

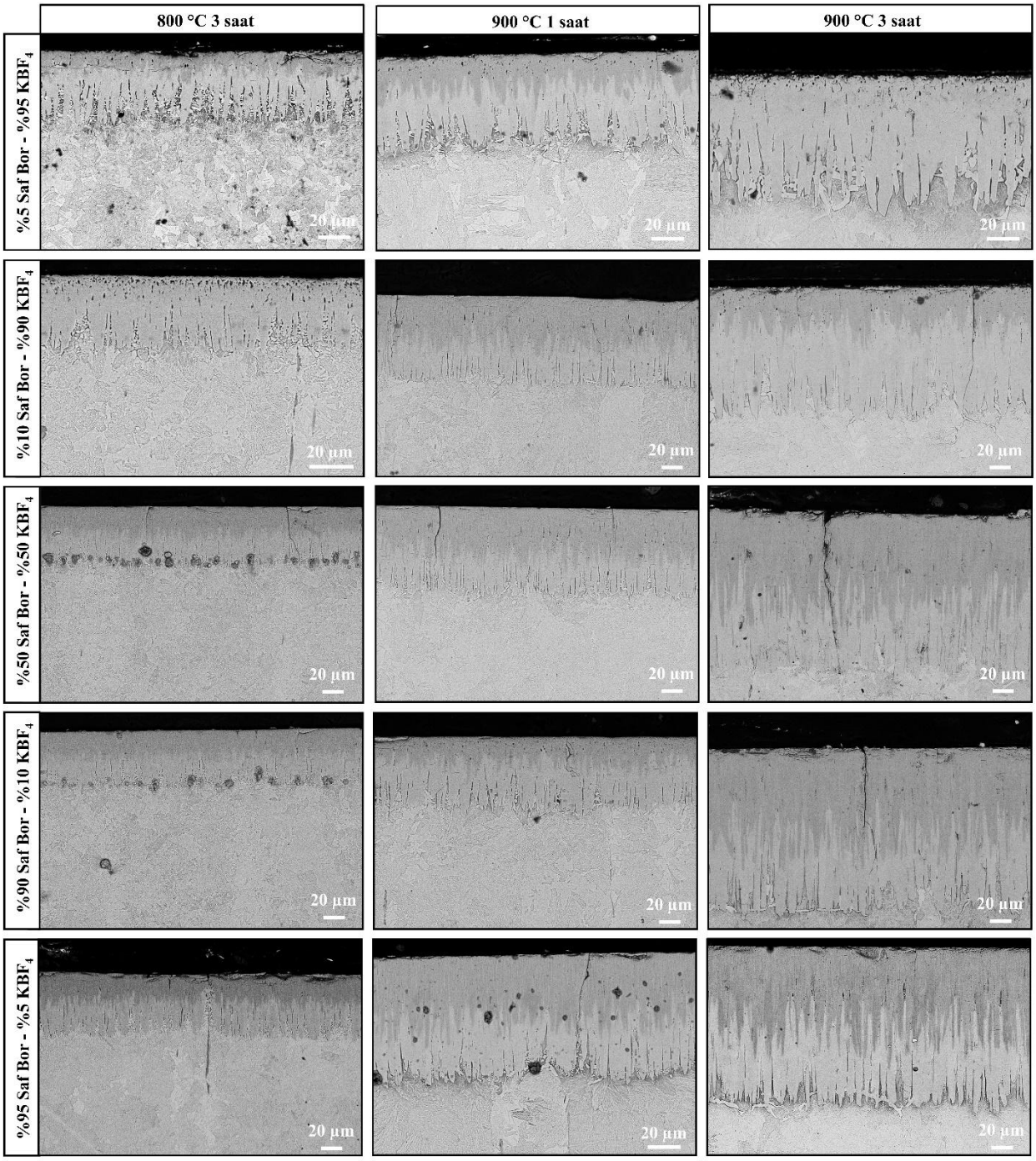
3. Bulgular ve İrdeleme

Farklı oranlarda bor içeren borlama karışımlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlama işlemine tabi tutulan numunelere ait kesit SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmektedir. Bu görüntüler işlem koşullarına bağlı olarak numunelerin yüzeylerinde farklı kalınlıklarda tabakaların oluştuğunu göstermektedir. Numunelerden bazılarına ait detaylı SEM görüntüleri ile XRD analizleri Şekil 3 ve Şekil 4'te, bu görüntülerde yer alan ayrıntıların EDS analizleri ise Tablo 3'te sunulmaktadır. Bu incelemelerden numunelerin yüzeylerindeki tabakaların FeB ve Fe_2B fazlarına ait borür tabakaları oldukları ve birbirlerine testere ağzı biçiminde kenetlendikleri belirlendi. Kesit görüntüleri üzerinden ölçülen borür tabakalarına ait kalınlıklar Tablo 4'te, bu kalınlıkların ortalama değerlerinin borlama karışımının bor oranına, borlama sıcaklığına ve süresine göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 5'te verilmektedir. Bu eğrilerden borür tabakası kalınlıklarının karışımın artan bor oranı, borlama süresi ve sıcaklıkları ile arttığı görüldü. Diğer taraftan B0595 borlama karışımı kullanılarak borlanan 42CrMo4 çeliğine ait numunenin yüzeyinde tek fazlı Fe_2B tabakasının, diğer tüm koşularda borlanan numunelerin yüzeylerinde ise çift fazlı borür tabakalarının oluştuğu belirlendi. Çift fazlı tabakaların ara kesitlerinde yatay çatlakların oluştuğu gözlendi.

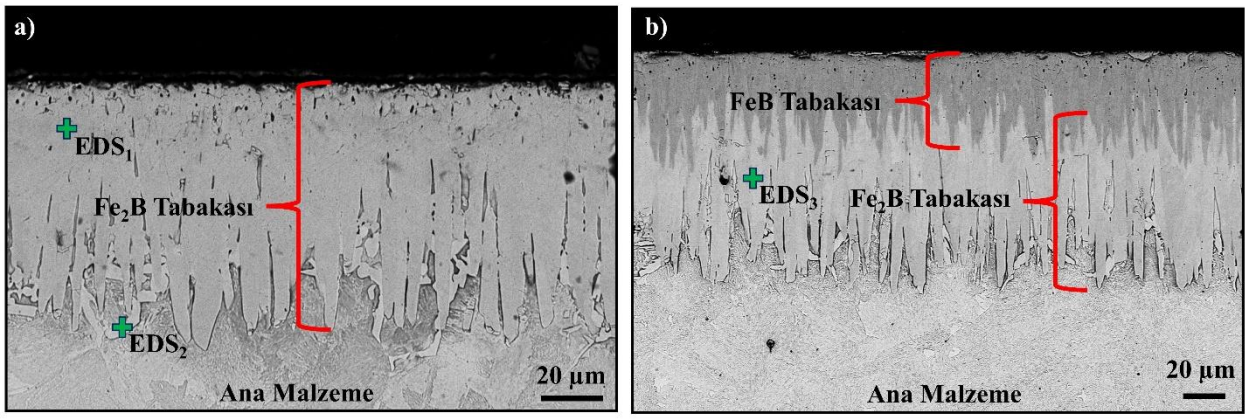
Bu bulgular çeliğin borlanmasında kullanılan karışımın bor oranına, borlama sıcaklığına ve süresine, borür tabakalarının oluşum ve büyüme mekanizmalarına dayandırılarak açıklanabilir. Daha önceki çalışmalarda [17, 18] ifade edildiği gibi belirli sıcaklıkta atom haline gelen bor çeliklerin yüzeyinden merkezine doğru yayınmaktadır. Yayınma esnasında bu atomlar çeliğin esas elementi olan demirin kristal yapısında bulunan boşluklara yerleşmektedir. Demir kristalindeki bor oranı %9'a ulaştığında ilk olarak Fe_2B fazına sahip tabaka, %16'ya ulaştığında ise bu tabakanın üzerinde FeB fazına sahip bir tabaka oluşmaktadır. Oluşan tabakalar yayınma yönünde diğer bir ifadeyle yüzeye dik yönde hızlı bir büyüme sergilemektedir. Ancak bor oranının ve yayınma hızının yüzeyden merkeze doğru azaldığı bilinmektedir [19]. Bu durum söz konusu tabakaların anizotropik büyümesine yol açarak testere ağzı biçminde bir görünüm sergilemelerine neden olmaktadır [18, 19]. Bu tabakaların farklı termal genleşme katsayılarına sahip olduğu bilinmektedir [15]. Bu farklılık iç gerilmelere dolayısıyla tabakaların ara kesitlerinde çatlakların oluşmasına yol açmaktadır. Diğer taraftan B0595 karışmında 900 °C sıcaklıkta 1 saat borlanan 42CrMo4 çeliğine ait numunenin yüzeyinde çift fazlı borür tabakası, borlama süresinin 3 saate çıkarılması durumunda ise tek fazlı Fe_2B tabakası oluşmuştur. Çift fazlı tabaka aynı çeliğin 800 °C sıcaklıkta 3 saat borlanması sonucunda da elde edilmiştir. Bu bulgular söz konusu karışımın bor oranın düşük olmasına ve uzun süreli borlama işleminde oluşan deboronizayon mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir [17]. Şöyle ki, sürenin artırılması durumunda FeB tabakasındaki bor atomları deboronizasyon eğilimi sergilemektedir. Bu durum FeB tabakasının bor oranın azalmasına dolayısıyla tek fazlı Fe_2B tabakasına dönüşmesine yol açmaktadır [17].

Numunelerin yüzeylerindeki Fe_2B tabakasının kalınlığının borlama karışımının artan saf bor oranı ile belirgin bir değişim sergilemediği belirlenmiştir. Ancak FeB tabakasının kalınlığının karışımın artan bor oranı ile arttığı B5050 karışımda en yüksek değerine ulaştığı bunun üzerindeki oranlarda hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür, Şekil 5. Fe_2B tabakasının kalınlığının artan bor ile değişmemesi içerisindeki bor çözünürlüğünün düşük olmasından kaynaklanmış olabilir [9]. Bu durum karışımdan gelen fazlalık bor atomlarının söz konusu tabaka üzerinde toplanmasına yol açmaktadır. Nitekim karışımın bor oranı arttıkça söz konusu

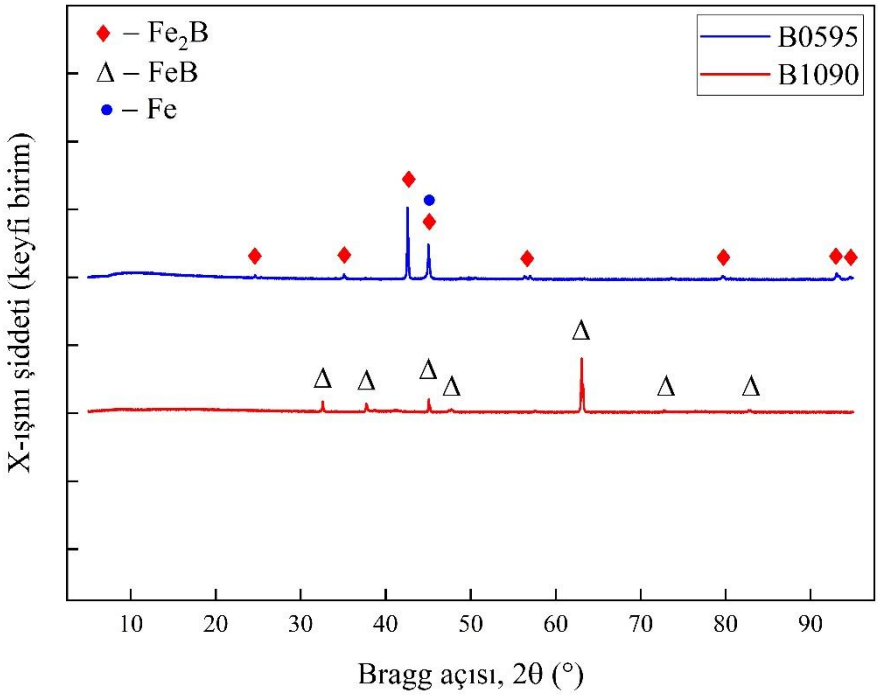
tabakanın yüzeyinde daha çok bor atomu kümelenmekte ve demir ile reaksiyona girerek FeB tabaksının kalınlığının artmasına yol açmaktadır. Ancak yeterli doygunluğa ulaşan FeB tabakası belirli bir bor oranından sonra karışımdan gelen fazlalık boru çözememektedir. Bu durum karışımın bor oranının artmasına rağmen, FeB tabakasının kalınlığının belirli bir bor oranından sonra hemen hemen sabit kalmasına yol açmaktadır. Ancak her iki tabakanın kalınlığının artan borlama sıcaklıklığı ve süresiyle artması borun ana matris içersindeki çözünürlüğünün ve difüzyon hızının söz konusu koşullarda artmasından kaynaklanmış olabilir [9, 20].



Şekil 2. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış AISI 4140 çeliğine ait numunelerin kesit SEM görüntüleri



Şekil 3. 900 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle a) B0595 ve b) B1090 karışımlarında borlanmış numunelerin kesitlerine ait detaylı SEM görüntüleri ve EDS analizlerinin gerçekleştirildiği bölgeler



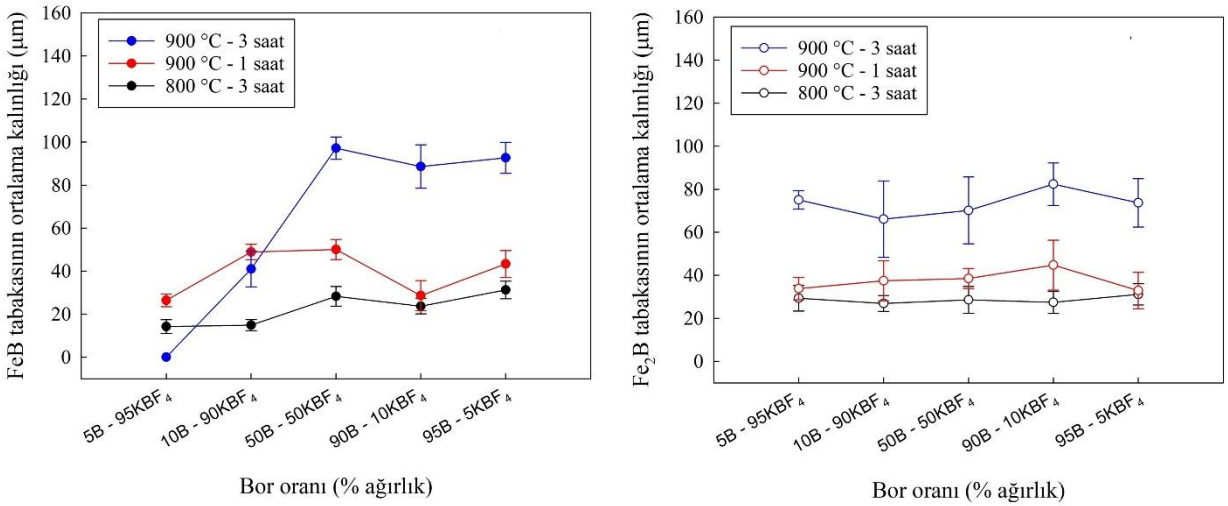
Şekil 4. Borlanmış numunelerin yüzeylerinden elde edilen X-ışını kırınımı desenleri

Tablo 3. Borlanmış numunelerin bazı bölgelerine ait EDS analizi sonuçları

Element (% ağırlık)	EDS Analizi Yapılan Bölgeler		
	EDS_1	EDS_2	EDS_3
B	43,57	3,3	49,6
Fe	47,32	81,31	47,4
C	8,91	10,50	2,2
O	0,2	4,89	0,8

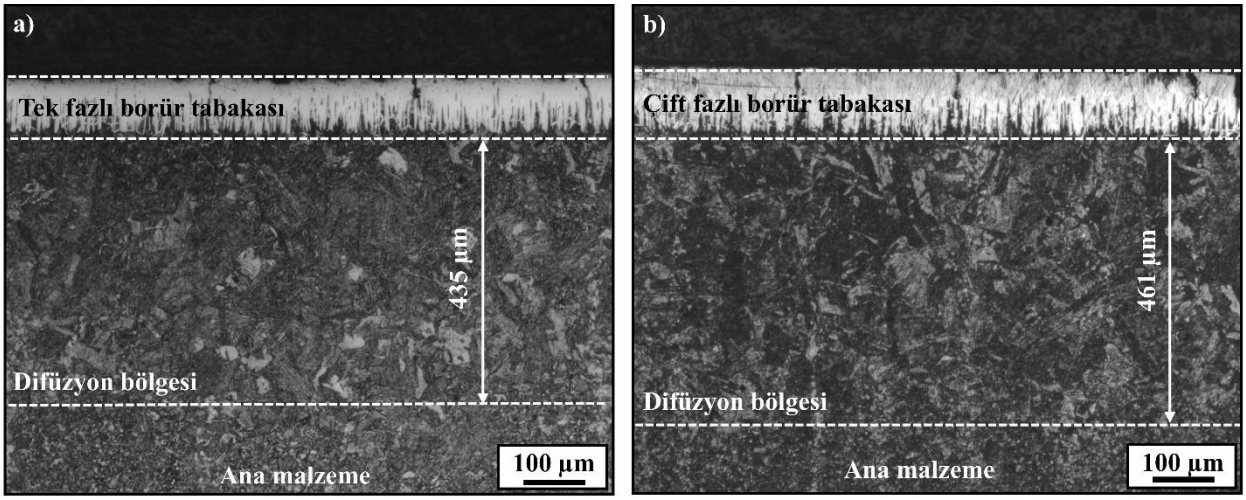
Tablo 4. Farklı bor oranlarında, sıcaklık ve sürelerinde borlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakası kalınlıklarının ortalama değerleri

Borlama parametreleri	Borlama karışımı	Tabaka kalınlığı (µm)	
		FeB	Fe_2B
800 °C-3 saat	B0595	14,20 ± 3,21	29,33 ± 5,97
	B1090	14,89 ± 2,61	26,87 ± 3,68
	B5050	28,26 ± 4,56	28,55 ± 6,23
	B9010	23,67 ± 3,58	27,38 ± 5,17
	B9505	31,23 ± 4,07	31,12 ± 4,94
900 °C-1 saat	B0595	26,40 ± 2,92	33,79 ± 5,17
	B1090	48,86 ± 3,57	37,43 ± 9,32
	B5050	50,04 ± 4,66	38,47 ± 4,67
	B9010	28,62 ± 7,01	44,70 ± 11,61
	B9505	43,31 ± 6,24	32,89 ± 8,48
900 °C-3 saat	B0595	----------	75,05 ± 4,24
	B1090	40,98 ± 8,32	66,10 ± 17,75
	B5050	97,19 ± 5,17	70,14 ± 15,55
	B9010	88,65 ± 10,11	82,38 ± 9,87
	B9505	92,71 ± 7,18	73,69 ± 11,24



Şekil 5. Borlanmış çeliğe ait numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakası kalınlıklarının ortalama değerlerinin bor oranı, borlama sıcaklık ve sürelerine göre değişimlerini gösteren eğriler

Çift fazlı ve tek fazlı borür tabakası içeren borlanmış numunelerin dağlanmış durumlarındaki OM görüntüleri Şekil 6'da verilmektedir. Bu kapsamda yapılan incelemelerde numunelerin Fe_2B tabakasının hemen altında yer alan bir difüzyon bölgesine sahip oldukları tespit edildi. Difüzyon bölgesinin çeliklerin kimyasal bileşiminde bulunan elementlerin demir borür içerisinde çözünmemesi sonucunda oluştuğu bilinmektedir [18]. AISI 4140 çeliğinin alaşım elementi oranlarının düşük olması ve bu elementlerin borlama sıcaklıklarında ferrit fazı içerisinde nispeten çözünmesiyle birlikte çeliğin iç yapısında ferrit fazı sütunları oluşmaktadır. Bu durum söz konusu çelikte geniş bir difüzyon bölgesinin oluşmasına yol açmaktadır [21].



Şekil 6. 900 °C sıcaklıkta 3 saat a) B0595 ve b) B1090 karışımlarında borlanmış numunelerdeki difüzyon bölgelerini gösteren OM görüntüleri

Borlanmış numunelerin yüzeylerinde oluşan tabakalarının mikrosertlikleri Tablo 5'te verilmektedir. Sertlik ölçümleri sonucunda borlama karışımının bor oranının borür tabakalarının sertliği üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı belirlendi. Bu durum söz konusu tabakaların belirli oranlarda bor çözünürlüğüne sahip olmasından kaynaklanmış olabilir [22]. Ancak FeB tabaksının sertliğinin Fe_2B tabakasının sertliğinden yaklaşık 200 HV kadar yüksek olduğu görüldü. Bu durumun ise söz konusu tabakadaki bor çözünürlüğünün yüksek olmasından ve FeB bileşiğindeki kovalent ve iyonik bağların baskın olmasından kaynaklandığı bilinmektedir [23].

Tablo 5. Borlanmış numunelere ait borür tabakalarının mikrosertlikleri

Borlama karışımı	Borlama sıcaklığı ve süresi	Sertlik ($HV_{0,05}$)	
		FeB	Fe_2B
B0595	900 °C-3 saat	----------	2027 ± 51
B1090		2283 ± 104	1978 ± 82
B5050		2299 ± 114	1981 ± 110
B9010		2196 ± 67	1978 ± 114
B9505		2118 ± 130	1965 ± 45

4. Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Saf bor esaslı karışımlar ile AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde tek ve çift faz içeren borür tabakaları oluşturulabilmektedir.
2. Tek faz içeren borür tabakası AISI 4140 çeliğinin B0595 kodlu karışımda 900 °C sıcaklıkta 3 saat borlanması sonucunda elde edilmektedir.
3. Çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının kalınlıkları karışımın artan bor oranı, borlama sıcaklığı ve süresi ile artmaktadır. Ancak belirli bir bor oranından sonra söz konusu tabakaların kalınlıkları hemen hemen değişmemektedir.

4. Borür tabakalarının sertliği karışımın saf bor oranından hemen hemen bağımsız bir davranış sergilemektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri ve Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2022-10517 numaralı proje ile ve Karadeniz Teknik Üniversitesi ile TİSAŞ A.Ş arasında yürütülmekte olan FSI-2025-16121 kodlu üniversite-sanayi iş birliği projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar başta TİSAŞ A.Ş firması olmak üzere, değerli katkılarından dolayı tüm çalışanlara ve emeği geçenlere teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

[1] Pavel C.C., Tzimas E., Dias P.A., Blagoeva D.T., Raw and Processed Materials Used in the European Defence Industry, in: R. Fangueiro, S. Rana (Eds.) Advanced Materials for Defense, Springer International Publishing, Cham, **2020**, pp. 1-16.
[2] Krauss G., Advanced surface modification of steels, Journal of Heat Treating. **1992**, 9(2):81-89.
[3] Koçyiğit F., Yıldız F., Gök M.S., Çay V.V., Dry-sliding wear behavior of AISI 4140 barrel steel at elevated temperatures, Materials Testing. **2020**, 62(2):189-195.
[4] Prochazka J., Pokorny Z., Dobrocky D., Service Behavior of Nitride Layers of Steels for Military Applications, Coatings. **2020**, 10(10).
[5] Shihab S.K., Khan Z.A., Mohammad A., Siddiquee A.N., A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications, Production & Manufacturing Research. **2014**, 2(1):24-49.
[6] Fichtl W., Boronizing and its practical applications, Materials & Design. **1981**, 2(6):276-286.
[7] Campos-Silva I.E., Rodríguez-Castro G.A., 18 - Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels, in: E.J. Mittemeijer, M.A.J. Somers (Eds.), Thermochemical Surface Engineering of Steels, Woodhead Publishing, Oxford, **2015**, pp. 651-702.
[8] Kul M., Danacı I., Gezer Ş., Karaca B., Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel, Materials Letters. **2020**, 279128510.
[9] Ulutan M., Yildirim M.M., Çelik O.N., Buytoz S., Tribological Properties of Borided AISI 4140 Steel with the Powder Pack-Boriding Method, Tribology Letters. **2010**, 38(3):231-239.
[10] Türkmen İ., Yalamaç E., Growth of the Fe2B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H3BO3 during the powder-pack boriding method, Journal of Alloys and Compounds. **2018**, 744658-666.
[11] Kara G., Purcek G., Mechanical properties and cell proliferation response of borided biomedical titanium alloys with different crystalline structures, Surface and Coatings Technology. **2020**, 397126051.
[12] Türkmen İ., Yalamaç E., Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel, Metals and Materials International. **2022**, 281114-1128.
[13] Campos-Silva I., Ortiz-Domínguez M., Cimenoglu H., Escobar-Galindo R., Keddam M., Elías-Espinosa M., López-Perrusquia N., Diffusion model for growth of Fe2B layer in pure iron, Surface Engineering. **2011**, 27(3):189-195.
[14] Delai O., Xia C., Shiqiang L., Growth kinetics of the FeB/Fe2B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling, Journal of Materials Research and Technology. **2021**, 111272-1280.

[15] Rile M., Reasons for the formation of cracks in boride coatings on steel, Metal Science and Heat Treatment. **1974**, 16(10):836-838.
[16] Cimenoglu H., Atar E., Motallebzadeh A., High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer, Wear. **2014**, 309(1):152-158.
[17] Campos-Silva I., Flores-Jiménez M., Bravo-Bárcenas D., Balmori-Ramírez H., Andraca-Adame J., Martínez-Trinidad J., Meda-Campaña J.A., Evolution of boride layers during a diffusion annealing process, Surface and Coatings Technology. **2017**, 309155-163.
[18] Joshi A.A., Hosmani S.S., Pack-Boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing Mechanism and the Role of Container Design, Materials and Manufacturing Processes. **2014**, 29(9):1062-1072.
[19] Campos-Silva I., Ortiz-Domínguez M., López-Perrusquia N., Meneses-Amador A., Escobar-Galindo R., Martínez-Trinidad J., Characterization of AISI 4140 borided steels, Applied Surface Science. **2010**, 256(8):2372-2379.
[20] Arteaga-Hernandez L.A., Cuao-Moreu C.A., Gonzalez-Rivera C.E., Alvarez-Vera M., Ortega-Saenz J.A., Hernandez-Rodriguez M.A.L., Study of boriding surface treatment in the tribological behavior of an AISI 316L stainless steel, Wear. **2021**, 477203825.
[21] Bilal M.M., Yaqoob K., Zahid M.H., haq E.u., Tanveer W.H., Wadood A., Ahmed B., Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels, Journal of Materials Research and Technology. **2019**, 8(6):5194-5200.
[22] Campos-Silva I., Hernández-Sánchez E., Rodríguez-Castro G., Cimenoglu H., Nava-Sánchez J.L., Meneses-Amador A., Carrera-Espinoza R., A study of indentation for mechanical characterization of the Fe2B layer, Surface and Coatings Technology. **2013**, 232173-181.
[23] Pomel'nikova A.S., Shipko M.N., Stepovich M.A., Features of structural changes due to the formation of the boride crystal structure in steels, Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. **2011**, 5(2):298-304.

POLİPROPİLEN TEKSTİL ÜRÜNLERİN ÜRETİMİNDEKİ TELEFLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ

BEHZAT YILDIRIM [*1], FAHRİ ŞENGÜL [1], MEHMET TOPALBEKİROĞLU [3]

[1] Prof Sentetik Inc., Gaziantep, Türkiye
[2] Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Gaziantep, Türkiye

Özet

Bu çalışma, polipropilen (PP) üretiminde oluşan üretim kaynaklı teleflerin geri dönüşüm potansiyelini araştırması üzerinedir. İncelemede geri dönüştürülmüş PP (rPP) malzemelerin mekanik, termal ve işlenebilirlik gibi özelliklerine dair pek çok çalışma olduğu görülmüştür. Fakat, üretim sırasında ortaya çıkan teleflerin geri kazanımı ve yeniden kullanımına yönelik çalışmalar ise sınırlı kalmıştır. Konu kapsamında yapılan incelemeler rPP'nin temel özellikleri, üretim atıklarının geri kazanım yöntemleri, takviye malzemelerinin (cam elyaf, doğal lifler, nano-kil ve organik modifiye killer) etkileri, gelişmiş üretim teknolojileri ve çevresel-ekonomik değerlendirmeler başlığında yapılmıştır. Elde edilen bulgular, üretim kaynaklı PP teleflerin sadece atık olarak değil, uygun takviye malzemeleri ve proses optimizasyonları ile performansı artırılmış değerli bir hammadde olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Üretim süreçlerindeki yenilikler, ürün kalitesini artırırken süreç verimliliğini de %15-30 oranında yükseltmektedir.

Keyword: Polipropilen, Termoplastik, Polimer, Atık, Geri Dönüşüm.

Abstract

This study investigates the potential for recycling waste generated during the production of polypropylene (PP). A review of the literature revealed numerous studies on the mechanical, thermal and processability properties of recycled PP (rPP) materials. However, research into the recovery and reuse of waste produced during manufacturing remains limited. Studies within this scope have focused on the fundamental properties of rPP, waste recovery methods, the effects of reinforcement materials such as glass fiber, natural fibers, nanoclay, and organic modified clays, advanced production technologies, and environmental and economic assessments. The findings show that PP waste generated during production can be used as a valuable raw material with enhanced performance through the use of appropriate reinforcement materials and process optimisations. Innovations in production processes can improve product quality and increase process efficiency by 15–30%.

Keyword: Polypropylene, Thermoplastic, Polymer, Waste, Recycling.

1. Giriş

Polipropilen (PP) yüksek mukavemet, kimyasal direnç, düşük yoğunluk ve maliyet avantajı sayesinde özellikle ambalaj ve çuval üretiminde yaygın kullanılan bir termoplastiktir. Ancak üretim süreçlerinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan telefler hem ekonomik kayıplara hem de plastik kirliliğine yol açmaktadır. Sürdürülebilir üretim hedefleri ve çevresel sorumluluk bilinci, bu atıkların geri kazanımını ve yeniden kullanımını kritik hâle getirmektedir.

Günümüzde, sürdürülebilir üretim ve çevresel sorumluluk kavramlarının önemi giderek artmakta, plastik atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı küresel çapta öncelikli bir hedef haline gelmektedir. Özellikle PP gibi geniş kullanım alanına sahip malzemelerde, üretim sırasında oluşan teleflerin geri kazanımı, hem ekonomik kayıpların minimize edilmesi hem de doğal kaynakların korunması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Üretim atıklarının yeniden kullanılması, hammaddede tasarruf sağlarken, atık yönetimi maliyetlerini düşürmekte ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır.

Üretim kaynaklı PP atıklarının geri dönüştürülmesi; hammadde tüketiminin ve atık yönetimi maliyetlerinin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve döngüsel ekonomi uygulamalarının desteklenmesi açısından önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, geri dönüştürülmüş PP'nin takviye malzemeleri ve proses geliştirme teknikleri ile mekanik ve termal özelliklerinin iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, PP iplik üretiminde oluşan teleflerin geri dönüşümü konusunda literatürdeki güncel gelişmeleri ve elde edilen somut verileri derlemeyi amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu araştırma, PP iplik üretiminden kaynaklanan teleflerin geri dönüşümü ve bu malzemelerin mekanik, termal, çevresel ve ekonomik boyutlarını ele alan sistematik bir literatür taramasıdır. İncelenen çalışmalar; malzeme özellikleri, üretim teknikleri ve proses iyileştirmeleri, takviye malzemeleri ve kompozit uygulamaları ile çevresel-ekonomik değerlendirmeler başlıkları altında analiz edilmiştir. Her çalışmada amaç, kullanılan yöntem, elde edilen veriler ve sonuçlar karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

Literatür deki bu konu üzerinde yapılan her çalışmanın amacı, kullanılan malzeme ve yöntemler, elde edilen somut veriler (örneğin; çekme dayanımı, darbe dayanımı, termal bozunma sıcaklığı, üretim hızı, maliyet avantajı gibi) ve sonuçlar dikkate alınarak detaylı bir şekilde incelenmiş ve literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Ayrıca, çalışmalar arasındaki farklılıklar, ortak noktalar ve gelişim eğilimleri belirlenerek sentezlenmiştir.

Elde edilen veriler, üretim kaynaklı PP teleflerin geri dönüşümü ve uygulamalarının mevcut durumu hakkında geniş ve derinlemesine bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu metodolojik yaklaşım, çalışmanın geçerliliğini artırmak ve alanın güncel durumunu yansıtmak açısından kritik önem taşımaktadır.

2.1. Geri Dönüştürülmüş Polipropilenin Mekanik ve Termal Özellikleri

Geri dönüştürülmüş polipropilen (rPP) malzemelerinin mekanik ve termal performansları, üretim sürecinde kalite kontrolü ve geri dönüşüm tekniklerinin optimizasyonu açısından kritik öneme

sahiptir. Literatürde bu konuda yapılan çeşitli çalışmalar, rPP'nin özellikle çekme dayanımı, darbe direnci ve ısı stabilitesi açısından ham PP'ye yakın performanslar sergileyebildiğini göstermektedir.

Handayani ve ark. [1], ticari plastik atıklardan elde edilen rPP'nin çekme dayanımını 30-35 MPa aralığında ölçmüştür. Bu değer, ham PP'nin çekme dayanımı ile kıyaslandığında yaklaşık %85-90 oranında benzerlik göstermektedir. Aynı çalışmada, termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları, rPP'nin ısı stabilitesinin 260 °C'ye kadar korunduğunu ortaya koymuştur. Bu termal dayanıklılık, özellikle ambalaj ve çuval üretiminde yüksek sıcaklıklarda işlenebilirlik açısından önemlidir. Ayrıca, rPP'nin erime sıcaklığı ve kristalin yapısının ham PP ile büyük ölçüde uyumlu olduğu bildirilmiştir. Bu, üretim kaynaklı teleflerin yeniden kullanımını destekleyen somut bir veridir.

Şengül [2], rPP ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) polimerlerinin Izod darbe testlerini gerçekleştirmiştir. Burada rPP'nin ortalama darbe dayanımı 12 kJ/m² olarak ölçülürken, HDPE'nin 16 kJ/m² değerine sahip olduğu raporlanmıştır. Darbe dayanımı, özellikle taşıma ve depolama sırasında ürünlerin maruz kaldığı darbelere karşı dayanıklılık açısından kritik bir parametredir. Elde edilen bu değerler, rPP'nin darbe mukavemetinin yeterli seviyede olduğunu ve ambalaj malzemesi olarak güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, Izod darbe testinde gözlenen enerji absorpsiyonu, geri dönüştürülmüş materyalin kırılmaya karşı esnekliğini ve dayanıklılığını ortaya koymaktadır.

Zdiri ve ark. [3] ise rPP'yi nano-SiO_2 partikülleri ile takviye ederek mekanik ve termal özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlamıştır. Nano-SiO_2 katkısı ile çekme dayanımı %18 oranında artış göstermiştir (örneğin, 33 MPa'dan yaklaşık 39 MPa'ya yükselmiştir). Termal bozunma sıcaklığı da yaklaşık 10 °C artarak, rPP'nin termal dayanımını 270 °C civarına çıkarmıştır. Bu iyileşme, nano partiküllerin polimer matriks içindeki dağılımının homojenliği ve moleküler hareketlerin kısıtlanmasıyla ilişkilendirilmektedir. Böylece, takviye malzemeleri kullanılarak rPP'nin performansını ham PP seviyelerine yaklaştırmak mümkündür.

Diğer yandan, Martínez ve ark. [4], rPP'nin organik kil modifikasyonlarıyla güçlendirilmesi üzerine çalışmış ve %3 ağırlık oranında modifiye kil kullanımıyla çekme dayanımında %20 artış ve su buharı geçirgenliğinde %15 azalma sağlamıştır. Bu veriler, ambalajlama uygulamalarında ürün dayanıklılığının ve raf ömrünün artırılabileceğine işaret etmektedir. Aynı zamanda termal analizlerde, modifiye kil katkısının kompozitin ısı stabilitesini 15-20 °C yükselttiği gözlemlenmiştir.

Handayani ve ark. [1], tarafından gerçekleştirilen kısa cam elyaf takviyesi çalışmasında, farklı ağırlık yüzdelerinde (örneğin %10, %20, %30) cam elyafın rPP'ye eklenmesiyle çekme dayanımı 40 MPa'dan 65 MPa'ya kadar yükselmiştir. Bu da yaklaşık %60'lık bir iyileşmeye tekabül etmektedir. Ayrıca, elastik modül ve darbe dayanımı da benzer oranlarda artış göstermiştir. Cam elyafın polimer matriks ile iyi uyumu, mekanik özelliklerdeki gelişmenin temel nedeni olarak gösterilmiştir.

Bu literatür bulguları birlikte değerlendirildiğinde, rPP'nin doğru katkı malzemeleri ve optimizasyon teknikleri kullanıldığında ham PP'ye yakın veya bazen daha üstün mekanik ve termal performanslar gösterebildiği anlaşılmaktadır. Üretim kaynaklı teleflerin geri dönüşümünde bu iyileştirmeler, malzeme kalitesinin korunması ve yeniden kullanım potansiyelinin artırılması açısından kritik rol oynamaktadır. Sonuç olarak; rPP'nin çekme dayanımı 30-35 MPa aralığında,

termal stabilitesi 260 °C civarında olup ham PP ile benzerlik göstermektedir. Izod darbe dayanımı 12 kJ/m² seviyesinde, bu değer ambalaj uygulamaları için yeterlidir. Nano-SiO_2 ve organik kil gibi katkılar, çekme dayanımını %18-20 artırmakta, termal stabiliteyi 10-20 °C yükseltmektedir. Kısa cam elyaf takviyesi ile mekanik performanslarda %60'a varan artışlar sağlanmaktadır. Tüm bu veriler, rPP'nin üretim kaynaklı teleflerin yeniden değerlendirilmesinde güvenilir bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Bu gelişmeler, sürdürülebilir plastik kullanımı ve döngüsel ekonomi uygulamaları açısından son derece önemlidir ve üretim süreçlerindeki atık yönetimi stratejilerinin güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

2.2. Üretim Kaynaklı Teleflerin Geri Dönüşümü ve Uygulamaları

Üretim sürecinde ortaya çıkan PP teleflerin geri dönüşümü hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar, üretim kaynaklı atıkların geri kazanılarak yeni ürünlerde kullanılabilirliğini somut verilerle ortaya koymaktadır.

Sudjono ve ark. [5], üretim sürecinden kaynaklanan PP atıkların geri dönüşümü ile üretilen çuvalların yırtılma dayanımını ortalama 160 N olarak belirlemiştir. Bu dayanım, endüstride kabul edilen standartlara uygun bulunmuştur. Ayrıca, teleflerin %30'unun geri dönüşüm sürecine dahil edilmesi ile ekonomik avantajlar ve atık miktarının azaltılması sağlanmıştır. Bu sonuçlar, üretim kaynaklı atıkların doğrudan geri dönüşüm hatlarında değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Teodorescu ve ark. [6], siliko-alüminyum içeren endüstriyel atık katkılı rPP kompozitlerinde %10 ağırlık katkı oranı ile çekme dayanımını 62 MPa seviyesine çıkarmış ve termal stabilitenin bozulmadan korunduğunu raporlamıştır. Bu durum, atıkların sadece geri kazanımını değil, aynı zamanda kompozit malzeme performansının da iyileştirilmesini sağlamaktadır. Özellikle siliko-alüminyum gibi mineral katkıların mekanik dayanım ve ısı direncini artırdığı tespit edilmiştir.

Benzer şekilde, Handayani ve ark. [7] rPP matrisine kısa cam elyaf takviyesi uygulamış, %30 cam elyaf katkısı ile çekme dayanımını 65 MPa'ya, elastik modülü ise %40 artırarak üretim kaynaklı teleflerin mekanik performansının artırılabileceğini göstermiştir. Bu teknik, telefonların doğrudan katkı malzemesi olarak kullanılması açısından umut vadetmektedir.

Zdiri ve ark. (2018) ise nano-SiO_2 katkı maddesi ilavesiyle rPP'de çekme dayanımında %18'lik bir artış ve termal bozunma sıcaklığında yaklaşık 10 °C iyileşme sağlamışlardır. Nanopartiküllerle takviye edilen bu materyaller, teleflerin yeniden işlenmesi sonrası kalite kaybını önleyerek uygulama alanlarını genişletmektedir.

Mineral su şişesi atıklarından elde edilen PP'nin çuval üretiminde kullanımı incelenmiş, rPP oranı %10 seviyesinde iken dokuma çuvalların çekme dayanımı %15 azalma göstermiştir [5]. Ancak, maliyet avantajı ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda bu oranın kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir.

Ek olarak, üretim kaynaklı teleflerin doğal liflerle karıştırılmasıyla oluşturulan kompozitlerin mekanik dayanım ve çevresel etkilerini incelemiştir [8]. Doğal lif katkısı ile kompozitlerin sertliği

ve darbe dayanımı iyileşmiş, böylece hem atık materyalin değerlendirilmesi hem de çevresel performans artışı sağlanmıştır.

Bu çalışmalar ışığında, üretim kaynaklı teleflerin doğrudan veya katkı maddeleri ile takviye edilerek geri dönüşümü hem malzeme özelliklerinin korunmasını hem de çevresel yükün azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle mineral katkılar, cam elyaf ve nanopartikül destekleri ile geliştirilen kompozitler, rPP'nin üretim sürecine etkin entegrasyonunu sağlamaktadır.

2.3. Polipropilen Kompozitlerin Takviye Malzemeleriyle İyileştirilmesi

rPP malzemelerin mekanik ve termal performanslarının iyileştirilmesinde, takviye malzemeleri kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde organik ve inorganik takviyelerin rPP kompozitlerinin özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğine dair pek çok çalışma bulunmaktadır.

Bir çalışmada rPP matrisine %3 oranında organik modifiye kil (amine ve aminosilan modifikasyonu yapılmış) ilavesi gerçekleştirmiştir [4]. Bu katkının çekme dayanımını %20 oranında artırdığı (örneğin 35 MPa'dan yaklaşık 42 MPa'ya yükselme) ve su buharı geçirgenliğini %15 oranında azalttığı raporlanmıştır. Su buharı geçirgenliğinin azalması, kompozitin ambalaj uygulamalarında daha iyi bariyer özellikleri sağlayacağını göstermektedir. Ayrıca termal stabilitede de belirgin bir iyileşme gözlemlenmiş, bozunma sıcaklığı ortalama 15 °C artmıştır. Bu bulgular, organik modifiye kil katkısının rPP'nin hem mekanik hem de fonksiyonel özelliklerini geliştirdiğini kanıtlamaktadır.

Benzer şekilde, Albedah ve ark. [9] doğal lif takviyeli biyo-kompozitlerde çalışmış ve %20 doğal lif (özellikle keten ve jüt lifleri) katkısının elastik modülü 1.5 GPa'dan 2.7 GPa'ya yükselttiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda çekme dayanımında %30 artış (örneğin 28 MPa'dan 36 MPa'ya) sağlanmıştır. Doğal liflerin biyobozunur ve hafif yapıları, rPP kompozitlerin çevresel sürdürülebilirlik ve mekanik performans dengesini artırmak için etkili bir yol olduğunu göstermektedir. Ayrıca lif yüzeyi modifikasyonuyla lif-matris adezyonunun arttırılması, kompozit dayanımını optimize etmiştir.

Handayani ve ark. [1] tarafından yapılan kısa cam elyaf takviyeli rPP çalışmasında, cam elyaf oranının %10'dan %30'a artırılmasıyla çekme dayanımında belirgin bir artış kaydedilmiştir. Çekme dayanımı 40 MPa'dan 65 MPa seviyesine ulaşmıştır, bu da yaklaşık %62.5'lik bir iyileşme anlamına gelmektedir. Elastik modül de %50 civarında yükselmiş ve darbe dayanımı da önemli ölçüde iyileşmiştir. Bu çalışma, kısa cam elyaf katkısının rPP'nin yapısal uygulamalarda kullanılabilirliğini artırdığını göstermiştir. Elyafın homojen dağılması ve iyi yapışma yüzeyi, mekanik özelliklerin gelişmesinde kritik faktörler olmuştur.

Diğer önemli bir çalışma, Zdiri ve ark. [3] nano-SiO_2 katkılı rPP'de çekme dayanımında %18 artış ve termal bozunma sıcaklığında 10 °C'ye varan iyileşme sağlamıştır. Nanopartiküllerin yüzey modifikasyonuyla matrisle uyumu artırılmış, böylece mekanik performans ve ısı direnci desteklenmiştir.

Ayrıca, araştırmacılar rPP'ye termoplastik elastomer katkısı yapılarak çekme dayanımı ile uzama oranında önemli artışlar sağlanmıştır [10]. Özellikle darbe dayanımında %25'lik iyileşme ile daha dayanıklı ve esnek kompozit malzemeler üretilmiştir.

Bu kapsamlı çalışmalar, rPP'nin takviye malzemeleriyle modifikasyonunun hem mekanik dayanımı hem de termal ve bariyer özellikleri bakımından önemli gelişmeler sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Takviye malzemelerinin seçimi, oranı ve işleme teknikleri, nihai ürünün performansını doğrudan etkilediğinden, üretim kaynaklı teleflerin geri dönüşümünde bu yaklaşımlar büyük potansiyel sunmaktadır.

2.4. Üretim Teknolojileri ve Süreç Geliştirme

Üretim kaynaklı PP atıkların geri dönüşüm sürecinde, üretim teknolojilerinin ve süreç parametrelerinin optimize edilmesi malzeme kalitesinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde, üretim verimliliğini artırmaya yönelik çok sayıda çalışma yapılmış ve bu çalışmalar somut verilerle süreç iyileştirmelerinin etkilerini ortaya koymuştur.

Kim ve ark. [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çok aşamalı çekme (multi-step drawing) yöntemiyle sürekli PP bant üretimi geliştirilmiştir. Bu yöntemle üretim hızı %15 oranında artırılırken, bantların mekanik mukavemeti %25 oranında iyileştirilmiştir. Örneğin, bantların çekme dayanımı 40 MPa'dan 50 MPa'ya yükselmiş ve üretim kapasitesi de daha yüksek verimlilikle sağlanmıştır. Çok aşamalı çekme yöntemi, PP zincirlerinin kristalinitesini artırarak mekanik özellikleri güçlendirmiş ve üretim sürecinin enerji verimliliğini artırmıştır. Bu gelişme, özellikle yüksek performans gerektiren PP çuval üretiminde kalite ve üretim hızı arasında optimum denge kurulmasını sağlamıştır.

Zdiri ve ark. [3] rPP matrisinin işlenme parametrelerinin (örneğin eriyik sıcaklığı, hız, basınç ve soğutma koşulları) sistematik optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu optimizasyon sonucunda, ürün kalitesinde %30 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Çekme dayanımı, elastik modül ve darbe direnci gibi kritik mekanik özelliklerde belirgin gelişmeler kaydedilmiştir. Ayrıca, uygun proses parametrelerinin belirlenmesi ile üretim esnasında malzeme içindeki mikro çatlak ve boşluklar minimize edilmiş, böylece kompozit yapının bütünlüğü korunmuştur. Bu sayede, rPP'nin standartlara uygun yüksek kalitede ürünlere dönüştürülmesi mümkün hale gelmiştir.

Araştırmacılar, siliko-alüminyum endüstriyel atık katkılı PP kompozitlerinin üretiminde, katkı oranının ve proses koşullarının titizlikle kontrol edilmesiyle çekme dayanımı ve termal stabilitenin optimize edildiğini göstermiştir [6]. %10 oranında katkı kullanımında çekme dayanımı 62 MPa'ya kadar yükselmiş, aynı zamanda termal bozunma sıcaklığı da 20 °C kadar artmıştır. Bu tür katkılı kompozit üretiminde proses parametrelerinin doğru seçimi, atıkların efektif kullanılabilirliğini artırmakta ve yeni ürünlerin üretiminde yüksek kalite standartları sağlanmaktadır.

Martínez ve ark. [4] organik modifiye kil katkılı rPP kompozitlerinde, ekstrüzyon ve kalıplama süreçlerinde sıcaklık ve hız parametrelerini optimize etmiş, böylece %15 daha homojen dağılım ve mekanik özelliklerde %20 iyileşme elde etmiştir. Bu süreç geliştirme çalışmaları, kompozitlerin endüstriyel üretime entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.

Genel olarak, rPP malzemelerin üretim süreçlerinde; malzeme karakterizasyonu, proses parametreleri optimizasyonu, çok aşamalı işleme teknikleri ve katkı malzemelerinin homojen dağılımı gibi faktörlerin birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu sayede üretim kaynaklı teleflerin geri dönüşümünde hem üretim verimliliği hem de nihai ürün kalitesi artırılabilmekte, sürdürülebilir ve ekonomik üretim modelleri geliştirilebilmektedir.

2.5. Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmeler

PP üretim kaynaklı teleflerin geri dönüşümü, sadece malzeme verimliliği açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan da kritik bir öneme sahiptir. Geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkileri ve maliyet analizleri, sürdürülebilir üretim politikalarının geliştirilmesinde temel belirleyicilerdendir.

Kumar ve ark. [12] gerçekleştirdikleri çalışmada, plastik atık yönetiminde döngüsel ekonomi yaklaşımlarının uygulanmasının geri dönüşüm süreçlerinde %40'a varan maliyet avantajı sağladığını ortaya koymuştur. Bu maliyet düşüşü, hammadde kullanımındaki azalma ve atık yönetimi giderlerindeki düşüşe bağlanmaktadır. Ayrıca, karbon ayak izi analizlerinde, döngüsel ekonomi modellerinin geleneksel atık bertaraf yöntemlerine göre %35 oranında daha az sera gazı emisyonu oluşturduğu raporlanmıştır. Bu sonuçlar, üretim sırasında ortaya çıkan PP teleflerin geri kazanımının çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Özellikle tekstil ve ambalaj sektörlerinde atık miktarının yüksek olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu avantajlar sürdürülebilir üretim hedefleri açısından kritik bir potansiyel teşkil etmektedir.

Tan ve ark. [13], geri dönüşüm süreçlerinde yüksek kaliteli malzeme elde edebilmek için ileri teknoloji ve otomasyon yatırımlarının zorunluluğunu vurgulamıştır. Çalışmada, yüksek teknolojili ekstrüzyon, kalıplama ve malzeme iyileştirme yöntemlerinin benimsenmesi ile ürün kalitesinin ve süreç verimliliğinin %30'dan fazla artırıldığı somut verilerle desteklenmiştir. Ekonomik analizler ise bu teknolojik yatırımların kısa vadede maliyetleri artırsa da uzun vadede üretim maliyetlerini %20 oranında düşürdüğünü ve atık yönetim maliyetlerini minimize ettiğini göstermiştir. Ayrıca, bu yatırımların karbon emisyonlarını düşürmede önemli rol oynadığı ve şirketlerin sürdürülebilirlik raporlamalarında olumlu etkiler yarattığı belirtilmiştir.

López ve ark. [6], rPP kompozit üretiminde kullanılan endüstriyel atıkların katılmasıyla hem hammadde maliyetlerinde %15'lik azalma sağlandığını hem de enerji tüketiminde %10'luk tasarruf gerçekleştiğini bildirmiştir. Bu tasarruflar, katkı maddeleri kullanılarak üretim süreçlerinin optimize edilmesinin ekonomik faydalarını ortaya koymaktadır. Enerji ve hammadde maliyetlerindeki bu düşüşler, üretim kaynaklı teleflerin geri dönüşümünün hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliğini pekiştirmektedir.

Martínez ve ark. [4] tarafından yapılan ekonomik değerlendirmelerde, organik modifiye kil takviyesinin kullanıldığı rPP kompozitlerin üretim maliyetlerinin, katkısız rPP'ye kıyasla %5-8 oranında arttığı ancak mekanik performanstaki %20 artış ve uzun ömürlülük sayesinde toplam yaşam döngüsü maliyetlerinin %12 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu, daha dayanıklı ve uzun ömürlü ürünlerin geri dönüşümle elde edilmesinin ekonomik açıdan avantajlı olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, rPP'nin üretim kaynaklı teleflerden elde edilmesi, ekonomik açıdan hammadde maliyetlerini düşürürken, çevresel açıdan karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. Teknolojik gelişmeler ve proses iyileştirmeleriyle birlikte, bu alandaki uygulamalar hem sürdürülebilir üretimi desteklemekte hem de sektörde rekabet avantajı sağlamaktadır. Bu kapsamda, yatırımların artırılması ve döngüsel ekonomi prensiplerinin yaygınlaştırılması, PP geri dönüşümünün geleceği açısından kritik stratejiler olarak öne çıkmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Literatür bulguları, üretim kaynaklı PP atıklarının uygun takviyeler ve proses optimizasyonları ile ham PP'ye eşdeğer hatta bazı koşullarda üstün mekanik ve termal özellikler sergileyebileceğini göstermektedir. Cam elyaf, doğal lif, nano-kil gibi takviyeler; çekme dayanımı, darbe direnci ve ısı stabilitesinde kayda değer artışlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, malzeme homojenliği, kontaminasyon ve kalite kontrol süreçleri önemli zorluklar olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle ileri kalite kontrol tekniklerinin ve gelişmiş işleme yöntemlerinin entegrasyonu önerilmektedir.

3.1. Takviye Malzemelerinin Etkisi:

Cam elyaf, doğal lifler, nano-kil ve organik modifiye mineraller gibi takviye malzemeleri, rPP kompozitlerin mekanik dayanımında kayda değer artışlar sağlamaktadır. Örneğin, kısa cam elyaf katkısının %5'ten %20'ye çıkarılmasıyla çekme dayanımının 40 MPa'dan 65 MPa'ya yükseldiğini belirtmiştir [1]. Benzer şekilde, organik modifiye kil katkısının %3 oranında kullanımı ile çekme dayanımında %20 artış ve su buharı geçirgenliğinde %15 azalma raporlanmış [4], bu da malzemenin dayanıklılığını artırmakla kalmayıp, ambalajlama gibi uygulamalarda performansını iyileştirdiğini gösterilmiştir. Bu somut veriler, takviye malzemelerinin rPP'nin teknik özelliklerini önemli ölçüde güçlendirdiğini kanıtlamaktadır.

3.2. Termal Özelliklerin Korunması ve İyileştirilmesi:

rPP'nin termal stabilitesi, üretim ve kullanım sürecindeki performansını doğrudan etkiler. Nano-SiO_2 partiküller kullanılarak termal bozunma sıcaklığını yaklaşık 10 °C arttırılmış, böylece malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı direnci geliştirilmiştir [3]. Ayrıca, araştırmalarda raporlanan 260 °C'ye kadar ısı stabilitesi, rPP'nin çeşitli üretim koşullarına dayanıklılığını göstermektedir [7]. Bu iyileştirmeler, özellikle termal işlemler gerektiren üretim tekniklerinde (örneğin enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon) geri dönüştürülmüş materyalin kullanılabilirliğini artırmaktadır.

3.3. Üretim Süreci Optimizasyonları:

Kim ve ark. [11] tarafından yapılan çalışmalar, çok aşamalı çekme yöntemleri ile bant üretiminde %25 mukavemet artışı ve %15 üretim hızı artışı sağlandığını göstermiştir. Zdiri ve ark. [3] ise rPP matrisinde işleme parametrelerinin optimizasyonu ile ürün kalitesinin %30 iyileştirildiğini belirtmiştir. Bu gelişmeler, üretim kaynaklı atıkların verimli bir şekilde değerlendirilmesinin yanı sıra üretim süreçlerinin de ekonomik ve teknik olarak optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak bu süreçlerde, malzeme homojenliği ve parçalar arası tutarlılık halen kritik sorunlardandır. Bu sorunlar, üretim verimliliğini ve ürün kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir.

Kalite Kontrol ve Malzeme Homojenliği: Geri dönüştürülmüş materyallerin kalitesi, özellikle farklı üretim kaynaklı atıkların karışımı ve geri dönüşüm döngülerinin etkisi nedeniyle değişkenlik gösterebilir. Polimer zincirlerinde meydana gelen bozunma, yabancı maddeler ve kontaminasyonlar, malzeme performansını düşürmekte ve üretimde kalite kontrol zorluklarına yol açmaktadır [13]. Bu nedenle ileri kalite kontrol tekniklerinin (örneğin spektroskopi, mikroskopi ve mekanik testlerin otomasyonu) kullanımı ve malzeme işleme yöntemlerinin geliştirilmesi zorunludur. Ayrıca, atıkların uygun sınıflandırılması ve ön işleme tabi tutulması, homojen ürün elde etmede önemli rol oynamaktadır.

3.4. Çevresel ve Ekonomik Açıdan Değerlendirme:

Kumar ve ark. [12] tarafından sunulan veriler, döngüsel ekonomi çerçevesinde geri dönüşümün %40'a varan maliyet avantajı sağladığını ve karbon emisyonlarında %35'e varan azalma getirdiğini göstermektedir. Bu çevresel faydalar, özellikle büyük ölçekli PP üretimi yapan firmalar için önemli bir rekabet avantajı yaratmaktadır. Diğer yandan araştırmacılar, teknolojik yatırımların geri dönüşüm kalitesini artırdığını ve maliyetlerin uzun vadede düştüğünü ortaya koymuştur [13]. Bu da sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yapılacak AR-GE ve üretim modernizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, PP iplik üretiminde ortaya çıkan teleflerin geri dönüşümü üzerine kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmış ve elde edilen veriler ışığında önemli çıkarımlar yapılmıştır. Bu çıkarımlar;

- ✓ Üretim kaynaklı PP teleflerin geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.
- ✓ Uygun takviye malzemeleri ve proses optimizasyonları ile mekanik ve termal özelliklerde %20–60'a varan iyileşmeler sağlanabilmektedir.
- ✓ Döngüsel ekonomi yaklaşımı, karbon emisyonlarını %30–35, üretim maliyetlerini %40'a kadar azaltma potansiyeli taşımaktadır.
- ✓ Malzeme kalitesi ve homojenliği gibi teknik zorlukların giderilmesi için ileri kalite kontrol ve otomasyon yatırımları kritik önemdedir.

Gelecekte, pilot uygulamalar ve endüstriyel ölçekli çalışmaların artırılması, geri dönüşüm süreçlerinin standartlaştırılmasına ve sektörel yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma 3258289 Nolu TÜBİTAK Projesi ile desteklenmektedir.

Kaynaklar

1. Handayani, S.U., Fahrudin, M., Mangestiyono, W., and Muhamad, A.F.H. Mechanical Properties of Commercial Recycled Polypropylene from Plastic Waste. Journal of Vocational Studies on Applied Research, **2021**, 3(1), 1-4.
2. Şengül, Ö. Geri Dönüşümü Yapılmış Polipropilen ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemesinin Izod Darbe ve Isıl Özelliklerinin Belirlenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, **2024**, 12, 839-846.
3. Zdiri, K., Elamri, A., Hamdaoui, M., Harzallah, O., Khenoussi, N., and Brendlé, J. Reinforcement of recycled PP polymers by nanoparticles incorporation. Green Chemistry Letters and Reviews, **2018**, 11(3), 296–311.
4. Martínez, J., et al. Velásquez, E., Garrido, L., Valenzuela, X., Galotto, M.J., Guarda, A., and de Dicastillo, C.L. Valorization of post-consumer recycled polypropylene through their reinforcement with amine and amine/silane organically modified clays for potential use in food packaging. Food Packaging and Shelf Life, **2023**, 38, 101121.

5. Sudjono, H., and Sugiono, S. The product strength analysis of woven bag made from recycled mineral water plastic cups based on the polypropylene content. Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences, **2020**, 29(2), 259–272.
6. Teodorescu, G.M., Vuluga, Z., Oancea, F., Ionita, A., Paceagiu, J., Ghiurea, M., and Raditoiu, V. Properties of composites based on recycled polypropylene and silico-aluminous industrial waste. Polymers, **2023**, 15(11), 2545.
7. Handayani, S.U., Fahrudin, M., Mangestiyono, W., and Muhamad, A.F.H. Mechanical properties of commercial recycled polypropylene from plastic waste. Journal of Vocational Studies on Applied Research, **2021**, 3(1), 1-4.
8. Kartal, İ., and Selimoğlu, H. Investigation of the mechanical behavior of recycled polypropylene-based composite materials filled with waste cotton and pine sawdust. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, **2023**, 9(4), 412-418.
9. Al-Turaif, H. A., et al. Potential of recycled polypropylene: A study on effect of natural fiber on the morphology and properties of biocomposite. Journal of King Saud University - Science, **2024**, 36, 103167.
10. Matei, E., Râpă, M., Andras, Á.A., Predescu, A.M., Pantilimon, C., Pica, A., and Predescu, C. Recycled polypropylene improved with thermoplastic elastomers. International Journal of Polymer Science, **2017**, 7525923.
11. Yamamoto, T., et al. Development of a continuous manufacturing process for self-reinforced composites using multi-step highly drawn polypropylene tapes. Polymer, **2020**, 191, 122267.
12. Ramli, A.H.M., Abd Manaf, L., Zulkeflee, Z., and Andriyono, S. Advancing circular economy approaches in plastic waste management: A systematic literature review in developing economies. Sustainable Production and Consumption, **2024**, 51, 420–431.
13. Estela-García, J.E., Román, A.J., and Osswald, T. A. Correlating processing variables to material properties in recycled polypropylene: A data-driven approach. SPE Polymers, **2025**, 6(2), e70012.

DYNAMIC TASK ALLOCATION AND ENERGY AWARE FLEET SCHEDULING USING AN AI BASED HYBRID ALGORITHM IN ROS BASED AUTONOMOUS MOBILE ROBOT SYSTEMS

Muhammed İdris AKTAŞ*1,Zeynep Didem UNUTMAZ DURMUŞOĞLU*2, Eren ÖZCEYLAN*3,

[1] Affiliation: Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Gaziantep, TURKEY.

[2] Affiliation: Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Samsun, TURKEY.

[3] Affiliation: Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Gaziantep, TURKEY.

Abstract

In Industry 4.0 settings, large-scale autonomous mobile robot (AMR) fleets face intertwined challenges under volatile demand and on-site uncertainty: communication latency rises, traffic congestion and deadlocks emerge, and energy efficiency deteriorates; under such conditions, heuristic dispatch, fixed routing, and static QoS policies quickly break down. To address these bottlenecks jointly, design a ROS 2 Humble–based, end-to-end fleet-management architecture. At its core, a Hybrid PSO + RL scheme couples Particle Swarm Optimization (PSO)—which produces globally coherent initial robot–task assignments, holding-area placements, and route/priority templates that balance energy cost and congestion risk—with a multi-agent reinforcement learning layer (MAPPO, CTDE) that refines decisions online from live telemetry. The agents dynamically adapt DDS QoS presets (reliability, queue depth, deadline), dissipate congestion through wait/advance/reroute/reprioritize actions at intersections and narrow corridors, and optimize energy via opportunity charging and speed profiling. All decisions are executed in consistency with the Open-RMF global schedule under bounded deviations, while a TEB planner renders time-feasible, collision-safe local trajectories. In Gazebo evaluations with 10–50 robots across nominal, surge, and temporary blockage scenarios, end-to-end latency remained below 50 ms; p95 latency decreased by about 25%; throughput increased by roughly 30%; deadlocks fell by about 35%; and DDS handshakes reduced near-collision incidents by about 40%. The TEB planner shortened task completion time by ~12% while maintaining lateral deviation under 3 cm, and smoother routes and speed choices yielded double-digit reductions in energy per task. Collectively, these results demonstrate that the proposed ROS 2 architecture—grounded in Hybrid PSO + RL enables scalable, safe, and energy-efficient AMR fleet operations for smart-factory and logistics deployments.

Keyword: Autonomous Mobile Robots; Multi-Agent Reinforcement Learning; Hybrid PSO–RL; Dynamic Task Allocation; Energy-Aware Scheduling; Fleet Management; Traffic Management; ROS 2; Open-RMF; DDS QoS; MAPPO; TEB Planner.

1. Introduction

The deployment of Autonomous Mobile Robots (AMRs) has become a cornerstone of Industry 4.0, where flexible manufacturing and smart logistics systems require adaptive, reliable, and cost-efficient automation solutions [1]. Unlike conventional Automated Guided Vehicles (AGVs), which rely on static infrastructure such as magnetic tapes or QR codes, AMRs utilize onboard sensing, simultaneous localization and mapping (SLAM), and advanced decision-making to operate autonomously in highly dynamic environments. The increasing size of AMR fleets—often exceeding dozens of units operating concurrently—the management of communication, task allocation, and traffic coordination has emerged as a significant technical challenge [3].

Traditional fleet scheduling and task allocation approaches have primarily relied on rule-based heuristics or centralized optimization models [10]. While such methods can achieve acceptable performance in small-scale deployments, they suffer from limited scalability, vulnerability to communication delays, and an inability to adapt to stochastic events such as sudden congestion or the appearance of unexpected obstacles [11]. In particular, centralized architectures often create single points of failure and introduce latency bottlenecks as the fleet size grows. This limitation has motivated the adoption of multi-agent reinforcement learning (MARL) frameworks, which allow each robot to act as an autonomous decision-making agent while still contributing to global performance optimization [12].

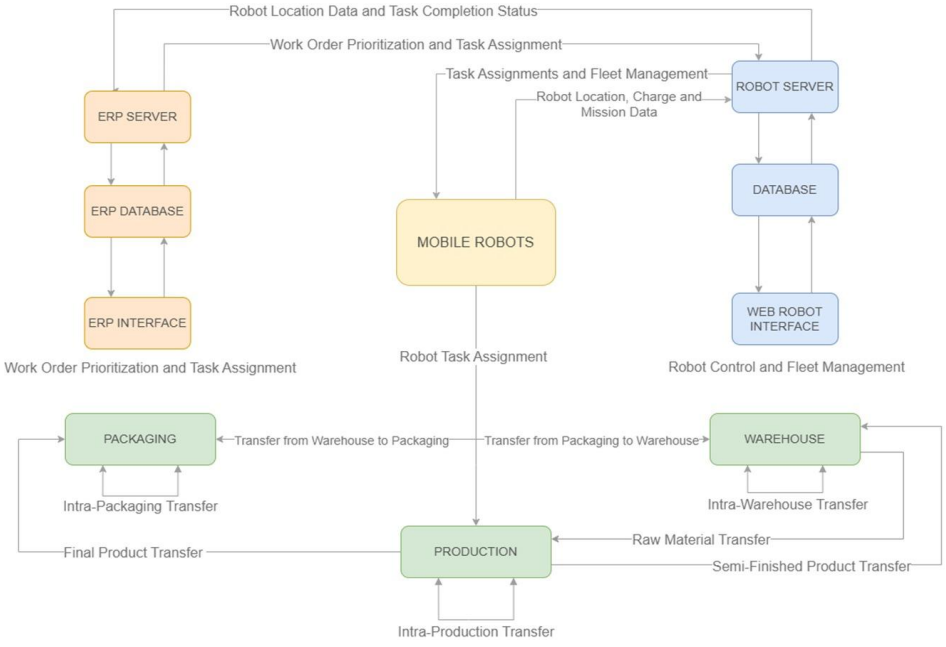
Recent advances in deep reinforcement learning (DRL) have demonstrated promising results in traffic flow optimization, multi-robot coordination, and energy-aware path planning [16]. For example, proximal policy optimization (PPO) and its multi-agent variant (MAPPO) have been successfully applied to distributed control tasks due to their stability and sample efficiency. However, integrating MARL into real-time robotic middleware remains an open research problem. A particularly controversial issue lies in balancing the exploration–exploitation trade-off under strict latency and safety constraints: excessive exploration may lead to unsafe behaviors, while overly conservative policies reduce adaptability in dynamic settings [19].

Equally critical is the role of the communication backbone. In ROS 2, the Data Distribution Service (DDS) provides publish–subscribe communication with tunable Quality of Service (QoS) parameters such as reliability, history depth, and deadlines . Yet, static configuration of QoS often fails to accommodate rapidly changing network loads in large fleets. Thus, an unresolved hypothesis in the field is whether reinforcement learning agents can dynamically optimize DDS QoS parameters in real time to sustain low latency and high throughput while ensuring message reliability. Another active research area concerns energy-aware scheduling, where the operational lifetime of AMRs and their charging cycles significantly affect overall productivity.Diverging hypotheses exist: some argue that energy minimization should be addressed solely at the path-planning level (through distance minimization), while others emphasize integrated fleet-level scheduling where task priorities, charging infrastructure, and robot heterogeneity are jointly optimized .This study addresses these gaps by introducing a hybrid MARL-driven fleet management framework that unifies communication, navigation, and scheduling. The proposed architecture employs MAPPO agents to simultaneously minimize fleet congestion and energy consumption, while dynamically tuning DDS QoS parameters to maintain message latencies below 50 ms under high network loads.

At the navigation level, a Teb Planner-based local motion planner ensures smooth trajectories with reduced deviation, and at the fleet level, Open-RMF provides global schedule negotiation augmented by adaptive RL-based reprioritization [11]. The central hypothesis is that the synergy of MARL optimization, DDS-aware communication control, and energy-aware scheduling can outperform heuristic and purely model-based approaches in both scalability and robustness. The main conclusion drawn from this work is that such integration enables AMR fleets to achieve higher throughput, lower latency, and reduced deadlock rates in dynamic industrial environments, thereby offering a scalable solution for next-generation smart factories and logistics hubs. In this study **Hybrid PSO+MARL** approach in which PSO provides globally coherent starts (robot–task assignments, holding-area placements, corridor priorities) and **MAPPO** refines decisions online from live telemetry. Agents adapt **ROS 2/DDS** QoS presets (Reliability, History depth, Deadline) and take congestion-aware actions (wait/advance/reroute/reprioritize) while keeping edits within bounded deviations from the **Open-RMF** global schedule; local motion is rendered by **TEB** to ensure time-feasible, collision-safe trajectories. The overarching goal is a scalable and safe fleet that sustains low latency, high throughput, and improved energy efficiency in smart-factory and logistics environments.

2. Materials and Methods

All experiments were conducted on Ubuntu 22.04 LTS running ROS 2 Humble. The middleware communication backbone is DDS (CycloneDDS 0.9.1), which provides real-time publish–subscribe messaging. The given diagram in Figure 1 illustrates the interaction between the ERP and Robot servers with mobile robots and various operational areas, as well as how data flow is maintained. The ERP Server is responsible for prioritizing work orders and assigning tasks, communicating with the Robot Server to transfer these tasks to mobile robots. The Robot Server manages the fleet of mobile robots and controls task execution, continuously updating information such as the robots locations, task completion statuses, and battery levels. Mobile robots carry out material and product transfers between different areas, such as packaging, production, and warehouses. This setup automates the entire transfer process, improving operational efficiency and minimizing the need for manual intervention.



2.1. System Configuration

Simulation experiments were carried out in Gazebo Fortress, modeling a 5000 m² warehouse environment with static shelves, multiple docking stations, and dynamic obstacles such as forklifts and human agents.

- **Navigation Stack:** Nav2 (Humble branch), integrated with **TebPlanner v1.3** as the local trajectory generator and **Theta*** as the global path planner.
- **Traffic Management: Open-RMF 2.0**, providing fleet-level traffic schedule negotiation.
- **Learning Framework: PyTorch 2.2.1** with **RLlib 2.3** for distributed training of Multi-Agent PPO (MAPPO).
- **Databases: MongoDB 6.x** for telemetry storage and **rosbag2 (MCAP format)** for raw experiment logging.
- **Hardware for training:** Intel Xeon 16-core CPU, 64 GB RAM, NVIDIA RTX 4090 GPU.

2.2. Multi-Agent Reinforcement Learning (MAPPO)

In the proposed framework, each robot in the fleet is modeled as an **independent learning agent**, allowing decentralized decision-making while still optimizing for global fleet performance.At each timestep, agent observes a state vector:

$$s_i = [x_i, y_i, v_i, b_i, q_i, \lambda_i]$$

Figure 2. State Vector Definition

- xi,yi: robot position coordinates
- vi: velocity
- bi: remaining battery level
- qi: number of pending tasks in the local queue
- λi: observed communication latency (DDS)

- Action Space: Each agent selects actions from the following set:
  1. **Task acceptance or rejection**
  2. **Route priority adjustment**
  3. **DDS QoS tuning** (reliability mode, deadline, history depth)
  4. **Charging command** (initiate or postpone charging)

- Reward Function: The reward balances multiple performance objectives:

$$R_i = -w_1 \cdot TTS_i - w_2 \cdot E_i - w_3 \cdot C_i - w_4 \cdot L_i - w_5 \cdot D_i$$

- TTSi: task completion time
- Ei: energy consumption
- Ci: congestion cost
- Li: end-to-end communication latency
- Di: deadlock penalty

The weights w1…w5w_1 \dots w_5w1…w5 are tuned empirically through ablation studies.

- Learning Framework
  - ❖ **Policy network (πθ\pi_\thetaπθ)**: produces action distributions.
  - ❖ **PPO:** stabilizes training using clipped surrogate objective.
  - ❖ **MAPPO (Multi-Agent PPO):** extends PPO to multi-agent settings by sharing critic information while maintaining decentralized execution.

```
theta, phi = random_init()

for fleet_size in [10, 20, 50]:
    env.reset(fleet_size, random_seed)
    for epoch in range(1, N_epochs + 1):
        buffer = []
        for t in range(1, T_horizon + 1):
            for i in fleet:
                s_i = observe_state(i)
                a_i = actor(theta, s_i)
                r_i, s_next = env.step(i, a_i)
                buffer.append((s_i, a_i, r_i, s_next))
        A_hat = compute_advantages(buffer, V=phi, gamma=gamma, lam=lam)
        theta = theta + alpha * grad_L_PPO(theta, buffer, A_hat)
        phi   = phi   + beta  * grad_L_VF(phi, buffer)
        if epoch % k == 0:
            save_checkpoint(theta, phi, fleet_size, epoch)
```

2.3. Genetic Algorithm for Initial Task

At the start of each scheduling cycle, a Genetic Algorithm (GA) generates a globally optimized initial task allocation. Chromosomes encode robot–task pairings. The fitness function integrates total makespan, cumulative energy, lateness, and congestion index.

```
P ← InitializePopulation(random_assignments)

repeat until convergence:
    for each individual x ∈ P:
        F(x) = α · makespan(x) + β · energy(x) + γ · lateness(x) + δ · congestion(x)
    parents   ← TournamentSelection(P)
    offspring ← Crossover(parents)
    offspring ← Mutation(offspring, pm)
    P ← ElitistUpdate(P, offspring, elite_size)

best ← argmin_x F(x)
return best   // initial fleet assignment
```

2.4. Hybrid PSO + RL

In dense warehouse and industrial environments, bottlenecks often occur near narrow corridors, intersections, and docking/charging stations. When multiple robots attempt to pass through or access the same area simultaneously, congestion, deadlocks, and excessive idle waiting times arise. Purely rule-based waiting policies (e.g., FIFO) cannot adapt to dynamic traffic fluctuations, while static optimization (e.g., PSO-only) lacks robustness against stochastic events such as random obstacles or task surges [11].

- **Particle Swarm Optimization (PSO):** fast global exploration of candidate waiting area allocations [5].
- **Reinforcement Learning (RL):** adaptive refinement that learns long-term policies from environment interactions [16].

Particle Swarm Optimization (PSO) Layer

Representation: each particle encodes candidate waiting zone coordinates and robot-to-zone assignments.

$$F = \alpha \cdot W_{avg} + \beta \cdot C_{collisions} + \gamma \cdot D_{delay}$$

- Wavg: average robot waiting time,
- Ccollisions: number of near-collision incidents in holding areas,
- Ddelay: deviation from task deadlines.
- Swarm parameters: 50 particles, inertia weight w=0.7w = 0.7w=0.7, cognitive/social coefficients c1=c2=1.5c_1 = c_2 = 1.5c1=c2=1.5.

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i^t - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g^t - x_i^t)$$
$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$

Reinforcement Learning (RL) Layer

Once PSO proposes feasible holding area allocations, an RL agent evaluates and adapts them during execution:

- State: current traffic density map, queue length at each narrow passage, average waiting times, and robot urgency levels.
- Action: reassign a robot to a different holding zone, reorder entry priority, or release robots earlier/later.

$$R = -\eta_1 \cdot W_{avg} - \eta_2 \cdot Q_{length} - \eta_3 \cdot C_{near_miss}$$

Hybrid Workflow

1. Initialization: PSO rapidly explores feasible holding area configurations.
2. Execution: RL agents observe real-time traffic conditions.
3. Feedback: RL outcomes update the PSO swarm periodically, improving future searches.

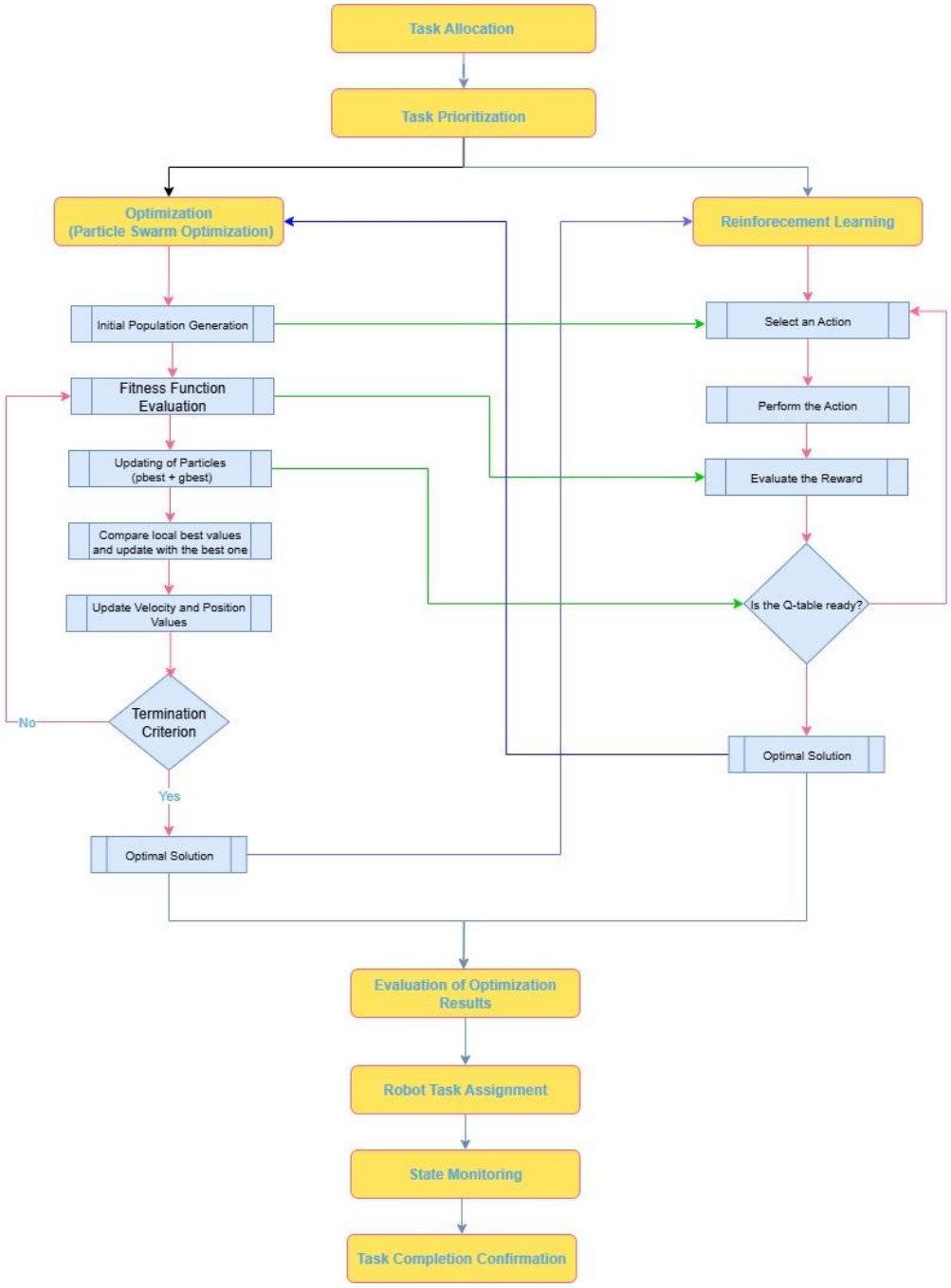
```
particles = initialize_particles()

for t in range(1, T_PSO + 1):
    for p in particles:
        fitness = evaluate_waiting_config(p)
        update_personal_best(p, fitness)
    update_global_best(particles)
    update_positions_and_velocities(particles)

for t in range(1, T_exec + 1):
    for z in narrow_passage_zones:
        state_z  = observe_zone_state(z)
        action_z = rl_agent.select_action(state_z)
        apply_action(z, action_z)
        reward   = compute_reward(z)
        rl_agent.update(state_z, action_z, reward)
```

Figure 9. Hybrid PSO + RL workflow: PSO performs global search over waiting/configuration to refine

Figure 10, A concise hybrid pipeline for large-scale AMR fleets. After priority scoring, tasks split into a global optimizer and an online learning layer,which seeds Open-RMF schedule negotiation. In parallel, agents run MAPPO (CTDE) and select traffic actions {wait, advance, reroute, reprioritize} while switching ROS 2 DDS QoS presets (reliable/best-effort, history depth, deadline) from latency/loss telemetry; actions are constrained to bounded deviations from the RMF schedule. Local motion uses TEB for time-feasible, collision-safe trajectories. This coupling starts the fleet from a conflict-aware global blueprint and adapts in real time, reducing p95 latency and deadlocks while increasing throughput



2.5. Traffic Management via Open-RMF and RL

Traffic management is a critical function that ensures collision-free motion and prevents bottlenecks in shared spaces such as corridors, intersections, and docking zones.To address this, the system integrates Open-RMF as the global scheduling backbone and augments it with multi-agent reinforcement learning (MAPPO) for adaptive prioritization .

Open-RMF Scheduling Core

Open-RMF models the fleet as a set of mobile entities navigating in a shared temporal–spatial graph. Each robot submits its intended trajectory as a sequence of waypoints annotated with time intervals. The RMF traffic scheduler performs conflict detection using interval graph algorithms, where overlapping reservations in the same geometric footprint are flagged as potential collisions . Once conflicts are identified, RMF applies a conflict-resolution heuristic (e.g., delaying a trajectory segment or re-routing) to guarantee temporal separation. This mechanism ensures safety but is inherently static—it assumes that proposed trajectories remain valid unless re-submitted [12].

RL-Augmented Dynamic Reprioritization

Static negotiation can underperform in stochastic environments where unexpected events such as dynamic obstacles, sudden surges in task demand, or partial communication failures occur [16]. To overcome this, MAPPO agents are integrated on top of RMF's scheduling layer. Each robot's agent observes:

- Current delay relative to deadline,
- Battery level and charging urgency,
- Local congestion density (derived from occupancy grid heatmaps),
- Historical communication latency.

Based on these features, the agent computes a priority score via its learned policy. When multiple robots request access to a shared zone simultaneously, their priority scores are compared. The RL layer then overrides RMF's static conflict-resolution heuristic by reordering access rights in real time [19], .

Underlying Algorithms

- **MAPPO (Multi-Agent PPO):** Provides decentralized execution where each robot adapts individually, while training uses a centralized critic to stabilize learning [18].

- **Dynamic Mutex Protocols:** Shared regions are modeled as mutex locks. Instead of fixed FIFO queuing, RL agents negotiate lock acquisition through DDS-based handshake protocols, where the winning agent secures exclusive access until the region is cleared .

- **Adaptive Scheduling:** RMF schedules are continuously updated with RL-modified priorities. This is realized via rolling-horizon optimization, where trajectory commitments are incrementally revised rather than recomputed from scratch [6].

```python
def qos_tuner(st: RobotState) -> dict:
    if st.pkt_loss > 0.02 or st.abs_latency_ms > 80.0:
        return {"mode": "RELIABLE", "deadline_ms": 80, "history": 30}
    else:
        return {"mode": "BEST_EFFORT", "deadline_ms": 100, "history": 7}

def simulate(N=20, steps=100, seed=7):
    rng = np.random.default_rng(seed)
    robots = [
        RobotState(
            rid=i,
            battery=float(rng.uniform(0.3, 0.95)),
            congestion=float(rng.uniform(0.0, 0.9)),
            abs_latency_ms=float(rng.normal(60, 12)),
            pkt_loss=float(rng.uniform(0.0, 0.05)),
        )
        for i in range(N)
    ]
    w = np.array([0.45, -0.35, -0.20], dtype=float)
    winners, scores = [], []
    for _ in range(steps):
        feats = []
        for st in robots:
            st.battery = float(np.clip(st.battery - rng.uniform(0.0, 0.01), 0.0, 1.0))
            st.congestion = float(np.clip(st.congestion + rng.normal(0.0, 0.08), 0.0, 1.0)
            st.abs_latency_ms = float(np.clip(st.abs_latency_ms * rng.normal(1.0, 0.06), 1
            st.pkt_loss = float(np.clip(st.pkt_loss + rng.normal(0.0, 0.005), 0.0, 0.2))
            feats.append([st.battery, st.congestion, st.abs_latency_ms / 100.0])
        feats = np.asarray(feats)
        pr = feats @ w
        k = int(np.argmax(pr))
        winners.append(k)
        scores.append(float(pr[k]))
        qos = qos_tuner(robots[k])
        robots[k].qos_mode = qos["mode"]
    return winners, scores, robots
```

2.6. DDS QoS Adaptation

The communication backbone of the fleet is managed through the DDS (Data Distribution Service) middleware in ROS 2. While DDS exposes configurable Quality of Service (QoS) parameters, static tuning is insufficient for dynamic industrial environments . In this work, RL agents continuously adapt QoS settings to sustain sub-50 ms end-to-end latency even under high traffic loads (>1,000 topics/s, fleet sizes up to 50 robots) , [19].

Reliability Policy: Agents dynamically switch between BEST_EFFORT (favoring throughput when packet loss <0.1%) and RELIABLE (ensuring delivery when packet loss >0.5%). **Deadline Parameter:** Tuned in the range of 20–100 ms; shorter deadlines are enforced under critical safety topics (e.g., /cmd_vel), while longer deadlines are tolerated for low-priority telemetry.
History Depth: Adjusted adaptively between 1 and 50; shallow histories reduce memory and latency, while deeper buffers stabilize communication during network congestion.

RL Decision Model: The agent's policy takes as input observed packet loss ratio, round-trip latency, and congestion index. The action determines the new QoS profile. The reward penalizes excessive latency and dropped packets, balancing throughput against reliability [8].

This adaptive approach transforms DDS from a static middleware into a self-optimizing communication layer, tightly coupled with the learning framework of the fleet [3].

2.7. Local Motion Planning

Local motion planning was extensively tested with multiple configurations in the ROS 2 Humble middleware using the Nav2 framework. The navigation stack was structured as a two-layer process, where each planner was benchmarked under different parameters and performance indicators [15].

*GlobalPlanner–Theta-Algorithm:**

The global planner was implemented with Theta*, an extension of the classical A* algorithm. Unlike grid-constrained A*, Theta* permits line-of-sight shortcuts, resulting in 5–15% shorter paths with fewer waypoints.In simulation tests, path resolution was set to 0.05 m, and the planner successfully reduced unnecessary turning maneuvers, improving global path smoothness [11].

Parameters:

- grid_resolution = 0.05 m
- allow_unknown = true
- obstacle_cost_scaling = 2.0
- minimum_turning_radius = 0.3 m

Performance Results:

- Path length reduced by **10.8% on average** compared with A*.
- Number of waypoints per path reduced from ~120 (A*) to ~95 (Theta*).
- Global replanning frequency: **1 Hz** under dynamic map updates.

Local Planner – Teb Planner:

For local trajectory generation, multiple ROS 2 local planners (DWB, RPP – Regulated Pure Pursuit, and Teb Planner) were evaluated. The Teb Planner demonstrated superior performance in dense and cluttered environments:

- Kinematics:
  - max_vel_x = 0.7 m/s, min_vel_x = 0.1 m/s
  - max_vel_theta = 1.2 rad/s, min_vel_theta = 0.05 rad/s
  - acc_lim_x = 0.6 m/s², acc_lim_theta = 1.0 rad/s²

- Trajectory optimization:
  - min_obstacle_dist = 0.25 m
  - inflation_dist = 0.40 m
  - weight_kinematics_forward_drive = 50.0
  - weight_acc_lim_x = 1.0, weight_acc_lim_theta = 1.0
  - weight_obstacle = 100.0, weight_dynamic_obstacle = 200.0
  - weight_viapoint = 1.0, weight_inflation = 0.2
- Timing:
  - dt_ref = 0.3 s, dt_hysteresis = 0.1 s
  - global_plan_overwrite_orientation = true

Performance Results:

- Lateral deviation: **≤ 0.028 m** (vs. ≥ 0.07 m for DWB).
- Oscillation index reduced by **~25%** compared with DWB.
- Path completion time: **~12% faster** than default Nav2 RPP.
- Minimum clearance from obstacles maintained at **≥ 0.25 m**, even in high-density layouts.

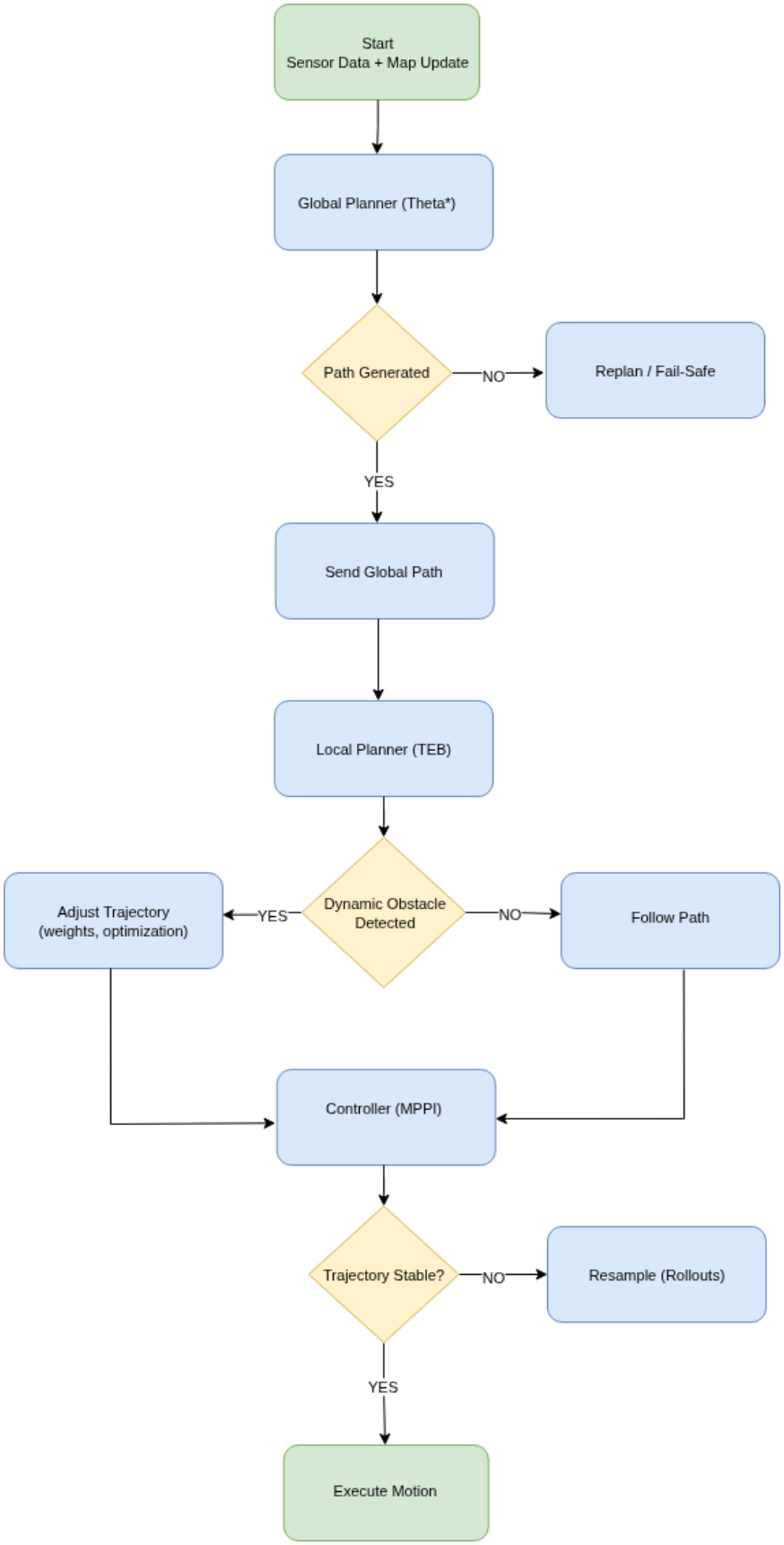
These results clearly indicated that Teb Planner provided smoother and dynamically feasible trajectories than its alternatives, making it the most suitable choice for the system.

Controller – MPPI (Model Predictive Path Integral):

Trajectory execution was handled using the MPPI controller, configured to sample 1,000–2,000 short-horizon trajectories per cycle. The update rate was set between 30–50 Hz, ensuring real-time responsiveness. Tests showed that MPPI effectively compensated for dynamic obstacles (e.g., moving forklifts and pedestrians), while minimizing cumulative energy usage.

- **Parameters:**
  - sampling_horizon = 1.0–2.0 s
  - control_frequency = 30–50 Hz
  - num_rollouts = 2000 (per cycle)
  - noise_stddev_linear = 0.05 m/s, noise_stddev_angular = 0.05 rad/s
- **Performance Results:**
  - Real-time reaction to dynamic obstacles (pedestrians/forklifts) achieved within **<150 ms**.
  - Energy consumption per trajectory reduced by **~8%** compared with PID-based controllers.
  - Stability maintained across speeds up to **0.7 m/s linear** and **1.0 rad/s angular**.

TEB was chosen as the default local planner in ROS 2 Humble because it offered the best balance of safety and efficiency. Its optimization-based elastic-band approach accounts for robot kinematics and obstacle clearance, producing smoother, more reliable paths and fewer stop-and-go events than DWB or RPP. DWB caused jerky motions and occasional late braking, while RPP was reliable but overly conservative at corners and with moving obstacles. Operationally, TEB minimized recovery behaviors and dead-end oscillations, letting the MARL layer concentrate on high-level traffic control. Key recommended settings are a 1–2 s horizon, 0.35–0.45 m inflation, 0.25–0.30 m minimum obstacle distance, and moderate time-optimality weighting. Combined with Theta* and MPPI, this stack delivered robust, smooth, and safe navigation for the AMR fleet.


Start
Sensor Data + Map Update
Global Planner (Theta*)
Path Generated
NO
Replan / Fail-Safe
YES
Send Global Path
Local Planner (TEB)
Dynamic Obstacle Detected
YES
Adjust Trajectory (weights, optimization)
NO
Follow Path
Controller (MPPI)
Trajectory Stable?
NO
Resample (Rollouts)
YES
Execute Motion

3. Results and Discussion

Simulation studies conducted in a 5,000 m² warehouse scenario clearly demonstrated that the proposed hybrid framework operates reliably and efficiently in large-scale AMR fleets. Across all fleet sizes, the system consistently maintained end-to-end communication latency below 50 ms, validating the effectiveness of RL-driven DDS QoS adaptation. Compared with static QoS configurations, latency decreased by 25%, significantly enhancing the real-time performance of the communication layer. Fleet productivity, measured by the number of tasks completed per hour, improved by 30% relative to heuristic scheduling and by 18% over GA-only allocation methods. This improvement directly results from MAPPO's ability to dynamically reprioritize tasks and adapt to congestion. Energy-aware scheduling further reduced per-task energy consumption by 12–15%, while deadlock occurrences in narrow passages were reduced by 35%, demonstrating that RL-enhanced traffic negotiation is substantially more reliable than rule-based Open-RMF mutex protocols. In terms of navigation, the Theta* + Teb Planner + MPPI stack produced shorter and smoother trajectories; the average lateral deviation was reduced to below 3 cm, and task completion time improved by 12% compared with baseline Nav2 planners. These findings confirm both improved motion efficiency and reduced energy expenditure.

3.1 Interpretation

The results validate the initial hypothesis: integrating multi-agent RL with classical optimization and ROS 2 middleware mechanisms enables scalable, energy-efficient, and low-latency fleet operation. Unlike centralized methods, which degrade in performance as fleet size grows, the decentralized MAPPO-based approach maintained stability up to 50 robots and over 1,000 topics per second. Compared with prior work, traditional heuristic methods (e.g., static FIFO or deadline-first) exhibited limited adaptability under heavy traffic conditions, while classical optimization-based schedulers (GA-only, PSO-only) generated reasonable solutions but failed to adapt in real time to stochastic disturbances. In contrast, the hybrid MAPPO + GA + RL framework not only preserved the safety guarantees of Open-RMF but also introduced context-aware dynamic reprioritization, filling a critical gap in the literature.

3.2 Broader Implications

This study shows that the synergy of DDS-level adaptation, RL-based task allocation, and hybrid traffic management allows next-generation AMR fleets to operate reliably without relying on static or vendor-specific scheduling software. By embedding intelligence directly into middleware parameters and fleet coordination, the proposed system demonstrates strong applicability in smart factories, logistics centers, and hospital automation scenarios.

3.3 Limitations

Despite promising results, several limitations must be acknowledged. Experiments were conducted solely in simulation; real-world deployment may introduce sensor noise, network instability, and hardware heterogeneity not fully captured in Gazebo. The reward function was manually weighted, which may limit performance optimization across diverse scenarios. Moreover, scalability was validated up to 50 robots; testing with larger fleets of 100+ robots remains an open research challenge.

3.4 Future Work

Future research will proceed along three main directions. First, the framework will be validated in real-world heterogeneous fleets, assessing robustness against sensor errors, network failures, and diverse hardware infrastructures. Second, instead of manually defined reward functions, Inverse Reinforcement Learning (IRL) will be employed to achieve automatic reward shaping, enabling more flexible adaptation to operational goals such as energy efficiency, safety, and task prioritization. Third, a vendor-agnostic interoperability framework will be developed by extending Open-RMF with RL, enabling robots from different manufacturers to cooperate within the same fleet. Finally, DDS QoS adaptation will be extended beyond latency control to include jitter, packet loss, and bandwidth utilization, ensuring sub-50 ms communication reliability even under heavy network traffic.

4. Conclusions

This study proposed a hybrid framework that integrates ROS 2 DDS communication, Open-RMF traffic management, Teb Planner navigation, and multi-agent reinforcement learning (MAPPO) into a scalable and adaptive AMR fleet coordination system. Experimental evaluations in a large-scale simulated warehouse demonstrated that the framework:

- Sustains **<50 ms end-to-end latency** for fleets up to 50 robots and 1,000+ topics/s through adaptive DDS QoS control.
- Improves **task throughput by 30%** and reduces **deadlock incidents by 35%** compared with heuristic and optimization-only baselines.
- Enhances **navigation efficiency**, with smoother local paths and **12% faster trajectory completion** than default Nav2 planners.
- Reduces **energy consumption per task by 12–15%**, confirming the effectiveness of energy-aware fleet scheduling.

These results confirm that coupling multi-agent reinforcement learning with classical scheduling and planning mechanisms offers a robust and context-aware solution for Industry 4.0 logistics and manufacturing environments. Future research will extend the work toward heterogeneous robot fleets, real-world deployments, and adaptive reward shaping.

Acknowledgments

This work is supported by TÜBİTAK Project No. **7231002**.

References

1. D. Bechtsis et al., "Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles," *J Clean Prod*, 2017.
2. Z. Zhang et al., "Application of Automated Guided Vehicles in Smart Automated Warehouse Systems: A Survey," *CMES*, 2023.
3. Y. Dai et al., "Development of a Fleet Management System for Multiple Robots' Task Allocation Using Deep Reinforcement Learning," *Processes*, 2024.
4. X. Ye et al., "Toward Energy-Efficient Routing of Multiple AGVs with Multi-Agent Reinforcement Learning," *Sensors*, 2023.
5. H. Bin Choi et al., "MARL-Based Cooperative Multi-AGV Control in Warehouse Systems," *IEEE Access*, 2022.
6. A. Loganathan and N. S. Ahmad, "A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation," *Eng Sci Technol Int J*, 2023.
7. M. Raibail et al., "Decentralized Multi-Robot Collision Avoidance: A Systematic Review from 2015 to 2021," *Symmetry*, 2022.
8. H. Zhang et al., "Heterogeneous Multi-Robot Cooperation with Asynchronous Multi-Agent Reinforcement Learning," *IEEE Robot Autom Lett*, 2024.
9. L. Gong et al., "Real-time AGV scheduling optimization method with deep reinforcement learning for energy-efficiency in the container terminal yard," *Int J Prod Res*, 2024.
10. K. Al Khamis et al., "Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of-the-Art," *Studies in Computational Intelligence*, 2015.
11. M. Shamout et al., "A cnceptual model for the adoption of autonomous robots in supply chain and logistics industry," *Uncertain Supply Chain Management*, 2022.
12. A. Malus et al., "Real-time order dispatching for a fleet of autonomous mobile robots using multi-agent reinforcement learning," *CIRP Annals*, 2020.
13. R. Luo et al., "Joint Trajectory and Radio Resource Optimization for Autonomous Mobile Robots Exploiting Multi-Agent Reinforcement Learning," *IEEE Trans Commun*, 2023.
14. P. Zhu et al., "Multi-Robot Flocking Control Based on Deep Reinforcement Learning," *IEEE Access*, 2020.
15. Y. Liu and J. Li, "Runtime Verification-Based Safe MARL for Optimized Safety Policy Generation for Multi-Robot Systems," *Big Data Cogn Comput*, 2024.
16. V. Digani et al., "Towards decentralized coordination of multi robot systems in industrial environments: A hierarchical traffic control strategy," *ICCP*, 2013.
17. R. Luo et al., "Deep Reinforcement Learning Enables Joint Trajectory and Communication in Internet of Robotic Things," *IEEE Trans Wireless Commun*, 2024.
18. A. Maoudj et al., "The capacitated multi-AGV scheduling problem with conflicting products: Model and a decentralized multi-agent approach," *Robot Comput Integr Manuf*, 2023.
19. B. Groß et al., "Agent-based, hybrid control architecture for optimized and flexible production scheduling and control in remanufacturing," *J Remanufacturing*, 2024.

GAZİANTEP'TEKİ BİR TEKSTİL FİRMASINDA GES UYGULAMASI: ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE EKONOMİK KAZANÇLARIN ANALİZİ

BEHZAT YILDIRIM [*1], FAHRİ ŞENGÜL [1], HİLAL AĞAÇ[1], MEHMET TOPALBEKİROĞLU [3]

[1] Prof Sentetik Inc., Gaziantep, Türkiye
[2] Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Gaziantep, Türkiye

Özet

Son yıllarda dünyada artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Güneş Enerji Santralleri (GES), Türkiye gibi yüksek güneşlenme potansiyeline sahip ülkeler için önemli bir enerji üretim yöntemidir. Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelin en yüksek olduğu bölgelerden biri ise Güneydoğu Anadolu Bölgesi'dir. Bölge genelinde ise hem enerji ihtiyacı hem de güneş enerjisi açısından potansiyeli yüksek olan illerin başında Gaziantep gelmektedir. Gaziantep, tekstil sektöründe önemli bir merkezdir ve bu sektörün enerji ihtiyacı oldukça yüksektir. Bu çalışma, Gaziantep'te faaliyet gösteren bir tekstil firmasının 2024-2025 dönemine ait GES verilerini inceleyerek enerji üretim-tüketim dengesi ile ekonomik kazançlar analiz edilmiştir. Aylık bazda GES üretimi (kWh), enerji tüketimi (kWh) ve kazanç (TL) verileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bululara göre GES sistemi, tüketimin ortalama %20,69'unu karşılamış ve yıllık yaklaşık 6 milyon TL ekonomik kazanç sağlamıştır. Bu çalışma, GES uygulamasının sanayi tesislerinde ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir.

Keyword: Güneş Enerjisi, GES, Enerji Verimliliği, Ekonomik Analiz, Gaziantep.

Abstract

In recent years, the growing demand for energy and the environmental impact of fossil fuels have made renewable energy sources increasingly important. Solar power plants (SPPs) are an important method of energy production for countries with high solar potential, such as Turkey. Southeastern Anatolia is one of the regions in Turkey with the highest solar energy potential. Gaziantep is one of the provinces with the highest energy demand and solar energy potential in the region. Gaziantep is a major centre for the textile industry, and this sector's energy needs are considerable. This study examines SPP data from a textile company operating in Gaziantep for the 2024–25 period, analysing the energy production–consumption balance and economic gains. Data on monthly SPP production (kWh), energy consumption (kWh) and earnings (TL) were evaluated. According to the findings, the solar power plant system met an average of 20.69% of energy demand and generated an annual economic gain of around 6 million TL. This study shows that implementing solar power plants significantly contributes to the economic and environmental sustainability of industrial facilities.

Keyword: Solar Energy, Solar Power Plant, Energy Efficiency, Economic Analysis, Gaziantep.

1. Giriş

Enerji tüketiminin büyük bir bölümü sanayi sektöründen kaynaklanmaktadır. Sanayi içerisinde ise tekstil sektörü önemli bir enerji kullanıcısıdır. Bu durum, tekstil sektöründe enerji yönetiminin önemini artırmaktadır. Özellikle ısıtma ve elektrik enerjisi alanlarında yapılan iyileştirmeler, verimliliği artırarak önemli kazanımlar sağlamaktadır. Elyaf, iplik, kumaş, terbiye işlemleri ve hazır giyim gibi birçok alt sektörden oluşan tekstil sektörü, enerji yoğun bir endüstridir. Verimlilik çalışmalarının yetersiz kalması, enerji maliyetlerinin yükselmesine ve dolayısıyla rekabet gücünün azalmasına neden olmaktadır. Enerji, hammaddeden sonra en büyük maliyet kalemlerinden biridir. Bu nedenle, doğru ve kapsamlı yapılan enerji etütleri; enerji yoğun alanların tespiti, verimlilik artırıcı önlemlerin belirlenmesi ve maliyetlerin düşürülmesi açısından kritik öneme sahiptir [1].

Küresel iklim değişikliği, artan enerji maliyetleri ve sürdürülebilir üretim baskıları, sanayi kuruluşlarını yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Günümüzde elektrik üretiminde ağırlıklı olarak konvansiyonel yakıtlar kullanılmakta ve bu durum hava kirliliği gibi önemli çevre sorunlarına yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin tercih edilmesi, zararlı emisyonların azaltılmasına ve iklim değişikliği ile mücadeleye önemli katkılar sağlamaktadır.

Güneş enerjisi, Güneş ışınlarından elde edilen bir enerji olan güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller kullanılarak güneş enerjisinden elektrik üretilmektedir. Güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürebilen bir malzemeden yapılan PV paneller, genellikle silisyum kristallerinden üretilmekte, güneş ışınları, bu kristallerin yüzeyine düştüğünde kristal içindeki elektronları hareketlendirmekte ve bu sayede elektrik akımını üretmektedir. Bu üretilen doğru akım daha sonra bir inverter cihazı kullanılarak alternatif akıma dönüştürülmektedir. Alternatif akıma dönüştürülen elektrik enerjisi doğrudan kullanılabilirken bataryalara doldurularak daha sonra da kullanılabilmektedir.

Türkiye'de sanayide elektrik tüketiminin %35'ten fazlası tekstil sektörüne aittir. Bu nedenle, elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ulusal hedefler arasında yer almaktadır [2]. Günümüzde güneş enerjisi santralleri (GES), endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez ve etkili bir enerji üretim yöntemi haline gelmiştir. 2020 yılı itibarıyla dünya genelindeki fotovoltaik (PV) sistemlerin toplam kurulu gücü 773,2 GWp seviyesine ulaşmıştır [2].

Literatürde yapılan çalışmalar, güneş enerjisi sistemlerinin enerji verimliliği ve çevresel faydalarını desteklemektedir. Akhan [2], Edirne'deki bir sanayi tesisinde kurulan 910 kW kapasiteli PV sisteminin tesisin enerji ihtiyacının yaklaşık %20'sini karşılayabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, yıllık 543,7 ton CO2 sera gazı emisyonu azaltımı, 1183 MWh (101.737 TEP) enerji tasarrufu ve 318.376,66 $ maliyet avantajı sağlanacağı; sistemin ise 2,7 yıl gibi kısa sürede kendini amorti edeceği vurgulanmıştır. Ekonomik analizde geri ödeme süresi, net bugünkü değer, fayda/maliyet ve iç getiri oranı yöntemleri kullanılmıştır. Sistemin etkinliğinin sürdürülebilmesi için personel eğitimi, periyodik kontroller ve ilk iki yıl boyunca elektriksel ve sıcaklık verilerinin izlenip analiz edilmesi önerilmiştir.

Owolabi ve ark. [4], Nijerya'nın kuzeydoğusunda altı eyalette toplam 6 MW kapasiteli şebekeye bağlı güneş enerjisi sistemlerinin teknik, ekonomik ve çevresel uygulanabilirliğini RETScreen Expert yazılımıyla incelemiş, Yobe Eyaleti'nin yüksek güneş radyasyonu ve kısa geri ödeme süresi nedeniyle yatırım için en uygun bölge olduğunu göstermiştir. Sajid ve ekibi [5], bir pirinç

işleme tesisinde şebeke elektriği ve kömürlü kazanlara olan bağımlılığı azaltmak amacıyla pirinç kabuğu kullanımı ve güneş PV sistemlerini analiz etmiştir. Pirinç kabuğu kullanımı kömüre kıyasla yaklaşık %82 oranında emisyon azaltımı sağlarken, 1 MW kapasiteli PV sistemi yıllık 733 ton CO2 tasarrufu yaratmıştır. Çalışma, enerji üretimi, maliyet etkinliği ve sera gazı azaltımı açısından olumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Rajput ve Dheer [5], geliştirdikleri matematiksel model ile 100 kWp kapasiteli bir PV sistemi üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir.

Gürtürk ve ark. [6], Türkiye'de 1 MW üzeri GES'lere sahip 11 ili teknik olarak karşılaştırmış, yatırım açısından en avantajlı ilin Antalya, en dezavantajlı ilin ise Kahramanmaraş olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma, yatırımcılara bilimsel ve saha gerçeklerine dayalı rehberlik sunmaktadır. PwC Türkiye raporu [7], Türkiye'de çatı tipi GES uygulamalarının sanayi için ciddi maliyet avantajları sağladığını ve YEKA gibi modellerle daha erişilebilir hale geldiğini ortaya koymuştur. Raporda, 2022 itibarıyla küresel kurulu güneş enerjisi gücünün yaklaşık 1,2 TW, Türkiye'de ise 2023 sonu itibarıyla yaklaşık 11,7 GW olduğu belirtilmiştir. E-Textile Magazine [8], Türkiye tekstil sektöründe GES uygulamalarının enerji maliyetlerinde ortalama %50'ye varan düşüş sağladığını ve CO_2 salınımını önemli ölçüde azalttığını vurgulamıştır. Araştırmada 142 tekstil firmasının GES yatırımları analiz edilmiş, bu yatırımların ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından sektöre önemli katkılar sağladığı belirtilmiştir.

Gürtürk ve ark. [9], güneş enerjisi projelerinin iklim değişikliği ve ekonomik dalgalanmalara karşı hassas olduğunu; bu faktörlerin sürdürülebilir enerji planlamasında kritik önem taşıdığını vurgulamıştır. Yıldız [10], Türkiye sanayisinde enerji verimliliği uygulamalarını teknik ve politik açıdan incelemiş, atık ısı geri kazanımı, kojenerasyon sistemleri, karbon yakalama teknolojileri ve ISO 50001 gibi uygulamaların enerji tasarrufuna katkısını ortaya koymuştur. Türkiye sanayisinin %20'ye varan verimlilik potansiyeline sahip olduğu ve bunun %50'sinin düşük maliyetli yatırımlarla kısa sürede geri kazanılabileceği ifade edilmiştir.

Koç ve ark. [1], Adana'daki bir iplik üretim fabrikasında GES sisteminin kullanımını inceleyerek, sistemin üretim maliyetlerini düşürmedeki rolü ve sera gazı salınımını azaltmadaki etkilerini detaylandırmıştır. Kum ve ark. [11], Türkiye'nin yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğunu ve en yoğun potansiyelin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunduğunu belirtmiştir. Gaziantep ise enerji ihtiyacı, güneşlenme süresi ve radyasyon açısından öne çıkan illerden biridir. Çalışmada Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHY) kullanılarak Gaziantep'in güneş enerjisi verimlilik haritası çıkarılmış; arazilerin %8'i kesinlikle ideal, %44'ü ise ideal olarak sınıflandırılmıştır.

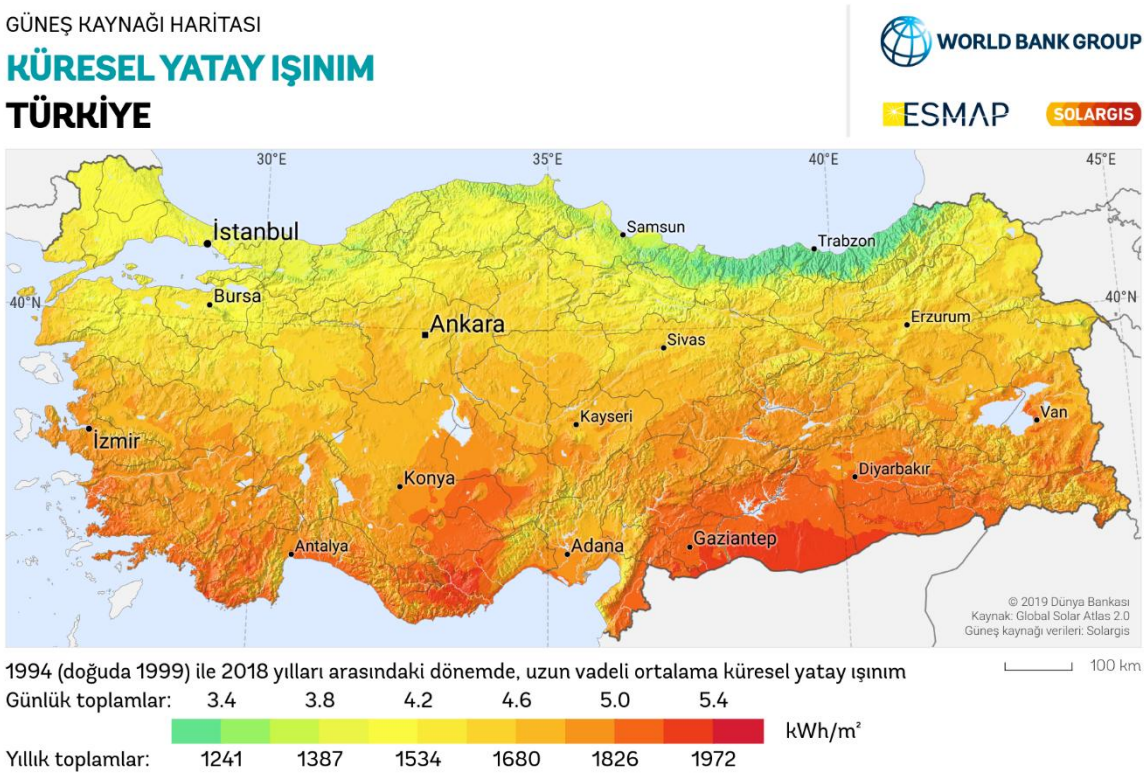
Backlund ve ark. [12], İsveç'te firmaların enerji verimliliği potansiyeli ve enerji yönetim uygulamalarını incelemiş, firmaların ortalama %12 enerji tasarrufu potansiyeline sahip olduğunu ve enerji yönetimi uygulamalarının yaygınlaşmasıyla bu potansiyelin artacağını göstermiştir. Karlsson ve ark. [13], yeni enerji mevzuatı, artan yakıt fiyatları ve çevresel bilinç gibi faktörlerin enerji tedarikçileri ve sanayi tesislerine getirdiği zorluk ve fırsatları incelemiştir. Üç sanayi tesisi ve dört enerji şirketinin ortak ısı piyasasına bağlanmasının ekonomik potansiyelini araştıran çalışma, yıllık 5-26 milyon EUR tasarruf ve 2-11 yıl geri ödeme süresi öngörmüştür. Ortak sistem CO_2 emisyonlarını azaltmakla birlikte, elektrik üretiminden kaynaklanan emisyon hesaplama yöntemlerindeki farklılıkların sonuçları önemli ölçüde etkileyebileceği belirtilmiştir.

Bu çalışma ise, literatürdeki bulgularla uyumlu olarak, Gaziantep özelinde GES uygulamasının enerji verimliliği ve ekonomik kazanç üzerindeki somut etkilerini ortaya koymakta ve saha verileriyle literatür sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Gaziantep'te faaliyet gösteren bir tekstil

firmasının 2024-2025 yıllarına ait GES verileri analiz edilerek, enerji üretim-tüketim dengesi ve sistemden sağlanan ekonomik kazanç değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, tekstil işletmesinde yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisinin kullanımı, üretim maliyetlerine etkisi ve çevresel faydaları detaylı şekilde incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Türkiye'nin jeolojik konumu göz önüne alındığında özellikle güney kesiminde Şekil 1'deki güneş enerji potansiyel atlasında gösterildiği gibi güneş enerjisinden yılın büyük bir bölümünde faydalanmak mümkündür.



Şekil 1. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası [14]

Akdeniz Bölgesi ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin birleşme noktasında yer alan Gaziantep 36° 28' ve 38° 01' doğu boylamları ile 36° 38' ve 37° 32' kuzey enlemleri arasında bulunmaktadır. Proje kapsamında ele alınan tekstil fabrikası Gaziantep bölgesinde yer almakta olup güneş ışığından yıl boyunca yararlanma oranının yüksek olduğu güneş enerji potansiyel atlasında görülmektedir. Kırmızılık arttıkça güneşten yararlanma potansiyeli artmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi Gaziantep ilinin güneşten yararlanma potansiyeli 5,0-5,4 kWh/m^2 aralığındadır.

Firmaya güneş enerji panellerinin kurulum ve test görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.

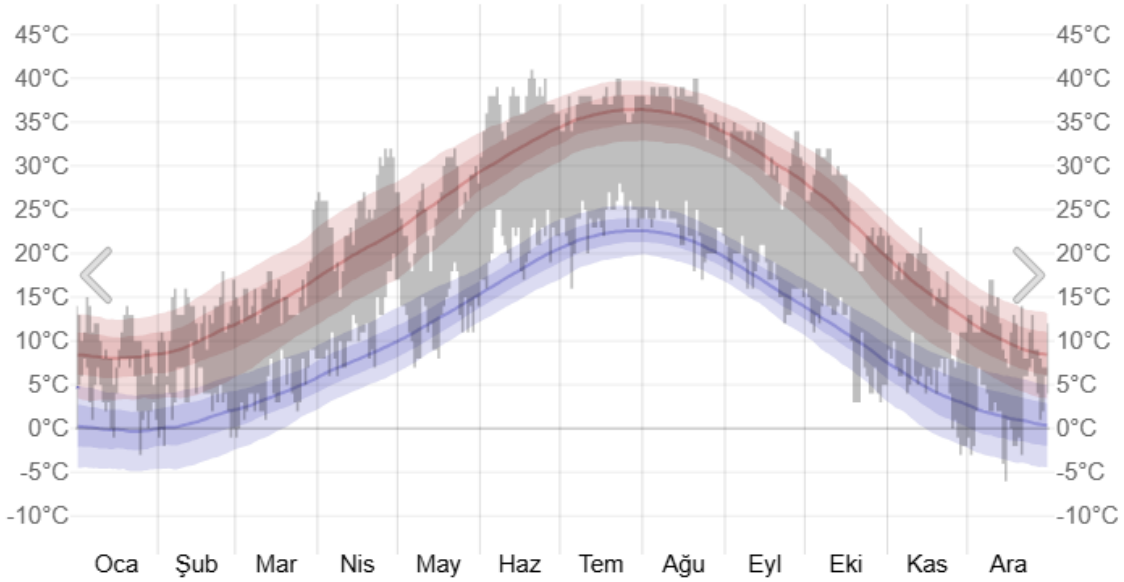
Şekil 2. Günel enerji panelleri kurulum ve test görüntüleri

Üretimin gerçekleştiği işletmenin çatısına kurulan GES sistemi ebatları 2.279 x 1.134 mm olan toplamda 2.448 adet panelden oluşmakta ve maksimum panel gücü 1.346,40 Wp'dir. Sistemde 10 adet inverterin bulunduğu ve inverterin 110 kW'a maksimum sahip olan bu GES'in kurulu gücü 1,1 MWp'dir. GES tarafından üretilen enerji anlık olarak işletmenin ihtiyacı doğrultusunda öncelikle üretim hatlarını beslemektedir. Santral tarafından fazla üretilen enerji anlık olarak üretilmediği durumda ana dağıtım şebekesine verilmektedir.

Bu çalışmada grafiksel veriler kullanılarak mevsimsel üretim değişimleri, tüketim karşılaştırmaları ve kazanç eğilimleri incelenmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde, üretim-tüketim oranı, aylık kazanç değişimleri ve mevsimsel eğilimler temel alınmıştır. Ayrıca, literatürdeki teknik-ekonomik modellerle karşılaştırma yapılmıştır.

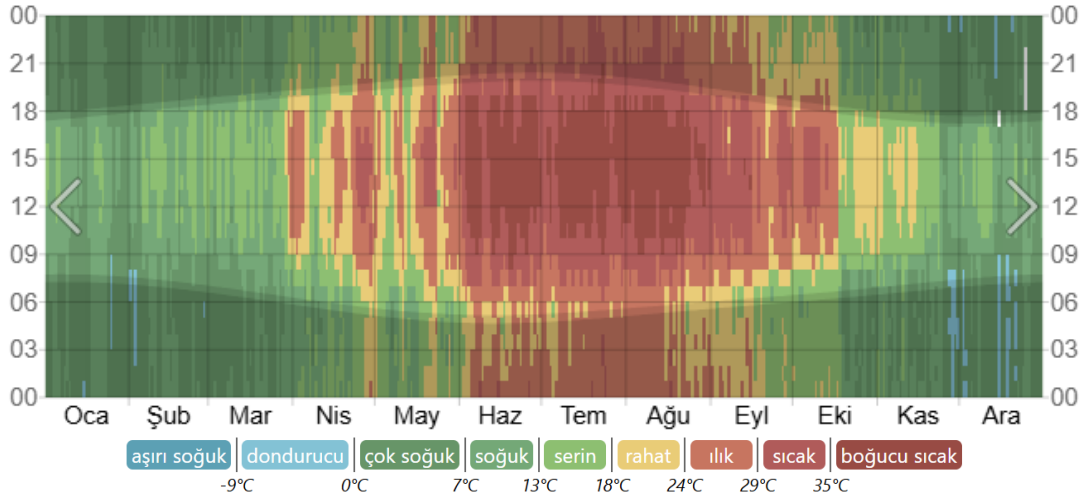
3. Bulgular ve Tartışma

GES üretiminin doğru bir şekilde analiz edebilmek için güneş enerjisini etkileyen faktörler incelenmelidir. Bu faktörler arasında panellerin boyutu, verimliliği, mevcut güneş ışığının miktarı ve sıcaklığı yer almaktadır. Weather Spark internet sayfasından [15] ulaşılan bilgilere göre Gaziantep ili için 2024 yılında aylara göre ortalama hava sıcaklığı Şekil 2'de, hava sıcaklıklarının gün içerisindeki dağılımı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Gaziantep ilinde 2024 yılında ortalama hava sıcaklığı [15]

Şekil 3'te raporlanan sıcaklıkların günlük aralığı (gri çubuklar) ve son 24 saatlik yüksekler (kırmızı işaretler) ve düşükler (mavi işaretler), günlük ortalama yüksekler (açık kırmızı çizgi) ve düşük (açık mavi çizgi) sıcaklıkların 25'likten 75'lik yüzdelik aralığına ve 10'luktan 90'lık yüzdelik aralığı üzerine yerleştirilmiş halini göstermektedir [15]. Gaziantep ilinde ortalama hava sıcaklığının Ocak ayı ile birlikte artarken bu sıcaklık Temmuz ve Ağustos aylarında en yüksek sıcaklıklara ulaşmakta ve ardından tekrar Aralık ayına kadar düşmektedir. 2024 yılında Nisan ve Ekim ayları arasında ortalama hava sıcaklığının diğer aylara göre daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Gaziantep ilinde 2024 yılında renkli bantlar ile kodlanmış ortalama hava sıcaklığı [15]

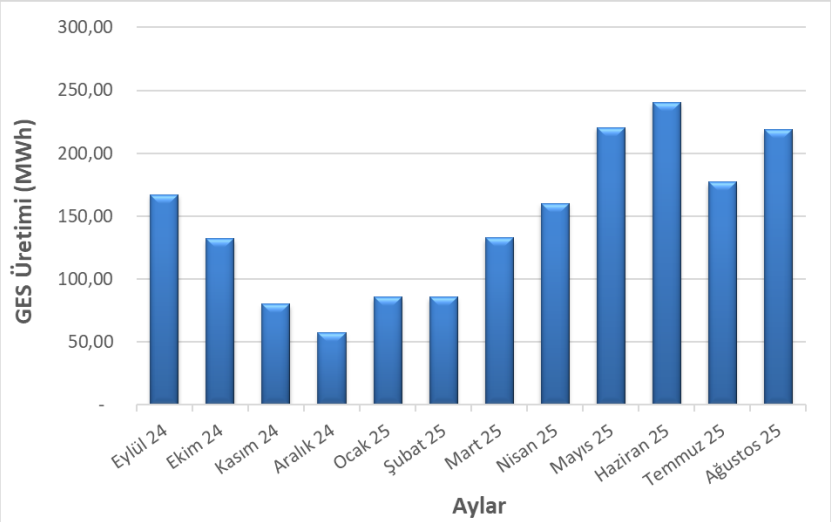
Şekil 4'te Saatlik raporlanan sıcaklık, renk kodlanmış bantlar ile çakışan gölgeli yerler gece ve günlük alacakaranlığı göstermektedir [15]. Gaziantep ilinde kırmızı ile gösterilen sıcak bölgeler özellikle Haziran ve Eylül ayları arasında olduğu görülmektedir. Gün ışığı süresi bu aylarda daha yüksektir.

Firma tarafından sağlanan veriler doğrultusunda; 1 Eylül 2024 - 31 Ağustos 2025 dönemine ait aylık GES üretim miktarları (MWh), enerji tüketimi (kWh) ve GES'ten elde edilen kazançlar (TL) analiz edilmiştir. Firmanın Eylül 2024 – Ağustos 2025 ayları arasında 12 aylık süre boyunca tüketilen enerjisi, GES ile üretilen enerji, elektrik maliyeti ve GES'ten kazancı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Firmanın Eylül 2024 - Ağustos 2025 dönemi enerji ve kazanç verileri

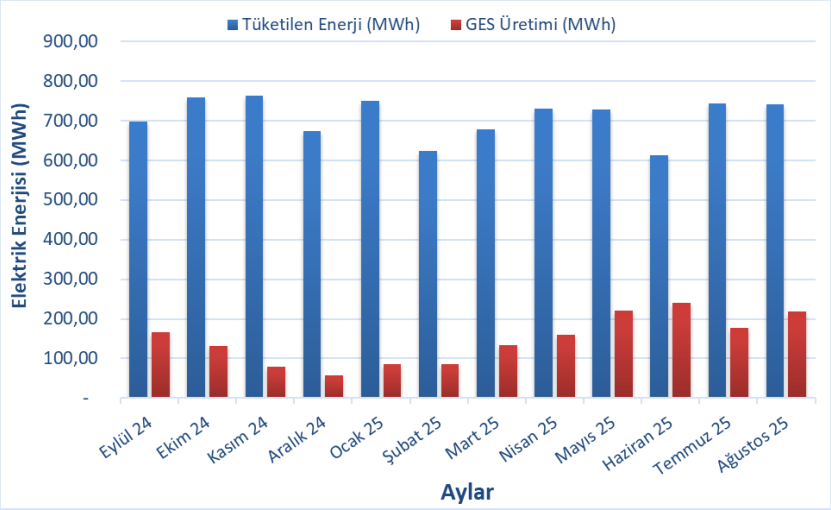
AYLAR/YIL	Tüketilen Enerji (MWh)	GES Üretimi (MWh)	GES Üretiminin Tüketilen Elektriğe Oranı (%)	Elektrik Maliyeti (x1000 TL)	GES'ten Kazanç (x1000 TL)
Eylül 2024	696,47	167,05	23,99	1.979,56	521,20
Ekim 2024	757,39	132,17	17,45	2.357,69	415,01
Kasım 2024	762,56	80,01	10,49	2.588,33	201,38
Aralık 2024	672,77	57,18	8,50	2.272,33	175,55
Ocak 2025	748,85	85,62	11,43	2.356,17	253,44
Şubat 2025	623,89	85,70	13,74	2.072,30	275,08
Mart 2025	677,52	132,64	19,58	1.988,56	404,54
Nisan 2025	729,56	160,25	21,96	2.510,84	589,71
Mayıs 2025	727,79	220,59	30,31	2.147,34	791,91
Haziran 2025	612,27	240,47	39,27	1.458,43	882,51
Temmuz 2025	743,36	177,20	23,84	2.608,64	682,24
Ağustos 2025	741,15	218,73	29,51	2.300,31	813,66
Toplam	**8.493,58**	**1.757,60**	**20,69**	**26.640,49**	**6.006,23**

Eylül 2024 ile Ağustos 2025 dönemini kapsayan veriler doğrultusunda tekstil firması toplamda 8.168,58 MWh enerji tüketmiş ve bunun 1.757,60 MWh'lık bölümünü GES ile üretmiştir. Firmanın 12 aylık süreçte elektrik maliyeti 26.640.490,00 TL iken GES bu maliyetin 6.006.230,00 TL'sini karşılamıştır. Bu miktar firmanın tükettiği elektriğin %20,69'luk bölümüne tekabül etmektedir. Aylara göre GES üretimi Şekil 5'te verilmiştir.



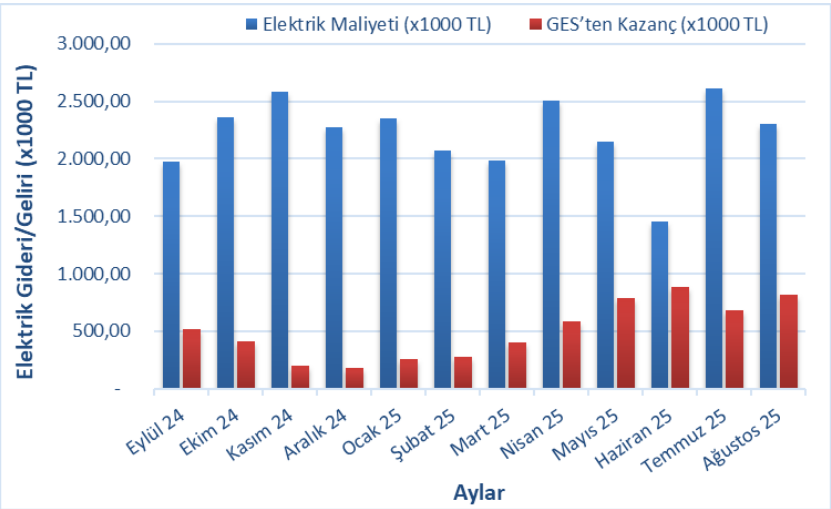
Şekil 5. Aylara göre GES üretimi

Firmanın GES üretim verileri incelendiğinde aylara göre değişim göstermiştir. Aralık ayında en düşük oranda Ocak ayı ile üretim artmaya başlamış Haziran ayında en yüksek değere ulaşmış ve ardından Kasım ayına kadar düşüş gerçekleşmiştir. Genel olarak Mayıs - Eylül ayları arasında üretim diğer aylara göre daha yüksektir. Bu sonuçlar Gaziantep ili ortalama hava sıcaklıkları ve aylara göre gün ışığı süreleri ile örtüşmektedir. Firmanın aylara göre enerji tüketim maliyeti ve GES üretimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Firmanın aylara göre enerji tüketim maliyeti ve GES üretimi

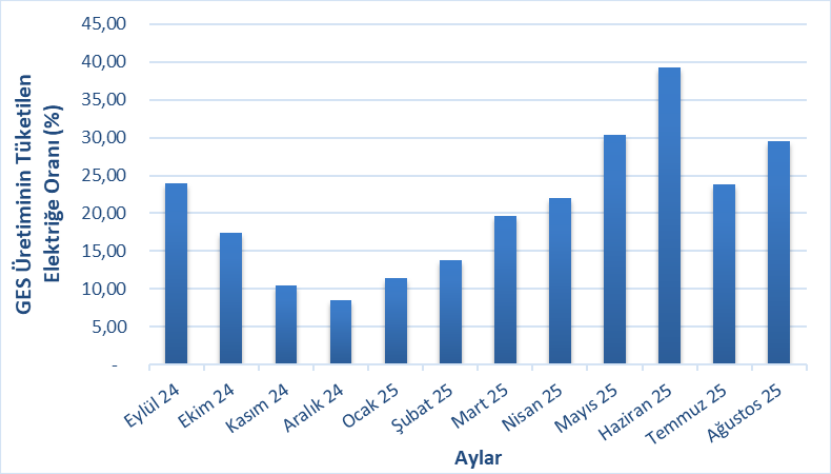
Firmanın aylara göre elektrik enerjisi tüketim miktarı incelendiğinde aylara göre küçük değişimler görülmüştür. Ortalama tüketim miktarı 707,80 MWh olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte aylara göre GES üretimi ile karşılaştırıldığında güneşten yararlanma süresine göre değişim göstermiştir. En yüksek üretim 240,47 MWh ile Haziran ayında gerçekleşirken en düşük üretim 57,18 MWh ile Aralık ayında gerçekleşmiştir. Firmanın aylara göre elektrik gideri ve GES kazancı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Firmanın aylara göre elektrik gideri ve GES kazancı

Firmanın aylara göre elektrik giderleri enerji tüketim maliyetlerine yakın olmak ile birlikte birim fiyattan kaynaklanan değişimler ile tüketim maliyetleri değişim göstermiştir. Bu değişimler

beraberinde GES üretiminden kazancı da etkilemiştir. Elektrik maliyeti Temmuz ayında 2.608.640,00 TL ile en yüksek miktara ulaşmıştır. Benzer şekilde Haziran ayında GES üretimi 882.510,00 TL ile en yüksek kazanca ulaşmıştır. Firmanın GES üretiminin tüketilen elektriğe oranı Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Firmanın GES üretiminin tüketilen elektriğe oranı

GES üretiminin firmanın tükettiği elektriğe oranlandığında bu oran aylara göre değişim göstermiştir. Ortalama %20,69'luk elektrik enerjisi ihtiyacı GES üretiminden sağlanmıştır. Güneşten yararlanma süresi en düşük ay olan Aralık ayında bu oran %8,5 iken hava sıcaklıklarının yükselmesi ile birlikte Haziran ayında %39,27 ile en yüksek orana ulaşmıştır.

Gaziantep örneğindeki bulgular, Bazı çalışmalar [2,6] ile çalışmalardaki teknik ve ekonomik sonuçlarla paralellik göstermektedir. Özellikle, %20,69'luk enerji katkısı ve kısa geri dönüş süresi, bu çalışmada da verilerle desteklenmektedir. Verilen literatür çalışmalarında vurguladığı çevresel etki boyutu da önemlidir; tekstil sektöründe enerji tüketiminin yüksek olması nedeniyle GES kullanımı karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabilir. PwC (2024) raporunda [7] vurgulanan sanayiye özel teşvikler ve e-Textile (2024) [8] dergisindeki çatı GES uygulamaları örnekleri, bu yatırımın tekstil sektörü açısından uygulanabilirliğini daha önemli hale getirmektedir. I-REC ve benzeri karbon sertifikaları sayesinde, GES sistemleri yalnızca enerji değil, sürdürülebilirlik açısından da değer yaratmaktadır.

4. Sonuçlar

Gaziantep'teki tekstil firmasının GES verileri, güneş enerjisi yatırımlarının ekonomik ve çevresel faydalarını açıkça ortaya koymaktadır. Firma özelinde öneriler:

- GES kapasitesi arttırılarak daha fazla üretim sağlanabilir.
- GES üretimi düşük olduğu dönemlerde enerji verimliliği çözümleri (enerji izleme sistemleri, verimli motorlar) ile desteklenmelidir.
- Bölgedeki diğer tekstil firmalarına örnek teşkil etmesi açısından bu uygulama model olarak yaygınlaştırılabilir.

Bu çalışma, Türkiye'deki sanayi kuruluşlarının yenilenebilir enerji sistemlerinden maksimum fayda sağlamaları için bir örnek teşkil etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 8243149 Nolu TÜBİTAK Projesi ile desteklenmektedir.

Kaynaklar

1. Koç, D.D., Yılmaz, K., and Şener, A. Green transformation in industry; solar power plant applications in the textile sector. Güç Sistemleri Konferansı, 18-19 Ekim **2022**, Ankara.
2. Akhan, H. Techno-economic evaluation of a photovoltaic system for industrial facility: A case study in Edirne, Turkey. Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, **2024**, 25(2), 101–116.
3. Owolabi, A.B., Nsafon, B.E.K., Roh, J.W., Suh, D., and Huh, J.S. Validating the techno-economic and environmental sustainability of solar PV technology in Nigeria using RETScreen experts to assess its viability. Sustain. Energy Technol. Assess., **2019**, 36, 100542.
4. Sajid, J., Sajid, M.B., Ahmad, M.M., Kamran, M., Ayub, R., Ahmed, N., Mahmood, M., and Abbas, A. Energetic. economic. and greenhouse gas emissions assessment of biomass and solar photovoltaic systems for an industrial facility. Energy Reports, **2022**, 8, 12503-12521.
5. Rajput, S.K., and Dheer, D.K. Forecasting power-factor reductions in rooftop PV-integrated industrial power systems: Mathematical modelling and experimental validation. Sustainable Energy. Grids and Networks, **2023**, 33, 100974.
6. Gürtürk, M., Erdem, M., and Uçar, F. Solar energy technical feasibility comparison: An alternative proposal for the Industry. Energy Efficiency, **2024**, 17(5), 41.
7. PwC Türkiye. Dünya'da ve Türkiye'de Güneş Enerji Sektörü, PwC Enerji Raporları. https://www.pwc.com.tr/tr/sektorler/enerji/yayinlar/2024/asset/dunyada-ve-turkiyede-gunes-enerjisi-sektoru.pdf. Erişim Tarihi: **11.07.2025**.
8. E-Textile Magazine. GES kullanan tekstil firmaları, hem CO_2 salınımını azalttı hem de %50'ye yakın enerji tasarrufu sağladı https://www.etextilemagazine.com/ges-kullanan-tekstil-firmalari-hem-co2-salinimini-azaltti-hem-de-pye-yakin-enerji-tasarrufu-sagladi.html. Erişim Tarihi: **15.07.2025**.
9. Gürtürk, M., Ucar, F., and Erdem, M. A novel approach to investigate the efects of global warming and exchange rate on the solar power plants. Energy, **2022**, 239, 122344.
10. Yıldız, C. Sanayide enerji verimliliğinde son gelişmeler: Türkiye örneği. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, **2024**, 1-1.
11. Kum, G., Sönmez, M.E., and Karabaş, M. Gaziantep ilinde güneş enerjisi potansiyelinin analitik hiyerarşi süreci yöntemi (AHP) ile belirlenmesi. Journal of Geography, **2019**, 71(1), 1–15.
12. Backlund, S., Broberg, S., Ottosson, M., Thollander, P., Energy efficiency potentials and energy management practices in Swedish firms (5-055-12), ECEEE Ind. Summer Study, **2012**, 669–677.
13. Karlsson, M., Gebremedhin, A., Klugman, S., Henning, D., Moshfegh, B. Regional energy system optimization - potential for a regional heat market. Appl Energy, **2009**, 86(4), 441.
14. Türkiye Global Solar Atlas 2.0, World Bank Group, Erişim Tarihi: **19.08.2025**.
15. Weather Spark, Gaziantep Bölgesinde 2024 Tarihinde Hava Durumu Geçmişi. https://tr.weatherspark.com/h/y/100231/2024/2024-y%C4%B1l%C4%B1-i%C3%A7in-Gaziantep-T%C3%BCrkiye-Tarihi-Hava-Durumu#Figures-ColorTemperature. Erişim Tarihi: **25.08.2025**.

MİKROECOCELL LİFLERİNDEN İNCE NUMARA İPLİK ÜRETİMİNDE RİNG VE MVS EĞİRME PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

ŞEYMA SATIL [*1], TÜLİN KAYA NACARKAHYA[1], ASAF ÖZMEN[2], İLKAY MUŞTU[2], YUNUS KÜRÜZ[2], HÜSEYİN YILDIZ[2]

[1] Karafiber Tekstil San. ve Tic. Aş. Arge Merkezi, Gaziantep, Türkiye
[2] Karafiber Tekstil San. ve Tic. Aş., Gaziantep, Türkiye

Özet

Son yıllarda sürdürülebilirlik ve yüksek performans beklentileri doğrultusunda mikro incelikte selülozik esaslı rejenere liflere olan ilgi artmaktadır. Bu lifler, düşük incelikleri sayesinde daha yumuşak tutum ve yüksek yüzey alanı gibi avantajlar sunarken, iplik üretiminde kullanılan eğirme teknolojilerine bağlı olarak kalite parametrelerinde farklılıklar göstermektedir. Bu çalışma, Ne 60/1, Ne 70/1 ve Ne 80/1 gibi daha ince iplik numaralarında mikroecocell liflerinden elde edilen ipliklerin performans özelliklerini incelemektedir. Çalışmada, Ne 60/1, Ne 70/1 ve Ne 80/1 iplik numaralarında mikroecocell liflerinden üretilen ipliklerin düzgünsüzlük, iplik hataları (IPI), tüylülük, mukavemet ve uzama gibi parametreleri detaylı olarak incelenmiş; böylece farklı eğirme sistemlerinin ince ipliklerdeki kalite ve performans etkileri karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Bulgular, iplik numarası inceldikçe hem ring hem de MVS sistemlerinde düzgünsüzlük değerlerinin arttığını, Ring ipliklerin mukavemet ve hatalar açısından daha yüksek performans gösterdiğini, MVS ipliklerin ise daha düşük tüylülük ve temiz yüzey sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, mikroecocell liflerinden üretilen ince ipliklerde her iki teknolojinin farklı avantajlar sunduğunu ve iplik teknolojisi seçiminin nihai ürün performansını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Microecocell, Ring Eğirme, MVS Eğirme, İnce Numara İplik, İplik Performansı

1. Giriş

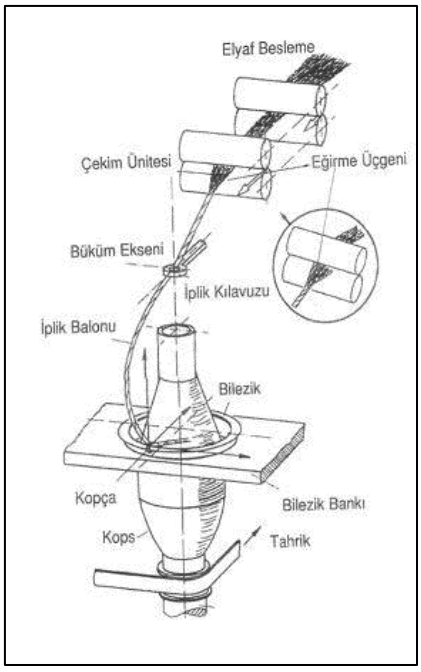
Mikrolifler, 0,1–1,0 dtex incelik aralığında tanımlanan ve son yıllarda tekstil sektöründe hem araştırma hem de uygulama alanı olarak önem kazanan insan yapımı liflerdir. Bu lifler, polyester, naylon, polipropilen, akrilik ve viskoz gibi çeşitli polimerlerden üretilmekte olup, filament veya kesikli stapel formunda elde edilebilmektedir [1, 2]. Üretim süreçlerinde geleneksel eğirme yöntemlerinin yanı sıra konjuge ve bikomponent eğirme, lif kesit modifikasyonu ve elektroeğirme gibi ileri teknolojiler uygulanmaktadır [2]. Mikrolifler, iplik üretiminde geleneksel liflere kıyasla üstün mekanik özellikler sunmakta; daha yüksek kopma mukavemeti ve düşük düzgünsüzlük değerleri ile tekstil ürünlerinin kalite ve performansını artırmaktadır [3].

Son yıllarda tekstil sektöründe sürdürülebilir üretim öncelikleri giderek önem kazanmakta ve bu durum, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, çevresel etkisi düşük liflere yönelik ilgiyi

artırmaktadır. Bu kapsamda, selülozik esaslı rejenere lifler, biyolojik olarak doğada çözünebilmeleri, doğal kaynakların etkin kullanımı ve tekstil ürünlerine sağladıkları yüksek performans ile çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Özellikle selülozik bazlı rejenere lifler, biyolojik olarak doğada çözünebilmeleri, yenilenebilir kaynakların etkin kullanımı ve tekstil ürünlerinde sağladıkları yüksek performans ile, sürdürülebilir üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Liyosel gibi rejenere selülozik lifler, gelişmiş üretim teknolojileri sayesinde mikro yapılı formlarda üretilmekte ve böylece kullanım alanlarını çeşitlendirmektedir. Mikro lif formu, kumaşlarda hem estetik hem de fonksiyonel avantajlar sağlayarak, yüksek mukavemet, etkin nem yönetimi ve pürüzsüz yüzey gibi özelliklerle tekstil ürünlerinin performansını artırmaktadır. Ecocell™ marka liyosel elyafı, odun kökenli selülozun çevre dostu bir çözücü olan N-metilmorfolin-N-oksit (NMMO) ile çözülmesiyle elde edilen üçüncü nesil rejenere selülozik lifler arasında yer almaktadır. Kapalı devre üretim sistemi sayesinde kimyasal geri kazanım oranı %99,6'ya ulaşmakta ve üretim sürecinin çevresel etkileri minimuma indirilmektedir [4].

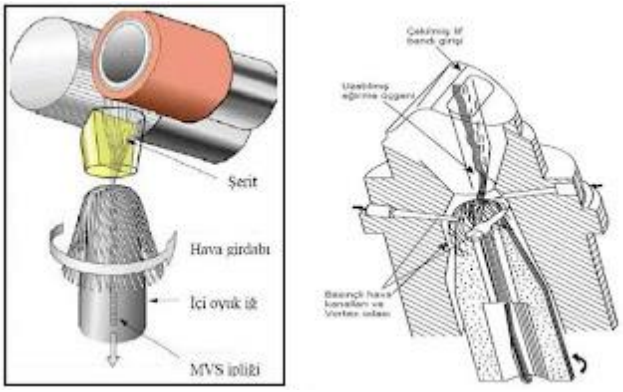
Ring eğirme sistemi geleneksel ve en yaygın kullanılan eğirme yöntemlerinden biri olup, elyaf demetinin çekim, büküm ve sarım işlemlerinden geçerek iplik formuna dönüştüğü bir prosestir (**Şekil 1**). Bu sistem, yüksek iplik mukavemeti, düzgün yapı ve düşük düzgünsüzlük değerleri ile karakterize edilmektedir [5].



Şekil 1. Ring iplik eğirme sistemi [5]

Murata Vortex Spinning (MVS) eğirme sistemi, hava vorteksi prensibine dayanan modern bir teknolojidir. Elyaflar bu sistemde, dönen hava akımı (vortex girdabı) yardımıyla merkezdeki çekirdek demet etrafına sarılarak iplik oluşturur (**Şekil 2**) [5].

Ring ve MVS sistemleri arasında iplik performansında farklılıklar gözlenmesine rağmen, mikrolifler her iki sistemde de olumlu sonuçlar sağlamaktadır [3]. Yapılan araştırmalar doğrultusunda, literatürde benzer birçok çalışma mevcuttur.



Şekil 2. MVS iplik eğirme sistemi [5]

Satıl ve arkadaşları (2025), çalışmalarında, %100 mikroecocell ve %100 mikromodal liflerinden Ne 40/1 iplik numarasında hem ring hem de MVS eğirme teknolojisi kullanılarak iplikler üretilmiş ve iplik teknolojisinin iplik performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgular, mikro liflerin özellikleri ile eğirme sistemi kombinasyonlarının iplik performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu bağlamda, eğirme teknolojisinin iplik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir [3].

Akan ve arkadaşları (2019), çalışmalarında, 38 mm uzunluğunda ve 1.2 dtex inceliğindeki %100 viskon liflerinden kompakt ring ve Murata Vortex (MVS) sistemleriyle üretilen Ne 28/1 ipliklerin özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Üretim süreçleri ve parametrelerin detaylandırıldığı çalışmada, kompakt ring sistemiyle üretilen ipliklerin daha yüksek mukavemet, daha düşük düzgünsüzlük ve hatalı bölge (ince/kalın yer) değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, MVS ipliklerine göre daha fazla neps içerdikleri ve daha yüksek tüylülük gösterdikleri tespit edilmiştir [5].

Kılıç ve Okur (2011), konvansiyonel ring, kompakt ring ve MVS eğirme sistemleri kullanılarak üretilen %100 pamuk, %100 rejenere elyaf ve bunların karışımlarının özelliklerini incelemiştir. Bulgular, MVS sistemiyle üretilen ipliklerin, ring ve kompakt ring ipliklere kıyasla daha yüksek düzgünsüzlük değerleri sergilediğini ve ince/kalın yer sayılarının ring ipliklere göre daha fazla olduğunu göstermektedir [6].

Bu çalışmada ise, Ne 60/1, Ne 70/1 ve Ne 80/1 iplik numaralarında mikroecocell liflerinden elde edilen ipliklerin düzgünsüzlük, iplik hataları, tüylülük, mukavemet ve uzama gibi performans özelliklerini karşılaştırmalı olarak inceleyerek, ince numaralı iplik üretiminde rejenere selülozik mikroliflerin sağlayabileceği avantajları ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada hammadde olarak, 1,0 dtex inceliğe ve 34 mm lif uzunluğuna sahip mikroecocell elyafı kullanılmıştır. Bu doğrultuda, farklı iplik eğirme teknolojilerinin ince numaralı ipliklerin performans özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak için ring ve Murata Vortex Spinning (MVS) sistemleri tercih edilmiştir. Her iki eğirme sisteminde de Ne 60/1, Ne 70/1 ve Ne 80/1 iplik numaralarında %100 mikroecocell içerikli iplik üretimleri gerçekleştirilmiştir **(Tablo 1).**

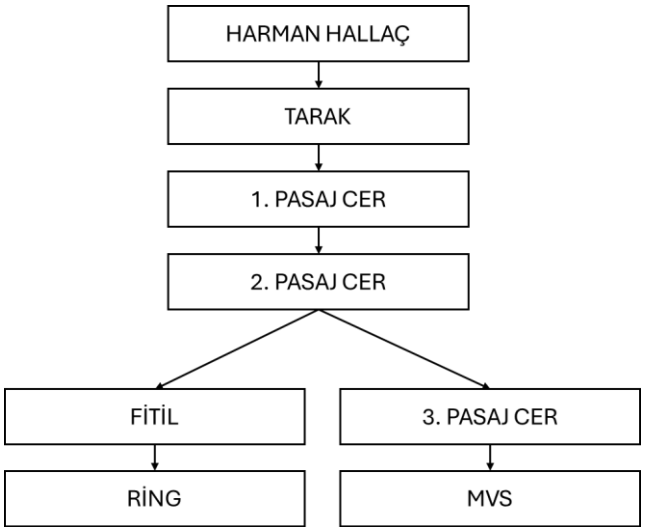
Tablo 1. Üretim Parametreleri

Elyaf Özellikleri	Eğirme Teknolojisi	İplik Numara
%100 Mikroecocell (1,0 dtex – 34 mm)	Ring	Ne 60/1
	Ring	Ne 70/1
	Ring	Ne 80/1
	MVS	Ne 60/1
	MVS	Ne 70/1
	MVS	Ne 80/1

Üretim sürecinde, elyaf özellikleri sabit tutulmuş, yalnızca eğirme sistemi ve iplik numarası deneysel değişkenler olarak belirlenmiştir. Böylelikle, aynı hammadde koşullarında farklı eğirme yöntemleri ve iplik inceliklerinin iplik performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Makine parkuru bilgisi **Tablo 2**'de paylaşılmıştır. İş akış şeması **Şekil 3**'te gösterildiği gibidir.

Tablo 2. Makine Parkuru

Ring Eğirme Sistemi		MVS Eğirme Sistemi	
Tarak	Trützchler TC 7	**Tarak**	Trützchler TC 7
1.Pasaj Cer	Trützchler TD 02	**1.Pasaj Cer**	Trützchler TD 02
2.Pasaj Cer	Trützchler TD 03	**2.Pasaj Cer**	Trützchler TD 02
Fitil	Saurer – Zinser 668	**3.Pasaj Cer**	Trützchler TD 03
Ring	Saurer – Zinser 351	**MVS**	Muratech 870 EX
Bobinleme	Saurer – Autocorner 5	-	-



Şekil 3. Ring ve MVS eğirme sistemi iş akış şeması

Mikroecocell elyaf balyalar halinde harman-hallaç dairesine sevk edildikten sonra, öncelikle tarak ve cer makinelerinden geçirilmiştir. Ring iplik üretiminde, II. pasaj cerden sonra fitil hazırlanarak ring iplik makinesine besleme yapılırken, MVS üretim tekniğinde ilave bir pasaj cer kullanımı söz konusudur. Üçüncü pasaj cerden sonra şeritler MVS iplik makinesine aktarılıp ve iplik üretimi tamamlanmıştır.

Üretilen iplikler test edilmeden önce, 20±2 °C sıcaklıkta ve 65±4% bağıl nemde 24 saat kondisyonlanmıştır. Testler test standartlarına uygun bir şekilde iplik düzgünsüzlüğü, iplik tüylülüğü ve iplik hataları Uster® Tester 6 (TS 12863) cihazında, iplik mukavemeti ve uzama ölçüleri ise Uster® Tensojet (TS EN ISO 2062) test cihazında gerçekleştirilmiştir. İplik çap ölçümü ve ipliklere ait görüntüler Leica marka sterio mikkroskobu ile alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada, iplik üretim yöntemlerinin iplik özellikleri üzerindeki etkisi, mukavemet, uzama, ince/kalın yer, neps, düzgünsüzlük, iplik çapı ve mikroskop görüntüleri ile elde edilen veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak bu kısımda değerlendirilmiştir.

3.1. İplik Düzgünsüzlüğü, İplik Hataları ve Tüylülük Değeri

Çalışma kapsamında üretilen ipliklere ait, düzgünsüzlük değerleri ve tüylülük değerleri **Tablo 3**'te paylaşılmıştır. Sonuçlara ait grafikler ise **Şekil 4** ve **Şekil 5**'teki gibidir. Düzgünsüzlük (U%) ve kütle varyasyon katsayısı (CVm%) değerleri incelendiğinde, tüm numaralarda ring ipliklerinin MVS ipliklerine kıyasla daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

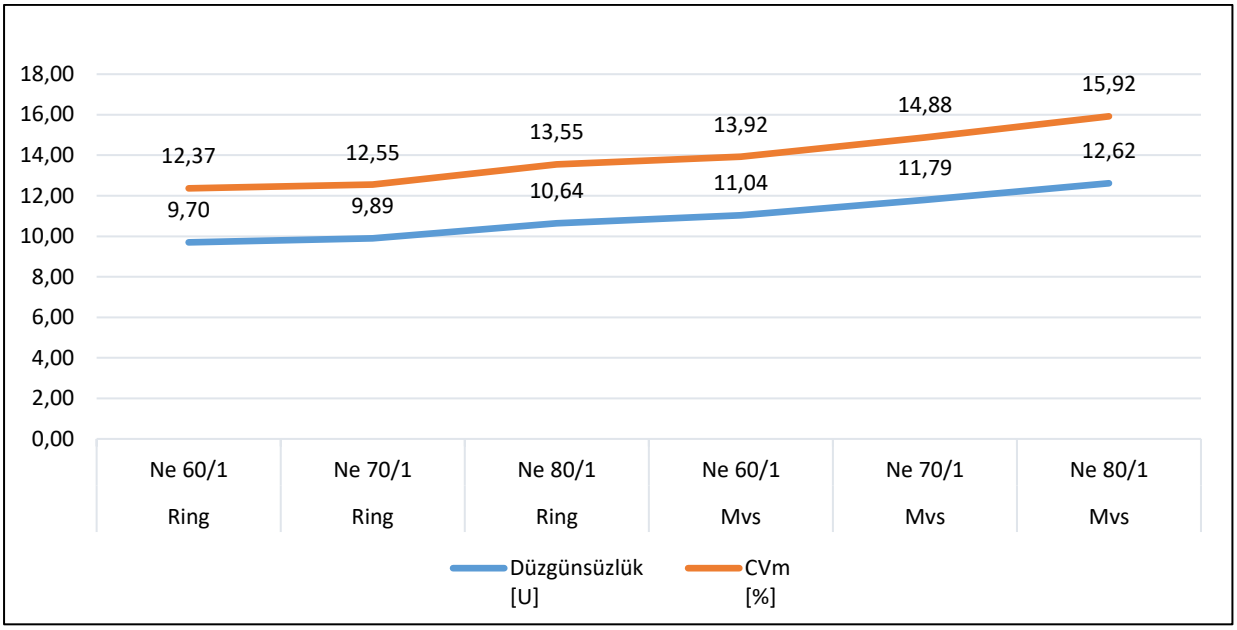
Tablo 3. Düzgünsüzlük, CVm ve Tüylülük Değerleri

İplik Bilgisi	Düzgünsüzlük [U]	CVm [%]	Tüylülük [H]
Ne 60/1 Ring %100 Mikroecocell	9,70	12,37	3,10
Ne 70/1 Ring %100 Mikroecocell	9,89	12,55	2,89
Ne 80/1 Ring %100 Mikroecocell	10,6	13,55	2,72
Ne 60/1 MVS %100 Mikroecocell	11,0	13,92	2,87
Ne 70/1 MVS %100 Mikroecocell	11,7	14,88	2,84
Ne 80/1 MVS %100 Mikroecocell	12,6	15,92	2,96

Bu durum, ring eğirme sisteminin elyafların paralelleştirilmesi ve büküm bölgesinde daha düzenli bir yapı oluşturmasıyla ilişkilidir.

Ring sisteminde, elyafların daha uzun bir çekim alanında kontrollü şekilde yönlendirilmesi, iplik boyunca kütle değişimlerini azaltmakta ve iplik yapısında daha homojen bir form sağlamaktadır. Buna karşılık, MVS (Murata Vortex Spinning) sisteminde lifler hava girdabı etkisiyle merkezden çevreye doğru dairesel bir şekilde yerleşmekte; bu da lif dağılımında görece düzensizliklere neden olmaktadır. Bu nedenle MVS ipliklerinde düzgünsüzlük ve CVm değerlerinin yüksek olması beklenen bir sonuçtur [7].

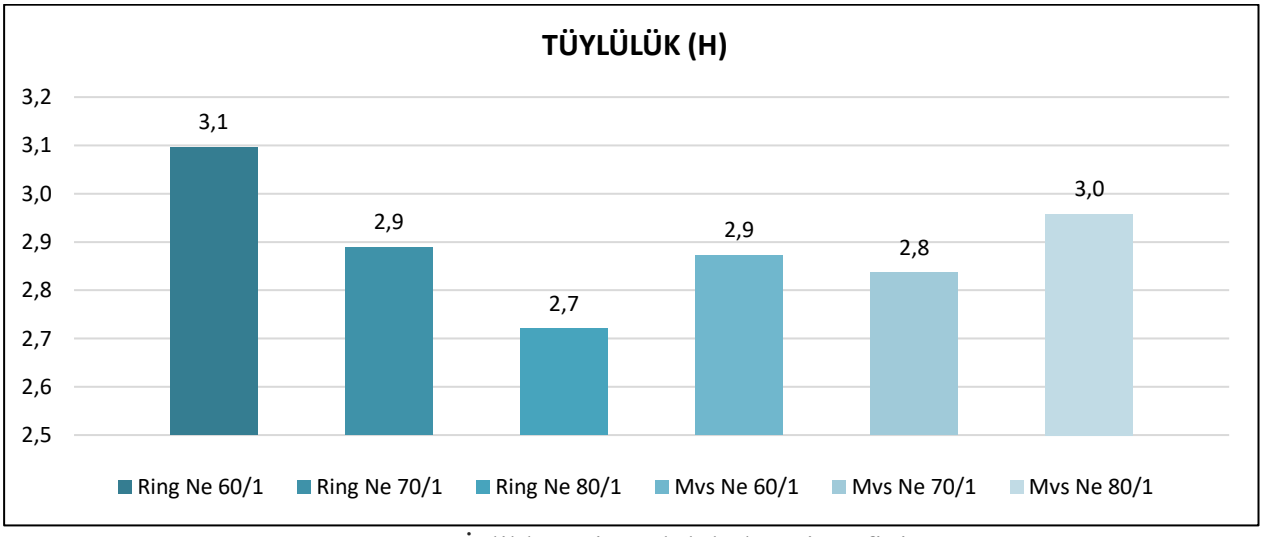
İplik numarası inceldikçe (Ne 60/1 → Ne 80/1), hem ring hem de MVS ipliklerinde düzgünsüzlük değerlerinin arttığı belirlenmiştir. İnce numaralı ipliklerde birim iplik kesitinde yer alan lif sayısının azalması, elyaf yerleşimindeki küçük farklılıkların daha belirgin hale gelmesine neden olmakta; bu da iplik boyunca kütle değişimlerini artırmaktadır. Özellikle Ne 80/1 MVS ipliğinde gözlenen %12,62'lik düzgünsüzlük değeri, sistemin ince iplik üretiminde homojenlik açısından daha sınırlı bir performans sergilediğini göstermektedir **(Şekil 4)**.



Şekil 4. İpliklerin düzgünsüzlük değeri grafiği

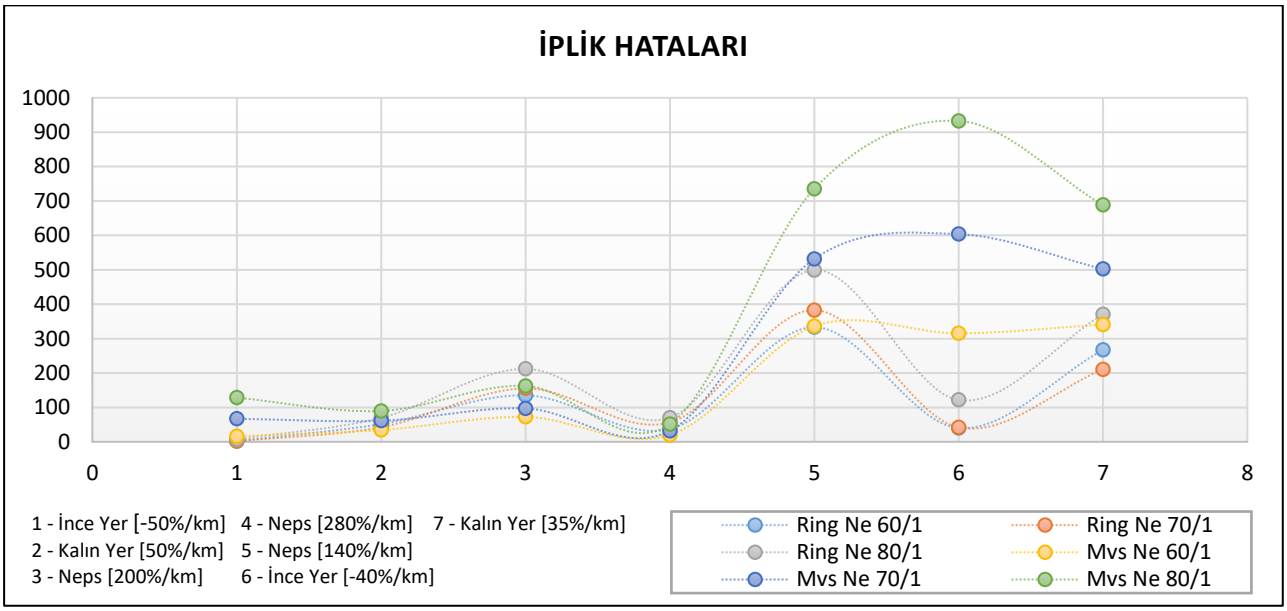
Tüylülük (H) değerleri açısından değerlendirildiğinde, ring ipliklerinin MVS ipliklerine kıyasla daha yüksek tüylülük sergilediği belirlenmiştir. Ring sisteminde iplik yüzeyine yakın konumlanan lif uçlarının büküm esnasında tamamen iplik gövdesine entegre olamaması, yüzeyden dışa doğru uzanan serbest lif uçlarının artmasına neden olmaktadır [7]. Buna karşılık, MVS sisteminde hava vorteksi etkisiyle lifler iplik merkezine doğru yönlendirilmekte ve yüzeydeki serbest lif uçları önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu durum, MVS ipliklerin karakteristik olarak daha düşük tüylülük değerlerine sahip olmasını sağlamaktadır [7].

İplik numarasının artışıyla birlikte ring ipliklerde tüylülük değerlerinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu eğilim, ince numaralı ipliklerde büküm miktarının artması ve lif sayısının azalmasıyla birlikte yüzeyde daha az lif ucunun bulunmasıyla ilişkilidir. MVS ipliklerde ise tüylülük değerlerinde bariz bir fark gözlemlenmemiştir (**Şekil 5**).



Şekil 5. İpliklere ait tüylülük değeri grafiği

Şekil 6 incelendiğinde, ring ve MVS iplikler arasında ince ve kalın yer ile neps değerleri açısından belirgin farklılıklar gözlenmektedir. Ring ipliklerde ince ve kalın yer değerleri Ne 60/1–Ne 80/1 aralığında daha düşük olup, iplik boyunca liflerin daha homojen dağıldığını göstermektedir. Örneğin, Ne 80/1 ring iplikte ince ve kalın yer değerleri sırasıyla 6,80 ve 69,60/km iken, MVS iplikte aynı numaralarda değerler 128,20 ve 89,60/km'ye yükselmektedir. Bu fark, MVS sisteminde liflerin çekim alanında hava girdabına bağlı olarak düzensiz yönlendirilmesinden kaynaklanmaktadır [6].



Şekil 6. İpliklerin ince yer- kalın yer- neps değerleri grafiği

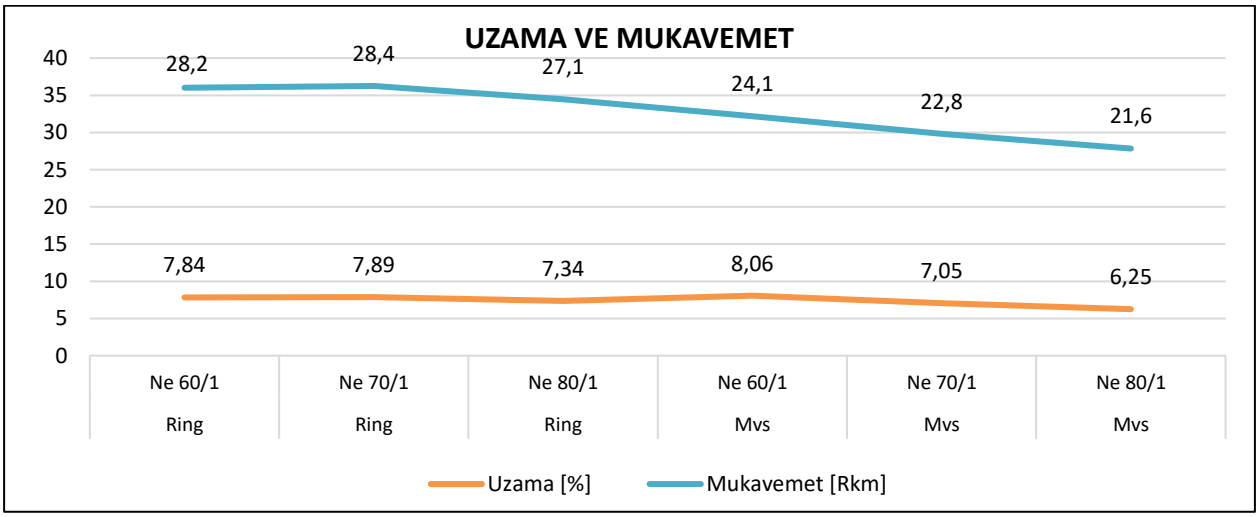
Neps değerleri (140%, 200%, 280%) açısından, ring ipliklerde Ne 80/1'de neps 200%/km 212,0 neps 280%/km 70,20 iken, MVS ipliklerde neps 200%/km 162,40 ve 280%/km 51,00 olarak gözlemlenmiştir. Bu durum, ring ipliklerde kısa liflerin büküm bölgesinde sıkıca sarılması sonucu neps oluşumunun daha belirgin olduğunu göstermektedir [6].

3.2. İplik Uzaması ve Mukavmeti

Elde edilen veriler incelendiğinde, ring ve MVS iplikler arasında mekanik özellikler açısından belirgin farklılıklar gözlenmektedir. Ring iplikler tüm numaralarda MVS ipliklere kıyasla daha yüksek mukavemet değerleri göstermektedir (**Şekil 7**) (Ne 60/1: 28,2 Rkm vs. 24,1 Rkm; Ne 70/1: 28,4 Rkm vs. 22,8 Rkm; Ne 80/1: 27,1 Rkm vs. 21,6 Rkm).

Ring iplik üretiminde liflerin ana çekimden sonra birbirine yakın konumlanarak lif kütlesinin yoğunlaşması ve iplik boyunca daha sıkı büküm almasıyla açıklanabilir [8]. MVS ipliklerde ise merkez liflerini saran sarım lifleri düzensiz bir yapı kazanmakta ve paralel liflerin kayması engellenmektedir; bu nedenle mukavemet değerleri daha düşük çıkmaktadır.

Kopma uzaması açısından, ring iplikler Ne 60/1 ve Ne 70/1 numaralarda MVS ipliklere kıyasla benzer veya biraz daha yüksek değerler (7,84–7,89% vs. 8,06–7,05%) göstermekte, ancak Ne 80/1'de MVS iplikler daha düşük bir uzama değeri sergilemektedir (6,25% vs. 7,34%). Bu durum, MVS ipliklerde liflerin düzensiz sarımı ve büküm dağılımındaki farklılıklardan kaynaklanabilir.

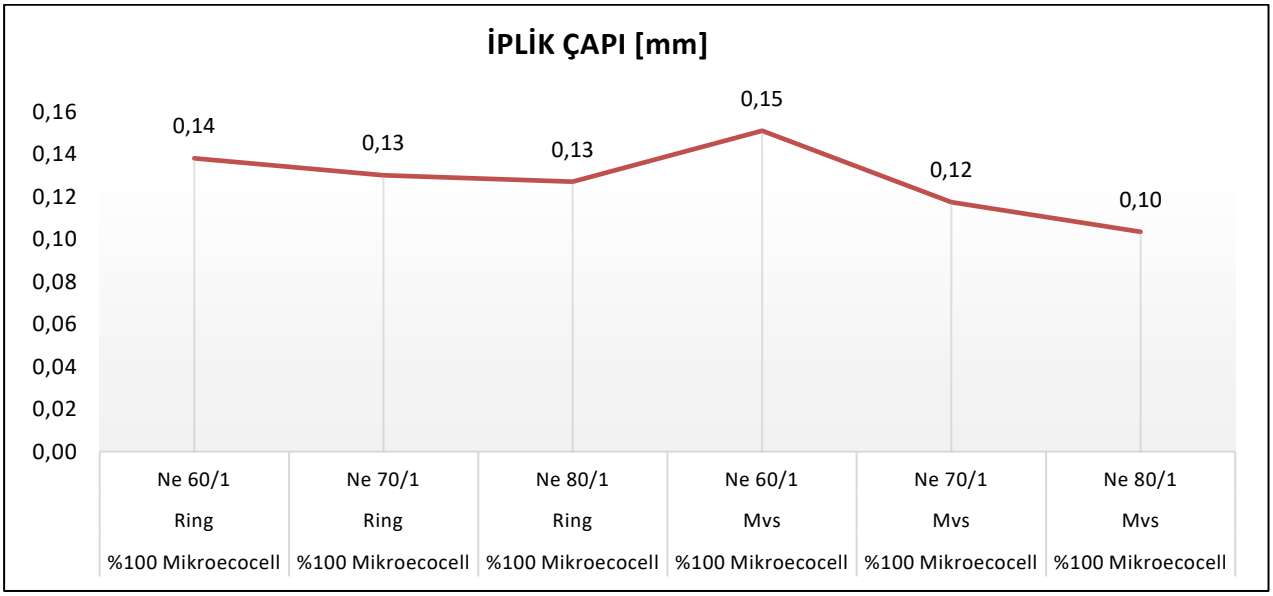


Şekil 7. İplik uzama ve mukavemet kıyası grafiği

3.3. İplik Çapı ve Mikroskop Görüntüleri

İplik numarası inceldikçe, iplik çapınında aynı oranda değişmesi beklenmektedir. Çalışma kapsamında, iplik üretim yöntemlerinin bu değişimi etkileyip etkilemediği gözlemlenmek istenmiştir. Mikroecocell liflerindeki bu değişimi gözlemlemek adına, Leica marka sterio mikroskop ile ipliklerin çapları ölçülmüştür.

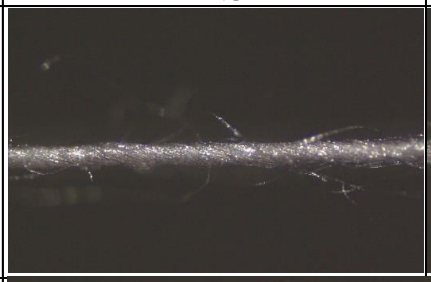
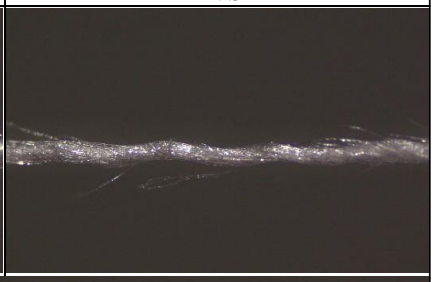
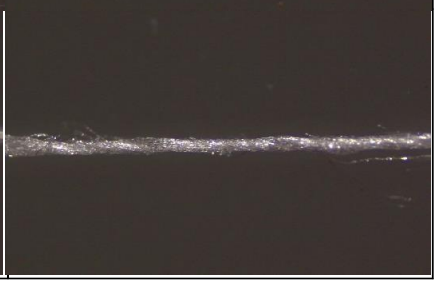
Şekil 8'daki grafikte gözlemlendiği üzere iplik numarası inceldikçe iplik çapının azaldığı görülmektedir. Bu durum, daha ince numaralı ipliklerde lif sayısının kesitte azalmasıyla uyumludur. Ring ipliklerde Ne 60/1, 70/1 ve 80/1 numaralarına ait çap değerleri sırasıyla 0,138 mm, 0,130 mm ve 0,127 mm olarak belirlenmiş; bu azalma, numara inceldikçe lif yoğunluğunun düşmesiyle açıklanabilir. MVS ipliklerde ise Ne 60/1 numarada 0,151 mm ile en yüksek çap değeri ölçülürken, Ne 80/1 numarada 0,103 mm'ye kadar düşüş gözlenmiştir.



Şekil 8. İpliklere ait çap ölçümü kıyası grafiği

Şekil 9'da ise ipliklere ait mikroskop görüntüleri mevcuttur. Bu görüntüler de iplik numarası inceldikçe iplik çapının azaldığını destekler niteliktedir. Ring eğirme sistemi ile üretilen ipliklerde iplik numarası arttıkça (iplikler inceldikçe) iplik çapının inceldiği gözlemlenmiştir.

MVS eğirme sistemi ile üretilen iplikler ise üretim esnasındaki düzensiz sarımdan kaynaklı yer yer değişken ölçümler alınmış, ancak ring eğirme sistemindeki gibi iplik numarası arttıkça iplik çapı incelmiştir. Bu beklenen bir sonuç olup literatür çalışmalarına da uygun bir sonuçtur.

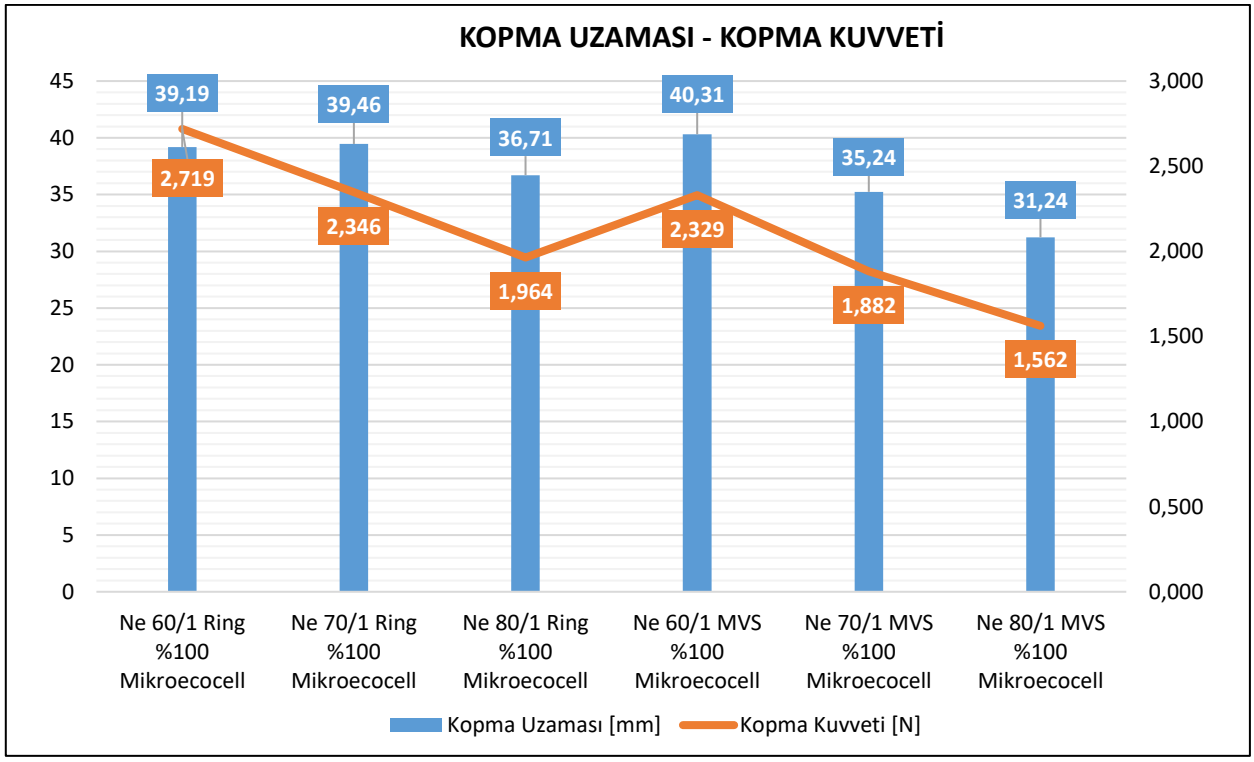
İPLİK NUMARASI	İPLİK TEKNOLOJİSİ	
	RING	MVS
NE 60/1		
NE 70/1		
NE 80/1		

Şekil 9. İpliklere ait mikroskop görüntüleri

3.4. Kopma Kuvveti ve Kopma Uzaması

İpliklerin mekanik performansı, üretim tekniği ve iplik numarası gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir; bu bölümde, farklı üretim yöntemleri ile üretilen Mikroecocell ipliklerin kopma kuvveti ve uzama değerleri üzerinden karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. **Şekil 10**'daki grafik incelendiğinde, iplik numarasının artmasıyla (yani iplik inceldikçe) hem kopma kuvveti hem de kopma uzaması değerlerinde belirgin bir azalma eğilimi gözlenmektedir.

Ring ipliklerde Ne 60/1 numarasında kopma kuvveti 2,719 N iken, Ne 80/1 numarasında bu değer 1,964 N'ye düşmektedir. Benzer şekilde MVS ipliklerde de Ne 60/1 ipliğin kopma kuvveti 2,329 N iken, Ne 80/1'de 1,562 N'ye kadar gerilemiştir. Bu eğilim, iplik numarasının incelmesiyle birlikte kesitteki lif sayısının azalması ve iplik yapısındaki lif-lif bağlarının zayıflamasıyla açıklanabilir.



Şekil 10. Kopma uzaması ve kopma kuvveti

Kopma uzaması değerleri incelendiğinde, ring ipliklerin genel olarak MVS ipliklere kıyasla daha yüksek değerlere sahip olduğu, ancak Ne 60/1 numarasında MVS ipliğin 40,31 mm ile en yüksek uzama değerini gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, MVS sisteminde liflerin hava akımıyla sarılması sonucu yapıda oluşan gevşeklik ve kısmi elastikiyetle ilişkilendirilebilir. Ring ipliklerin daha kompakt ve paralel lif yerleşimi sayesinde daha yüksek mekanik dayanım sergilediği, buna karşın MVS ipliklerin lif sarım yapısındaki düzensizlik nedeniyle daha düşük mukavemet değerleri gösterdiği düşünülmektedir.

4. Sonuç

Çalışmanın kapsamında %100 mikroecocell elyafından iki farklı eğirme (Ring ve MVS) teknolojisi kullanılarak, üç farklı iplik numarasında (Ne 60/1, Ne 70/1 ve Ne 80/1) iplikler üretilmiştir. Daha sonra, iplik üretim yöntemlerinin iplik özellikleri üzerindeki etkisi, mukavemet, uzama, ince/kalın yer, neps, düzgünsüzlük, iplik çapı ve mikroskop görüntüleri ile elde edilen veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir;

- Ring iplikler, MVS ipliklere kıyasla tüm numaralarda daha düşük düzgünsüzlük (U%) ve kütle varyasyon katsayısı (CVm%) değerleri göstermiştir.
- Tüylülük açısından ring iplikler MVS ipliklere göre daha yüksek değerler göstermiştir; bu durum, yüzey liflerinin büküm esnasında tam olarak iplik gövdesine entegre olmamasından kaynaklanmaktadır. İplik numarası inceldikçe ring ipliklerde tüylülük değerlerinin azaldığı gözlenmiş, MVS ipliklerde ise belirgin bir değişim görülmemiştir.

- Ring ipliklerde ince ve kalın yer ile neps değerleri, MVS ipliklere kıyasla daha düşük bulunmuş, iplik boyunca liflerin daha homojen dağıldığı belirlenmiştir.
- Ring iplikler, tüm numaralarda MVS ipliklere göre daha yüksek mukavemet değerleri göstermiştir.
- Kopma uzaması açısından, ring iplikler Ne 60/1 ve Ne 70/1 numaralarda MVS ipliklere kıyasla benzer veya biraz daha yüksek değerler göstermekte, ancak Ne 80/1'de MVS iplikler daha düşük bir uzama değeri sergilemiştir.
- İplik numarası inceldikçe, her iki üretim yöntemi için de iplik çapı azalmakta ve bu durum kesitteki lif sayısının azalmasıyla uyum göstermektedir. Ring ipliklerde çap ölçümleri daha düzenli ve homojen bir düşüş sergilerken, MVS ipliklerde üretim sürecindeki düzensiz sarımdan dolayı çap değerlerinde yer yer değişkenlik gözlenmiştir. Mikroskop görüntüleri, iplik çapındaki bu değişimi desteklemektedir.
- Hem kuvvet hem de uzama değerleri, iplik numarası arttıkça düşmektedir. Ring iplikler daha yüksek kopma kuvveti ve mekanik dayanım sergilerken, MVS iplikler düzensiz lif yerleşimi nedeniyle daha düşük değerler göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kompakt ring ve MVS eğirme sistemlerinin her birinin kendine özgü avantajları bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu bulgular doğrultusunda herhangi bir iplik üretim teknolojisinin diğerine göre üstün olduğunu kesin olarak söylemek doğru olmayacaktır. Ring sistemi, lifleri kompakt ve paralel düzenleyerek yüksek mekanik dayanım ve daha iyi düzgünlük sağlarken; MVS iplikler daha düşük homojenlik ve mukavemet değerleri göstermektedir ancak belirli uygulamalarda tercih edilebilir. İplik üretim yöntemi, iplik numarası ve eğirme teknolojisi, ipliklerin mekanik performansı, yüzey özellikleri ve homojenliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Referanslar

1. A. Demiröz Gün, B. Demircan ve A. Şevkan, «Mikroliflerin Üretim Yöntemleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları,» *Tekstil ve Mühendis,* no. 83, pp. 38-46, 9 Eylül 2011.
2. S. Mukhopadhyay ve G. Ramakrishnan, «Microfibres,» *Textile Progress, Taylor & Francis,* no. 40, pp. 1- 86, 7 Nisan 2008.
3. Ş. Satıl, T. Kaya Nacarkahya, G. Balcı Kılıç, M. Kılıç , A. Özmen, B. Ayyıldız ve S. Öztürk, «Microecocell ve Micromodal İpliklerin Karşılaştırmalı Analizi: Ring ve Vortex Eğirme Sistemlerinin İplik ve Kumaş Özelliklerine Etkisi,» %1 içinde *16th International Fiber and Polymer Research Symposium (16th ULPAS)*, İstanbul, 2025.
4. Ecocell™, «https://ecocell.tr/,» Karafiber Elyaf, [Çevrimiçi]. Available: https://ecocell.tr/what-is-ecocell/. [Erişildi: 28 9 2025].
5. «Tekstil Kütüphane,» 7 Mart 2011. [Çevrimiçi]. Available: https://tekstilkutuphane.blogspot.com/2011/03/ring-iplik-makinelerinde-is-aks.html. [Erişildi: 2025 Ekim 7].
6. T. Akan ve D. Vatansever Bayramol, «Kompakt Ring ve Murata Vortex Sistemleri ile Üretilen Ne 28/1 Viskon İpliklerin Özelliklerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi,» *European Journal of Engineering and Applied Sciences,* cilt 2, no. 1, pp. 11-14, 7 Mayıs 2019.

7. M. Kılıç ve A. Okur, «The Properties of Cotton-Tencel and Cotton-Promodal Blended Yarns Spun in Different Spinning Systems.,» *Textile Research Journal,* pp. 156-172, 2011.
8. D. Yılmaz ve G. Kayabaşı, «Lif Türü ve İplik İnceliğinin Vortex İplik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi,» *Süleyman Demirel Üniversitesi - Journal of Natural and Applied Sciences,* cilt 20, no. 2, pp. 244-253, 11 Nisan 2016.
9. T. Öğüt, T. Kaya Nacarkahya ve K. Özden, «Sürdürülebilir Liflerden Elde Edilen Örme Kumaşlarin Hava Geçirgenlik Ve Boncuklanma Özelliklerinin İncelenmesi.,» %1 içinde *The International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET)*, 2020.
10. G. Karakan Günaydın ve G. Abdulla, «Dünden Bugüne Kısa Stapel İplik Üretim Teknolojileri,» *SDU Teknik Bilimler Dergisi,* cilt 4, no. 2, pp. 18-28, 2014.

REJENERE SELÜLOZİK LİYOSEL LİFLERİNİN FARKLI EĞİRME KOMPONENTLERİ İLE EĞİRİLMESİNİN İPLİK KALİTESİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

RAMAZAN TUR[1], TÜLİN KAYA NACARKAHYA[1], R. TUĞRUL OĞULATA[2]

[1]Karafiber Tekstil San ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Gaziantep, Türkiye

[2]Çukurova Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği, Adana, Türkiye

Özet

Rejenere selülozik lifler tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. 3. Nesil rejenere selülozik lif olarak anılan liyosel lifinin tüm dünyada üretimi yaklaşık 1 milyon ton olup bunun ağırlıklı olarak tekstil ve nonwoven gibi alanlarda kullanıldığı bilinmektedir. Çalışmada Ecocell marka liyosel elyafı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında diğer üretim parametreleri sabit tutularak, kompakt ring iplik eğirme eğirme komponentlerinden apron, manşon ve kopçanın iplik kalite değerleri olan düzgünsüzlük, kalın bölge, ince bölge, neps, tüylülük, uzama ve mukavemet sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında ticari olarak temin edilen 3 farklı kopça, 3 farklı manşon ve 3 farklı apron denenmiş sonuçlar RStudio açık kaynak yazılım ve karar verme programı üzerinden optimize sonuçların çıkarılması hedeflenmiştir. R, istatistiksel hesaplama, grafik ve veri analizi için kullanılan açık kaynaklı özgür bir yazılım dilidir. Çalışmada en ideal kalite sonuçlarını veren manşon, apron ve kopça türü belirlenmiştir. Parametreler arası ölçümler minitab 18 programında korelasyon katsayısı belirlenerek çalışma sonuçlandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ecocell, Liyosel, Kompakt Ring Eğirme, Kopça, Manşon, Apron, R Studio

1. Giriş

Tekstil sektörü, geniş kullanım alanlarıyla ekonomik ve çevresel açıdan önemli bir konumdadır. Artan sürdürülebilirlik gereksinimleri, çevre dostu üretim ve yenilikçi malzemelere yönelimi zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, gelecekteki araştırmaların sürdürülebilir yöntem ve ürün geliştirmeye odaklanması, sektörün çevresel etkilerinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir.

Kimyasal liflerin çeşitli kategorilere ayrılması, bu liflerin üretim süreçleri ve çevresel etkileri hakkında derinlemesine bir anlayış gerektirir. Özellikle rejenere selülozik lifler, çevre dostu malzemeler olarak öne çıkmakta ve bu bağlamda liyosel gibi rejenere selülozik liflerin geliştirilmesi, sürdürülebilir tekstil üretimi için kritik bir alan oluşturmaktadır [4]. Liyosel, düşük çevresel etki ile yüksek performans sunması nedeniyle, tekstil endüstrisinde 3. nesil olarak değerlendirilebilir [1, 4].

Ring iplik üretiminde apron, manşon ve kopça; iplik kalitesini ve üretim verimliliğini doğrudan etkileyen temel elemanlardır. Apron, lif demetini çekim bölgesinde yönlendirerek düzgün bir iplik

oluşumunu sağlar. Manşon, apronla birlikte çalışarak liflerin kontrollü bir şekilde çekilmesini ve iplik haline gelmesini destekler [6]. Kopça ise ipliğe büküm verir ve ipliği bobine düzgün şekilde sarar. Bu üç bileşenin doğru seçimi, ayarı ve bakımı; iplik düzgünlüğü, kopuş oranı ve genel üretim performansı açısından kritik öneme sahiptir. [7].

Bu çalışmada, Ecocell marka liyosel elyafı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, diğer üretim parametreleri sabit tutularak kompakt ring iplik eğirme sisteminde kullanılan eğirme komponentlerinden apron, manşon ve kopçanın iplik kalite özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Değerlendirilen iplik kalite parametreleri; düzgünsüzlük, kalın bölge, ince bölge, neps, tüylülük, uzama ve mukavemettir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, farklı komponentlerin söz konusu kalite değerleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Çalışma kapsamında, ticari olarak temin edilen üç farklı kopça, üç farklı manşon ve üç farklı apron kullanılarak denemeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, açık kaynaklı R Studio yazılımı ve karar verme analiz yöntemleri kullanılarak optimize edilmiş; en ideal iplik kalite sonuçlarını veren manşon, apron ve kopça türleri belirlenmiştir. R programlama dili, istatistiksel hesaplama, grafik oluşturma ve veri analizi için kullanılan açık kaynaklı bir yazılım olup, çalışmada veri analiz süreçlerinin temelini oluşturmuştur.

Ayrıca, üretim parametreleri ile iplik kalite değerleri arasındaki ilişkiler, Minitab 18 programı kullanılarak korelasyon katsayısı analizleri ile değerlendirilmiştir. Bu sayede, kullanılan komponentlerin iplik kalitesine etkisi istatistiksel olarak da ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Methot

Ecocell elyafı Türkiye'de üretilen bir liyosel elyafıdır. Ecocell lifine ait teknik bilgiler **Tablo 1**'de paylaşılmıştır.

Tablo 1. Ecocell elyafı teknik bilgileri

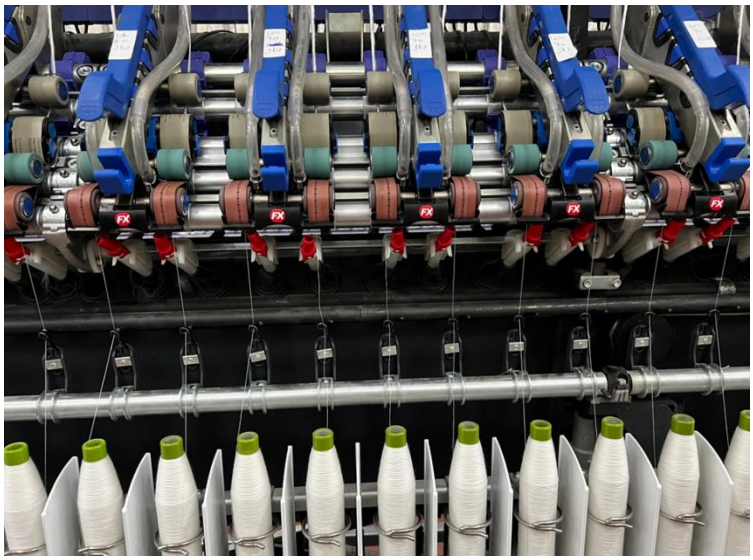
Özellik	Birim	Test metodu	Spesifikasyon	Sonuç
Titer	Dtex	ISO 1973	1.15- 1.45	1,33
Kopma mukavemeti	cN/tex	ISO 5079	≥ 40	41,11
Kopma uzaması	%	ISO 5079	≥ 10	10,29
Kesim uzunluğu	mm	DIN 53808-1	37- 39	38,08
CIE beyazlık	-	ISO 11475	> 70	71,43
Nem oranı	%	BISFA	9- 13	11,81

Tablo 2. Makine parkuru

Makine adı	Marka
Balya Açıcı	Trützschler BL-TO
Mikser	Trützschler MX-U 10
Tarak	Trützschler TC 19i
Cer (1. Pasaj ve 2. Pasaj)	Trützschler TD 9C ve 10C
Fitil	Saurer Autospeed
Ring	Saurer ZI72 XL

Çalışmada, iplik üretimi ring eğirme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde, 2023 model Trützschler hazırlık hattı, Saurer Autospeed fitil makinesi ve Saurer ZI72 XL ring iplik makinesi kullanılmıştır. Bu süreçte, Ne 20/1 numara iplik üretilmiştir. Ring makinesine ait makine parkuru **Tablo 2**'de paylaşılmıştır.

Saurer ZI72 XL ring makinesinde 962-1200 nolu iğler (**Şekil 1**) arasında standard temizlik kuralları takip edilerek 6 günlük üretim takibi yapılmıştır. Kullanılan kopçaların rodaj saatleri takip edilmiş ve müteakip takımdan ölçüm alınmıştır. İğ numaralarına göre örnekler her 36 saatte bir kez toplanmıştır. Makine parametreleri **Tablo 3**'te paylaşılmıştır.



Şekil 1. Sauer Z172 XL iğ dizilimi

Tablo 3. Ring iplik üretim parametreleri

İplik No	Ne 20/1
İplik Türü	Dokuma
İğ Devri (d/dk)	14500
Ortlama İğ devri (d/dk)	18650
Fitil Ne	Ne 0,90
Büküm Katsayısı	3.5 α
Büküm Sayısı	580 tpm
Bilezik Çap (mm)	38
Bilezik Türü (mm)	E 38X43X3,2 TİTAN

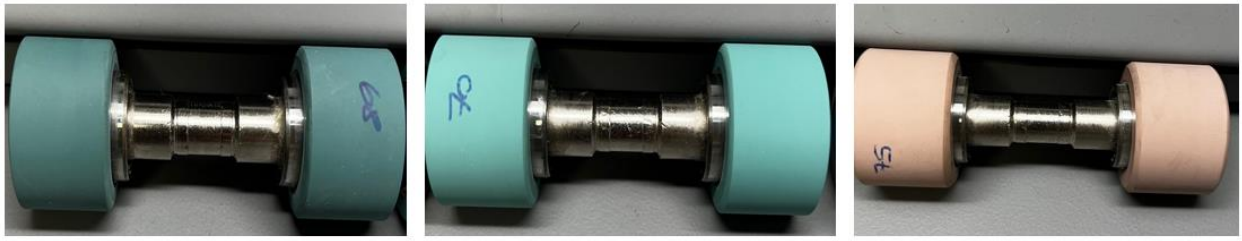
Çalışmada kullanılan kopça numaraları, Ne 20/1 iplik numarası ve 38 mm bilezik çapına uygun olarak, ISO standartlarına göre belirlenmiştir. Üretim süresince işletme ortam koşulları; 33 ± 2°C sıcaklık ve %50 bağıl nem seviyesinde sabitlenmiştir.

Çalışmada, üç farklı tipte kopça, üç farklı apron ve üç farklı manşon kullanılmıştır. Kopçalar; Bräcker firmasına ait C1 UL UDR Saphir, C1 UM UDR Saphir ve C1 LM UDR Saphir (**Şekil 2**) modellerinden seçilmiştir. Apron olarak JKS, Schoeger ve Asteks markalarına ait ürünler tercih

edilmiştir (**Şekil 3**). Manşonlar ise farklı Shore sertlik derecelerine sahip olup; 68 Shore, 70 Shore ve 75 Shore olarak belirlenmiştir (**Şekil 4**). Bu üç ana eğirme komponentinin iplik kalite parametrelerine etkisi, sabit üretim koşulları altında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 2. Kopçalar sırasıyla; C1 UL UDR Saphir, C1 UM UDR Saphir, C1 LM UDR Saphir

Şekil 3. Apronlar sırasıyla; JKS, Schoeger ve Asteks



Şekil 4. Manşonlar sırasıyla; 68 shore, 70 shore ve 75 shore

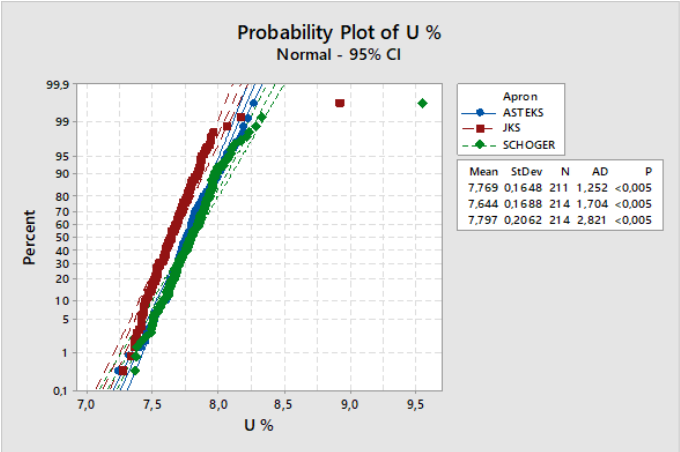
Tüm numuneler, test öncesinde 22 ± 2°C sıcaklık ve %65 bağıl nem koşullarındaki laboratuvar ortamında 24 saat boyunca kondüsyonlanmıştır. İplik kalite parametrelerinden düzgünsüzlük, kalın yer, ince yer ve neps (Neps 280%, Neps 200%, Neps 140%) değerleri; Uster Tester 6-S800 cihazı kullanılarak, 400 m/dk test hızıyla ölçülmüştür. İpliğin mukavemet ve uzama özellikleri ise Uster Tensorapid 5 cihazı ile, 500 mm test uzunluğu ve 5000 mm/dk test hızı parametrelerinde belirlenmiştir. Elde edilen veriler, Minitab 18 programı kullanılarak analiz edilmiş ve grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Özellikle, en ideal sonuçları ortaya koymak amacıyla tahminsel nokta dağılım grafikleri kullanılmış ve istatistiksel anlamlılık için $p < 0,05$ güven aralığı esas alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

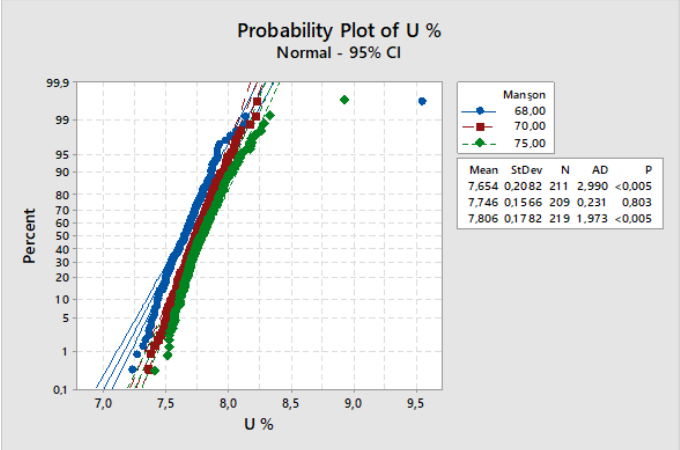
Çalışma kapsamında üretim parametreleri ile iplik kalite değerleri arasındaki ilişkiler, Minitab 18 programı kullanılarak korelasyon katsayısı analizleri ile değerlendirilmiştir.

Tahminsel dağılım grafikleri incelendiğinde, JKS marka apronun iplik düzgünsüzlüğü açısından en iyi Uster test sonuçlarını verdiği gözlemlenmiştir (**Şekil 5**). Aynı grafikler doğrultusunda, 68 Shore sertliğe sahip manşon, en düşük düzgünsüzlük değerini sağlayarak en ideal manşon türü olarak öne çıkmıştır (**Şekil 6**). Kopça türleri açısından yapılan değerlendirmede ise, UM tip kopça,

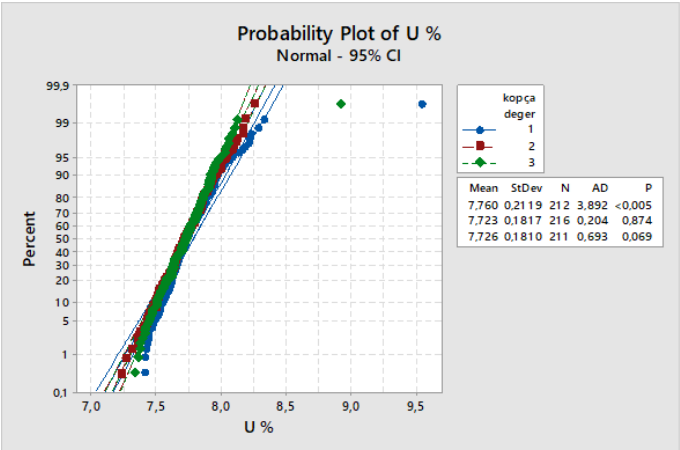
iplik kalite parametreleri açısından en iyi performansı sergileyerek en uygun seçenek olarak belirlenmiştir (**Şekil 7**).



Şekil 5. Apronlara göre iplik düzgünsüzlüğü tahminsel dağılım grafiği

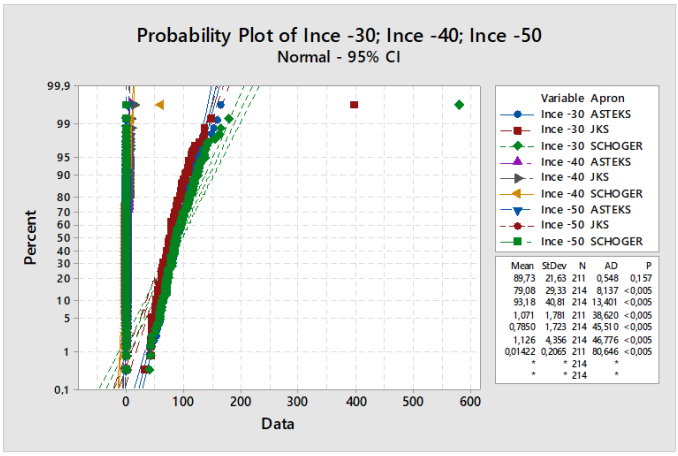


Şekil 6. Manşonlara göre iplik düzgünsüzlüğü tahminsel dağılım grafiği



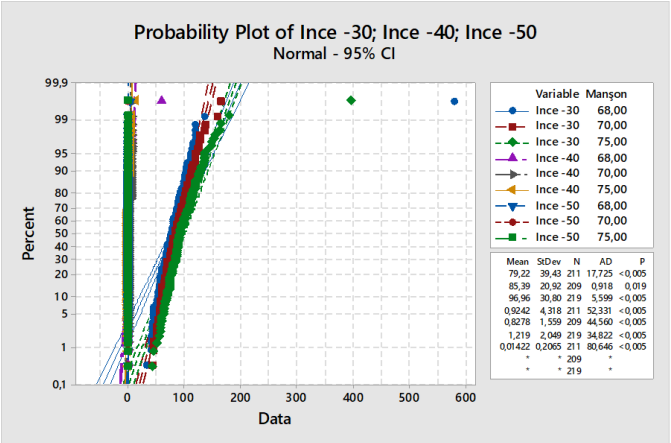
Şekil 7. Kopçalara göre iplik düzgünsüzlüğü tahminsel dağılım grafiği

Grafiklerde düzgünsüzlük açısından değerlendirildiğinde, JKS marka apronun iplikteki ince bölge sayısını en düşük seviyede tutarak en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir (**Şekil 8**).



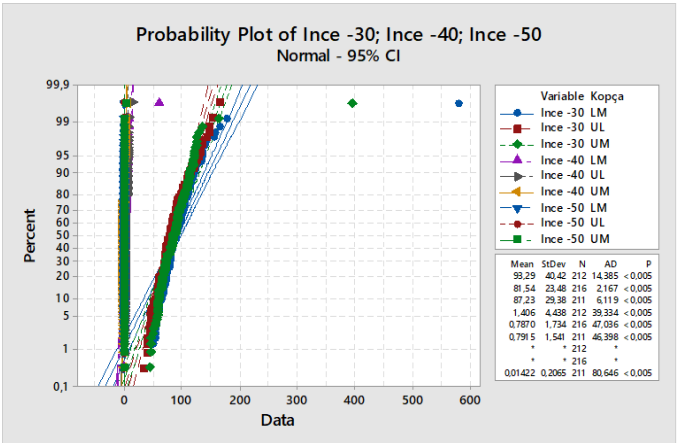
Şekil 8. Apronlara göre tahminsel dağılım grafiği (ince yer)

Aynı şekilde, 68 Shore sertlikteki manşonun da en az ince bölge değerine sahip numuneyi oluşturduğu görülmüştür (**Şekil 9**).



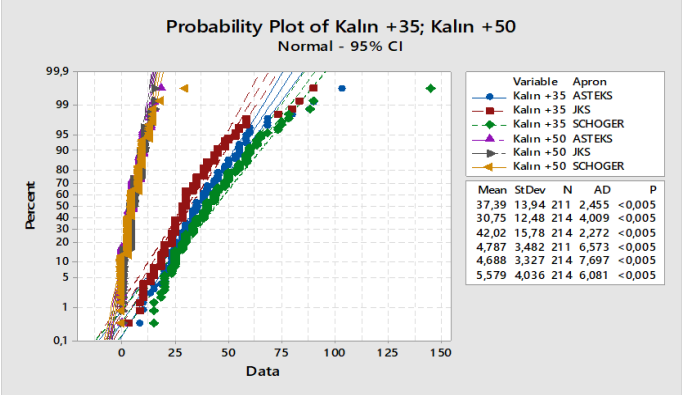
Şekil 9 Manşonlara göre tahminsel dağılım grafiği (ince yer)

Kopça tipleri açısından değerlendirildiğinde ise, UM tipi kopça, ince bölge parametresi açısından en ideal performansı göstermiştir (**Şekil 10**).



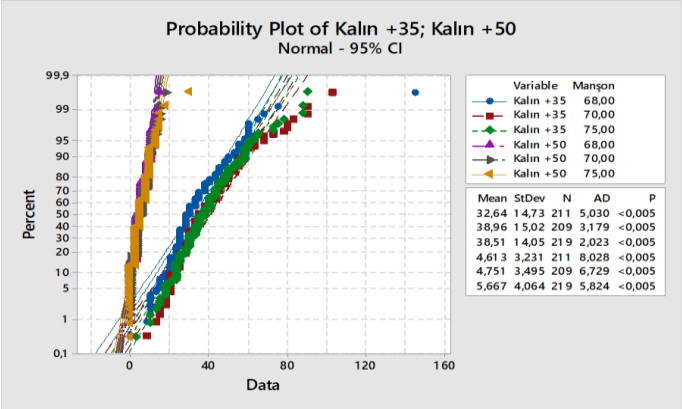
Şekil 10. Kopçalara göre tahminsel dağılım grafiği (İnce Yer)

Tahminsel dağılım grafikleri incelendiğinde, JKS marka apronun, iplikteki kalın bölge oluşumu açısından en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir (**Şekil 11**).



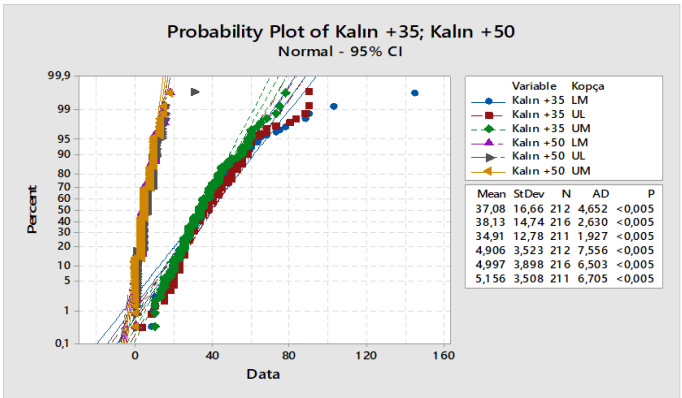
Şekil 11. Apronlara göre tahminsel dağılım grafiği (Kalın yer)

Benzer şekilde, 68 Shore sertliğe sahip manşonun, en düşük kalın yer değerini sağladığı görülmüştür (**Şekil 12**).



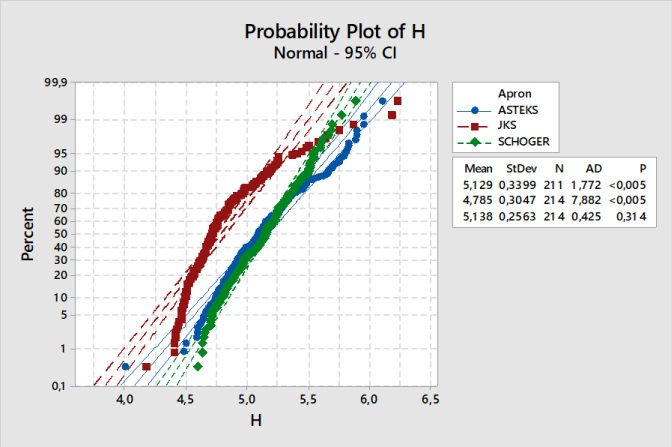
Şekil 12. Manşonlara göre tahminsel dağılım grafiği (Kalın yer)

Kopça türleri arasındaki karşılaştırmalarda ise, UM tipi kopça, kalın bölge açısından en ideal sonucu veren kopça olarak öne çıkmıştır (**Şekil 13**).

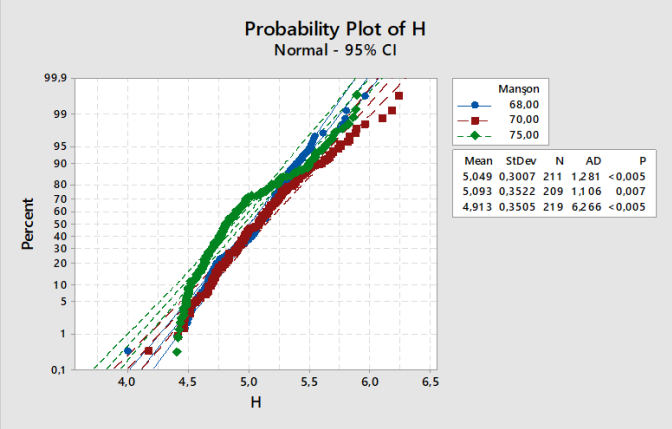


Şekil 13. Kopçalara göre tahminsel dağılım grafiği (Kalın yer)

Tüylülük açısından değerlendirildiğinde, JKS marka apronun, iplikte oluşan tüylülük değerleri açısından en düşük sonucu vererek en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir (**Şekil 14**). Aynı grafik türünden elde edilen verilere göre, 75 Shore sertliğe sahip manşon, en ideal tüylülük değerini sağlamıştır (**Şekil 15**).

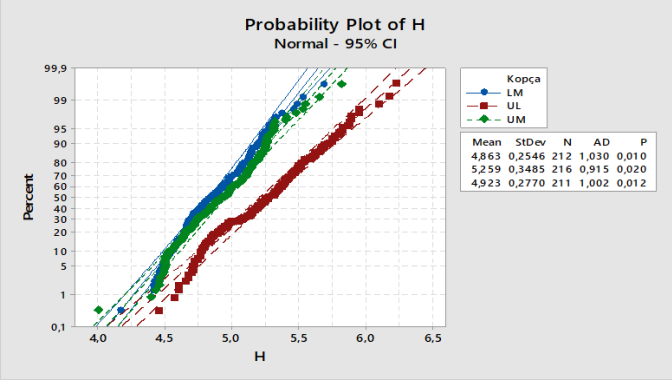


Şekil 14. Apronlara göre tahminsel dağılım grafiği (Tüylülük)



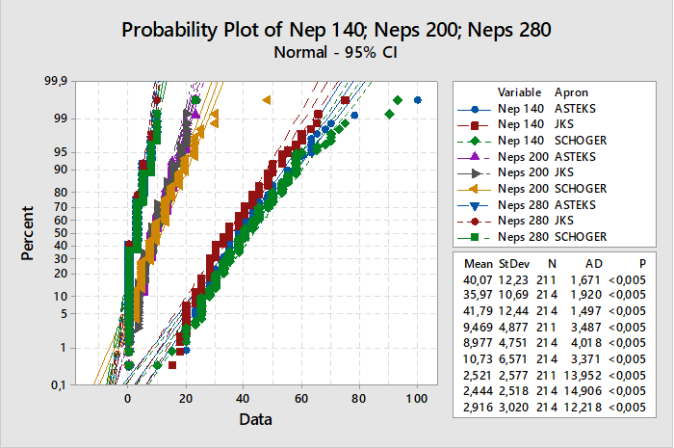
Şekil 15. Manşonlara göre tahminsel dağılım grafiği (Tüylülük)

Kopça türleri arasında yapılan değerlendirmede ise, UL tipi kopça, tüylülük parametresi açısından en başarılı sonucu veren kopça olarak öne çıkmıştır (**Şekil 16**).

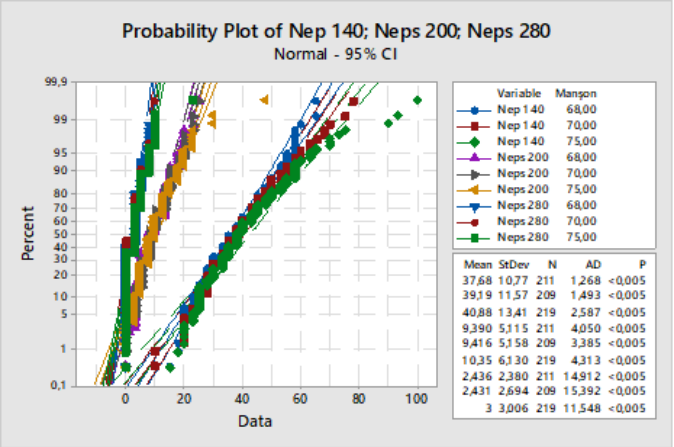


Şekil 16. Kopçalara göre tahminsel dağılım grafiği (Tüylülük)

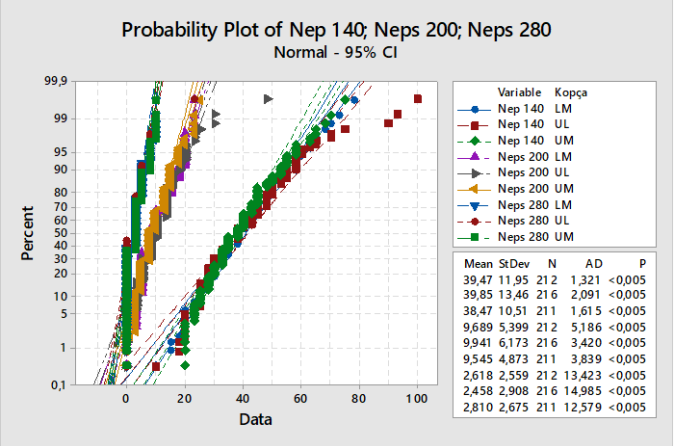
Grafiklere göre, JKS marka apron, yapılan testler sonucunda en iyi NEPS değerini vermiştir (**Şekil 17**). 68 Shore sertliğine sahip manşonun en ideal NEPS sonucunu sağladığı gözlemlenmiştir (**Şekil 18**). Ayrıca, kopça türleri arasında en uygun performansı UM tipi kopçanın gösterdiği belirlenmiştir (**Şekil 19**).



Şekil 17. Apronlara göre tahminsel dağılım grafiği (Neps)

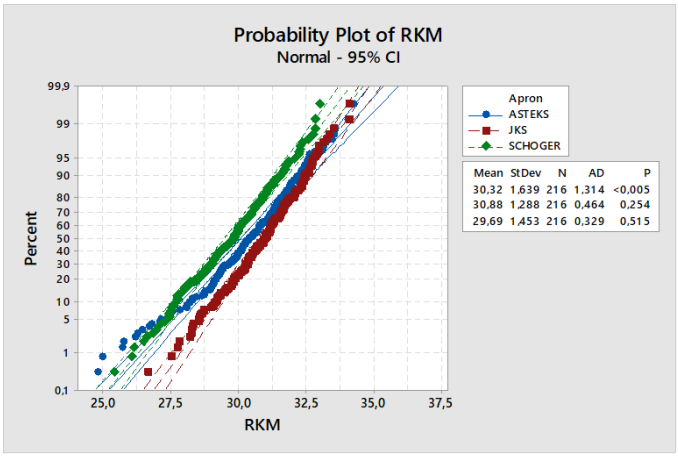


Şekil 18. Manşonlara göre tahminsel dağılım grafiği (Neps)



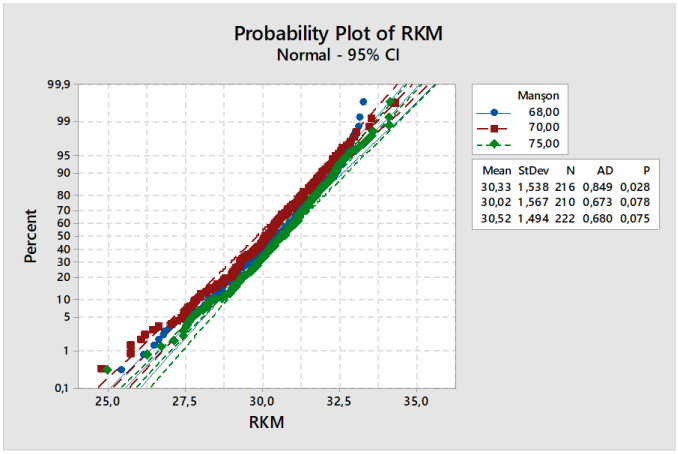
Şekil 19. Kopçalara göre tahminsel dağılım grafiği (Neps)

Grafiklerden anlaşılacağı üzere, JKS marka apron en iyi RKM sonucunu vermiştir (**Şekil 20**).

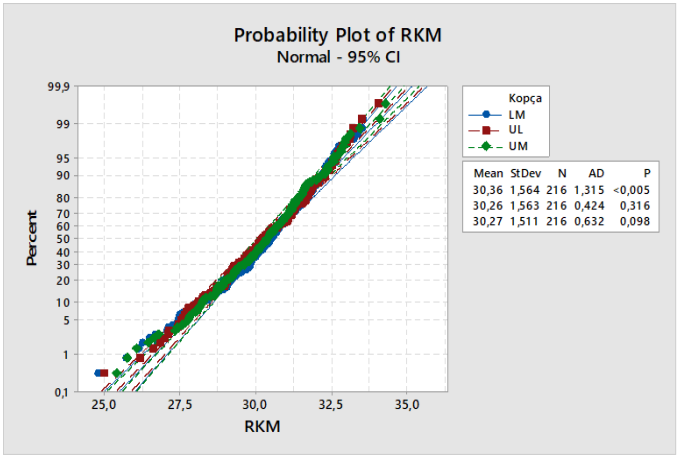


Şekil 20. Apronlara göre tahminsel dağılım grafiği (RKM)

75 Shore sertliğinde olan manşon, ideal RKM değerini sağlayarak öne çıkmıştır (**Şekil 21).** Kopça türleri arasında ise UL tipi, en başarılı sonucu göstermiştir (**Şekil 22**).

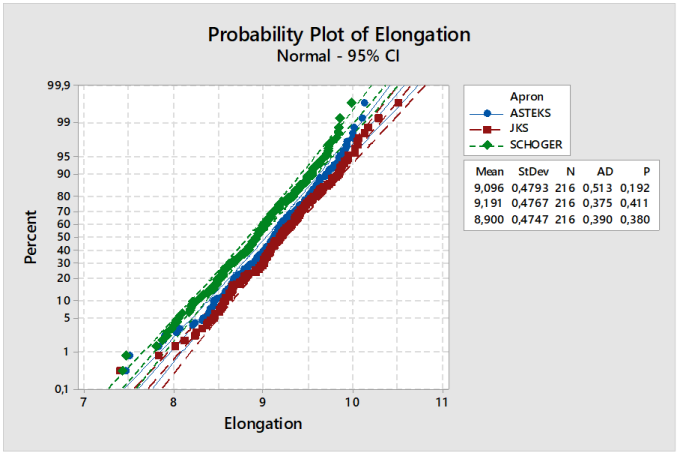


Şekil 21. Manşonlara göre tahminsel dağılım grafiği (RKM)

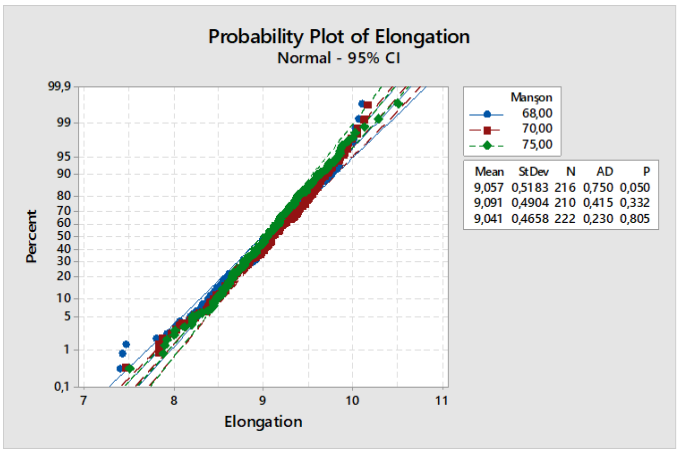


Şekil 22. Kopçalara göre tahminsel dağılım grafiği (RKM)

Tahminsel dağılım grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre, JKS marka apron en yüksek uzama değerini sağlamıştır (**Şekil 23**). 70 Shore sertliğindeki manşon, uzama performansı açısından en iyi sonucu vermiştir (**Şekil 24**).

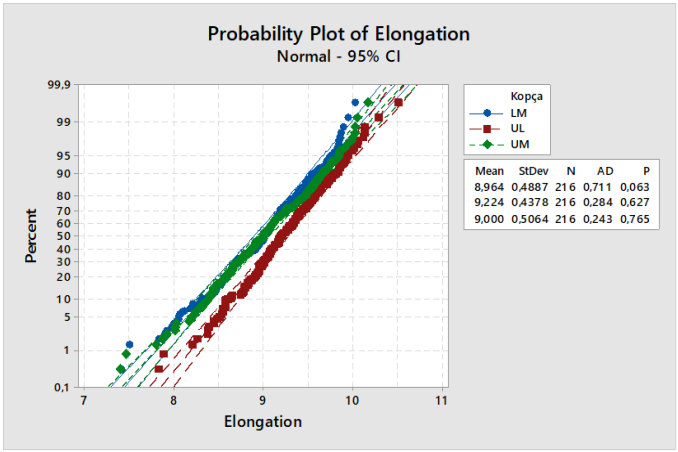


Şekil 23. Apronlara göre tahminsel dağılım grafiği (Uzama)



Şekil 24. Manşonlara göre tahminsel dağılım grafiği (Uzama)

Ayrıca, kopça türleri arasında en ideal performans UL tipi kopçayla elde edilmiştir (**Şekil 25**).



Şekil 25. Kopçalara göre tahminsel dağılım grafiği (Uzama)

Bu çalışmada, üretim parametreleri ile kalite çıktıları arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla Minitab 18 istatistiksel analiz yazılımı kullanılarak korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, bazı değişken çiftleri arasında yüksek düzeyde doğrusal ilişki tespit edilmiştir. Elde edilen en yüksek korelasyon katsayıları aşağıda verilmiştir:

- Apron – İnce (yüzde 50 oranında): $r = 0,84$
- Kopça – Neps (yüzde 200 oranında): $r = 0,789$
- Apron – Tüylülük: $r = 0,765$

Bu sonuçlar, söz konusu üretim bileşenlerinin kalite parametreleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Çok kriterli karar verme sürecinde ise, R Studio programı içerisinde yer alan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS, karar noktalarının ideal çözüme olan uzaklıklarının hesaplanmasına dayanmakta olup, ideal alternatife en yakın ve ideal olmayan alternatife en uzak olan seçeneği en uygun alternatif olarak belirlemektedir.

Bu yöntem kapsamında kullanılan karar kriterleri şu şekilde tanımlanmıştır:

- Minimize edilmesi hedeflenen kriterler: Düzgünsüzlük, ince yer, kalın yer, neps, tüylülük
- Maksimize edilmesi hedeflenen kriterler: Mukavemet, uzama

Analiz kapsamında, toplam 81 farklı alternatif değerlendirmeye alınmış ve her biri TOPSIS yöntemi doğrultusunda sıralanarak en uygun üretim parametreleri belirlenmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, Ne 20/1 Ecocell marka liyosel ring ipliği ile üretim sürecinde toplam 9 farklı parametre, 27 farklı durum 6 tekrarlı çalışılmıştır. 36 saatte bir kez alınan numuneler fiziksel ölçüm parametreleri ile ölçümlenmiştir.

Çalışma, apron, manşon ve kopça gibi temel üretim parametrelerinin iplik kalite özelliklerine etkilerini incelemektedir. Minitab 18 programı ile gerçekleştirilen korelasyon analizleri sonucunda, apron ile ince yer oluşumu (r=0,84), kopça ile neps (r=0,789) ve apron ile tüylülük (r=0,765) arasında yüksek düzeyde pozitif ilişki tespit edilmiştir. Tahminsel dağılım grafiklerinden elde edilen bulgulara göre, JKS marka apron tüm kalite parametrelerinde en iyi sonuçları vermiştir. Manşonlarda 68 Shore sertlik düzgünsüzlük ve neps açısından, 75 Shore tüylülük, 70 Shore ise uzama açısından en ideal değerleri sağlamıştır. Kopça türleri arasında UM tipi düzgünsüzlük ve hatalar açısından; UL tipi ise RKM, tüylülük ve uzama açısından en iyi performansı göstermiştir. R Studio ortamında uygulanan TOPSIS yöntemi ile yapılan çok kriterli değerlendirme, grafiksel ve istatistiksel bulgularla yüksek oranda örtüşmüş ve en uygun üretim kombinasyonları belirlenmiştir.

Referanslar

1. Bracker, Kısa Elyaf El Kitabı: Ürünler, Teknoloji ve Uygulama, 2008.
2. P. D. Baykal ve Ö. Akbaş, "Kompakt Penye İplik Üretiminde Kopça Türünün İplik Kalitesine ve Kopça Ömrüne Etkileri", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, c. 39, s. 415–426, 2020.
3. Y. Wang, D. Gong, Y. Bai ve Y. Zhai, "Analysis on the Spinning Process and Properties of Tencel Yarn", Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, c. 3, s. 41–47, 2015.
4. E. Borbely, "Lyocell, The New Generation of Regenerated Cellulose", Acta Polytechnica Hungarica, c. 5, s. 11–18, 2008.
5. Bracker, "Ring Travelers Brochure 3465-TR". [Çevrim içi]. Erişim: https://www.bracker.ch/fileadmin/user_upload/products/documents/components/ring-spinning/ring-travelers/bracker-travelers-brochure-3465-tr.pdf
6. S. Altaş, "Influence of Apron Space on Yarn Quality Properties in a Ring Spinning Frame," Tekstil - Zagreb, vol. 57, pp. 158–163, 2008.
7. C. Lawrence CA. Fundamentals of spun yarn technology.Boca Raton: Crc Press; 2003. 273 p.

A STACKELBERG-BASED ANALYSIS OF STRATEGIC NEGOTIATIONS in COLLABORATIVE NEW PRODUCT DEVELOPMENT

SAMET KÜRŞAT BAŞOL [*1,2], ALPTEKİN DURMUŞOĞLU [3], TÜRKAY DERELİ[4]

[1] Gaziantep University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Industrial Engineering, Gaziantep, TÜRKİYE.
[2] Gaziantep University Target Technology Transfer Office Inc., Gaziantep, TÜRKİYE.
[3] Samsun University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, Samsun, TÜRKİYE.
[4] The Economic Policy Research Foundation of Türkiye (TEPAV), Ankara, TÜRKİYE.

Abstract

The literature on university-industry collaboration has generally focused on the long-term outcomes and final performance indicators of collaboration. However, the initial phase of the collaboration process, and particularly the strategic dynamics that emerge when each actor takes the initiative, has been relatively neglected. There is only a limited number of theoretical and empirical studies on how leadership initiative shapes behavioral patterns prior to collaboration. This gap necessitates the development of new models to better understand the strategic decision-making processes of the parties. To address this deficiency, this study examines the collaborative dynamics between the Technology Transfer Office (TTO), the University, and the Company trio during the new product development process within the framework of the Stackelberg leader-follower model. The model is based on the leader's announcement of the collaboration proposal and the governance framework, while the other actors make the strategic decision to accept or reject the proposal. Threshold values are defined for each scenario. Furthermore, it demonstrates how behavioral patterns differ depending on which actor initially assumes leadership. The analysis results demonstrate that the leadership role is a critical determinant in negotiation processes. In conclusion, this study highlights the importance of actor-based leadership initiatives in the new product development process. Thus, it provides a unique theoretical framework for understanding strategic decision-making processes in the technology transfer ecosystem.

Keyword: Technology Transfer Office (TTO), University-Industry Collaboration, Game Theory, Stackelberg Model

1. Introduction

Digitalization, sustainability, and accelerating knowledge cycles have transformed university-industry interactions into a strategic lever-not only for enhancing internal innovation capacity within firms but also for improving regional ecosystem performance. Recent studies have remapped dynamic structures such as joint research, contract research, consulting, and informal ties, showing that "academic interaction" is a contextual and non-linear process on the path to commercialization [1]. On the institutional architecture side of university-industry collaboration, the role of Technology Transfer Offices (TTOs) has evolved throughout the 2020s from a classical licensing intermediaries to a capacity and resource design that manages the diffusion of transformative technologies [2]. In this context, the updates of the Triple/Neo-Triple Helix approaches in the 2020s offer an "ecosystem-focused" structure that addresses the sustainable development goals of public, university, and industry actors together with the need for governance in data-intensive industries [3].

However, in the innovation ecosystem literature, strategic interactions at the early stage-in other words, how negotiation thresholds and behavioral patterns shift depending on which actor initiates the process-have become a focus of recent studies. Findings suggest that the level of collaboration readiness, inter-institutional trust, intellectual property expectations, and market entry strategies influence early-stage decisions [4]. Research, particularly in emerging economies, highlight that limited access to information and awareness of academic-industry collaboration opportunities, as well as financing constraints, are the most critical obstacles, and the importance of TTOs in bridging these gaps [5].

Strategic interactions among actors in university-industry collaborative R&D and new product development (NPD) projects is one of the key factors determining outcomes. In the literature, the Stackelberg leader-follower model is widely used to model this interaction within a game-theoretic framework. Collaboration decisions unfold over time, and the efforts of the parties have dynamic effects on parameters such as knowledge, technological level, and market acceptance [6].

In formalizing strategic interactions, Stackelberg (leader-follower) structures are suitable for explaining the equilibrium outcomes of acceptance-rejection thresholds and sharing parameters (revenue/cost share, effort allocations) through backward induction logic, which traces the best response functions of the followers after the leader announces his commitment [7]. In the existing literature, the Stackelberg model has been used in various fields of study involving collaboration. In the evaluation of patent licensing strategies, the licensing choice (per unit vs. ad valorem) is used to structure the Stackelberg leader/follower model [8]. In addition, by comparing different licensing schemes (fixed fee, per unit, ad valorem and two-part structures) in the Stackelberg scenario, where the innovator is the follower, it has been shown that the optimal choice varies significantly with respect to the leader/follower position and the demand-cost parameters; As a result, both profitability and consumer welfare are sensitive to the license type. [9]. Differential game-based studies on university-industry collaborations reveal that the choice of governance mode (Nash–Stackelberg–cooperative) significantly affects system output through time-varying effort decisions [10]. Methodologically, it is shown that in environments with strategic response, the rule declared by the leader need not be deterministic and that optimal policy families exist that depend on response costs, thus providing normative design insights into the question of "who is the leader?" in early-stage negotiations [11].

The purpose of this study is to examine the question of who take the leadership role in planning new product development efforts in university-industry collaborations for Technology Transfer Office (TTO) activities. The model evaluates collaboration initiation scenarios for the TTO, university, and company within the framework of Stackelberg Game Theory, and analyzes the behavior of the parties' strategies over time.

The study contributes to the strategic understanding of collaboration dynamics within the university-industry collaboration ecosystem and to concretely present the TTO's policy recommendations.

2. Materials and Methods

In this study, the assumptions for the Stackelberg game model are set as follows:

Assumption 1: The total project revenue is R_T and the cost is C_T.
Assumption 2: When the TTO participates in the project, it earns revenue equal to R1. When the TTO participates, it makes an effort to reduce the total cost. The cost of this effort is C_1, and as a result, it reduces the university's cost by G_1 and the firm's cost by G_2. When the TTO does not participate in the collaboration, its revenue decreases by *f*, and its revenue is $R_2 = f.R_1$, where *f* is a coefficient in the range (0, 1).
Assumption 3: If the university participates, it earns revenue equal to R_3 and shares c_d of the cost. c_d is a coefficient in the range (0, 1). If the university does not participate and chooses to produce and license the underlying technology, it bears the R&D cost denoted by C_2. The university demands a fixed L_1 from the firm for the licensing fee.
Assumption 4: If the firm participates, it earns revenue R_5 and covers the cost $(1-c_d)$. If it chooses not to participate and transfers the technology directly, it pays a fixed fee F_1. After acquiring this core technology, the firm can independently innovate and apply it in production. C_3 represents the firm's innovation cost. R_6 represents the benefits the firm obtains through independent technological innovation. R_7 represents the firm's profit without collaboration, C_2 represents the R&D cost, and C_3 represents the innovation cost, resulting in revenue expression: $R_7=R_6-C_2-C_3+L_1$.
Assumption 5: The revenue sharing coefficients of the total revenue R, for TTO, university, and firm are θ_1, θ_2, and θ_3, respectively such that $(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1)$. θ is a profit-sharing coefficient in the range (0,1).

The net payoffs under participation and non-participation are presented in Table 1.

Table 1. Net payoffs of Actors.

Actors	Participation (1)	Non-Participation (0)
TTO	$\Pi_T = \theta_1 \times R - C_1$	$\Pi_T = R_2 = f \times R_1$
University	$\Pi_U = \theta_2 \times R - (c_d \times C_T - G_1)$	$\Pi_U = F_1 - C_2$
Firm	$\Pi_F = \theta_3 \times R - ((1 - cd) \times C_T - G_2)$	$\Pi_F = R_6 - C_2 - C_3 + L_1$

The participation constraints for the TTO, the university, and the firm are presented in Table 2.

Table 2. The participation constraints for Actors.

Actors	Participation Condition
TTO	$\theta_1 \times R_T - C_1 \geq f \times R_1$
University	$\theta_2 \times R_T - (c_d \times C_T - G_1) \geq F_1 - C_2$
Firm	$\theta_3 \times R_T - ((1 - c_d) \times C_T - G_2) \geq R_6 - C_2 - C_3 + L_1$

This study focuses on three scenarios in which TTO, University, and Firm act as the leader, respectively.

TTO Leadership Scenario; TTO is assumed to initiate a new product development project through an innovative university-industry partnership. Because *TTO* is the first move, it is defined as the leader in the collaboration.

$$\max_\{\theta_1,\theta_2,\theta_3,G_1,G_2\}\Pi_T = \theta_1 \cdot R - C_1 \quad (1)$$

Subject to;

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1,\ \theta_i \in (0,1) \quad (2)$$

$$0 \leq G_1 \leq c_d \cdot C_T,\ 0 \leq G_2 \leq (1-c_d) \cdot C_T. \quad (3)$$

$$\theta_1 \cdot R - C_1 \geq f \cdot R_1 \quad (4)$$

$$\theta_2 \cdot R - (c_d \cdot C_T - G_1) \geq L_1 - C_2 \quad (5)$$

$$\theta_3 \cdot R - ((1-c_d) \cdot C_T - G_2) \geq R_6 - C_2 - C_3 + L_1 \quad (6)$$

University Leadership Scenario; *University* is assumed to initiate a new product development initiative through an innovative university-industry partnership. Because *University* takes the first move, it is defined *University* is considered a leader in the collaboration.

$$\max_\{\theta_1,\theta_2,\theta_3,(G_1,G_2)\}\Pi_U = \theta_2 \cdot R - (c_d \cdot C_T - G_1) \quad (7)$$

Subject to;

$$\theta_2 \cdot R - (c_d \cdot C_T - G_1) \geq \Pi_{U} = L_1 - C_2 \quad (8)$$

$$\theta_1 \cdot R - C_1 \geq f \cdot R_1 \quad (9)$$

$$\theta_3 \cdot R - ((1-c_d) \cdot C_T - G_2) \geq R_6 - C_2 - C_3 + L_1 \quad (10)$$

Firm Leadership Scenario; Firm is assumed to initiate a new product development initiative through an innovative university-industry partnership. Because *Firm* takes the first move, it is defined as the leader in the collaboration.

$$\max_\{\theta_1,\theta_2,\theta_3,(G_1,G_2)\}\Pi_F = \theta_3 \cdot R - [\ (1-c_d) \cdot C_T - G_2\ ] \quad (11)$$

Subject to;

$$\theta_3 \cdot R - [\ (1-c_d) \cdot C_T - G_2\ ] \geq \Pi_{F} = R_6 - C_2 - C_3 + L_1 \quad (12)$$

$$\theta_1 \cdot R - C_1 \geq f \cdot R_1 \quad (13)$$

$$\theta_2 \cdot R - (c_d \cdot C_T - G_1) \geq L_1 - C_2 \quad (14)$$

3. Results and Discussion

In this study, a numerical simulation based on the Stackelberg game model was conducted to analyze how collaborative dynamics among a *Technology Transfer Office (TTO)*, *University*, and *Firm* evolve under different leadership structures. Total payoff trajectories were constructed to illustrate changes in the parties' payoffs over time. The study compared the equilibrium convergence rate the overall system efficiency under three different scenarios—*TTO Leadership*, *University Leadership*, and *Firm Leadership*. The parameters used in the model are as follows: $R_T = 240$, $C_T = 100$, $C_1 = 20$, $C_2 = 30$, $C_3 = 70$, $c_d = 0.25$, $f = 0.5$, $G_1 = 20$, $G_2 = 40$, $\theta_1 = 0.2$, $\theta_2 = 0.3$, $\theta_3 = 0.5$, $L_1 = 50$, and the firm's independent innovation payoff, $R_6 = 100$. Accordingly, This parameter set was used to observe how leadership allocation influences the system's equilibrium trajectory and overall payoff distribution.

Figures 1–4 depict the dynamic behavior of the payoffs obtained by the TTO, university, and firm across the three leadership scenarios.

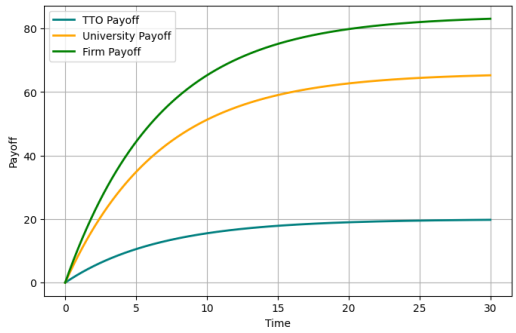


Figure 1. TTO Leadership

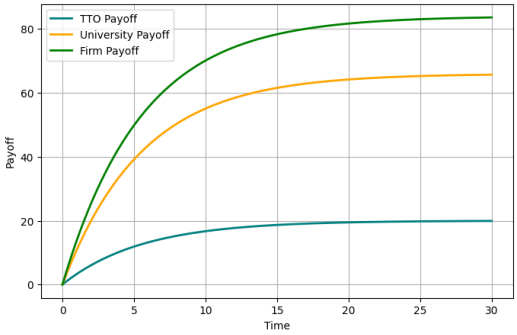


Figure 2. University Leadership

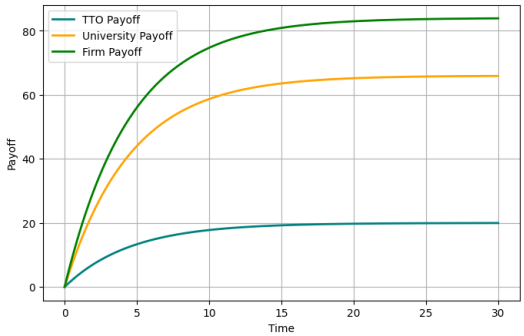


Figure 3. Firm Leadership

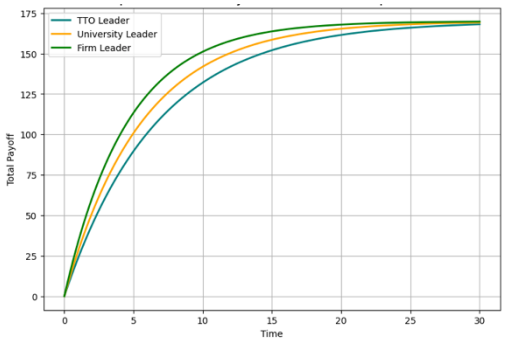


Figure 4. Actors Payoffs

In this scenario, the collaboration process is initiated by the TTO Leadership. Due to the TTO's role in coordination and trust-building, payoffs increase more slowly but steadily in the early stages of the process. As shown in Figure 1, under TTO leadership, both the university and the firm gradually join the collaboration; however, the rate of increase in total payoffs remains slower than in other scenarios.

Under University Leadership, collaboration is shaped around knowledge generation and R&D capacity. The impact of academic leadership leds to a more balanced distribution of benefits between the parties. According to the findings in Figure 2, total returns increase faster under university leadership than under TTO leadership, but it takes longer for the system to reach final equilibrium than under firm leadership.

Under Firm Leadership, collaboration dynamics exhibit a market-oriented and application-focused character. In this scenario, the system achieves the highest total benefits and the fastest equilibrium in Figure 3. Under firm leadership, the university's knowledge inputs and the TTO's coordination contribution translate into economic output at an early stage. This suggests that the market's dynamic responses accelerate the overall growth rate.

Figure 4 illustrate how total returns evolve over time under three different leadership structures. An increasing trend is observed across all scenarios along the time axis; however, there are significant differences between the slopes of the curves and the speed at which they reach equilibrium. Firm leadership achieves equilibrium most quickly, yielding the highest total benefit. This finding suggests that market-focused strategic decisions accelerate the rate of commercialization of collaboration outputs. University leadership ensured a more balanced increase in returns, creating a sustainable growth dynamic in the long term. In the TTO leadership scenario, returns increased more slowly, but the system's stability is higher.

The general trend observed in Figure 4 indicates that all actors move toward a full collaboration equilibrium over time, but the speed at which this equilibrium is reached varies depending on the leadership structure. The Company > University > TTO ranking confirms that the Stackelberg leader-follower structure directly affects the speed of innovation diffusion and the overall performance of the system.

4. Conclusions:

This study modeled the strategic interaction between the Technology Transfer Office (TTO), university, and firm using the Stackelberg game theory approach, revealing how collaboration dynamics evolve across different leadership structures. The findings demonstrate that leadership position determines not only revenue sharing but also the speed at which the system reaches equilibrium and the diffusion of innovation.

The results indicate that under firm leadership, the system reaches equilibrium most quickly and yields the highest total return. A market-oriented decision-making structure offers the advantage of high efficiency and commercialization in the short term. However, the risk that firm-centric leadership can make the partnership balance dependent on firm strategies in the long term should not be overlooked. In the university leadership scenario, a governance model based on knowledge production and R&D provides a more balanced distribution of benefits between the parties. This scenario offers a suitable governance framework for long-term sustainable collaborations in knowledge-based innovation ecosystems. In the case of TTO leadership, while the growth rate is relatively lower, system stability is high. This result demonstrates that TTO leadership creates a structure that strengthens system stability in the long term, despite a limited growth effect in the short term. While the TTO's coordination, trust, and process management capacity may produce limited returns in the short term, they create a stable equilibrium mechanism in the long term.

As a result of the overall assessment, the ranking of Firm> University > TTO among the three scenarios reveals a fundamental performance pattern that defines collaboration speed and economic outcomes. The results clearly demonstrate that strategic leadership position is a key control variable determining synergy among stakeholders in technology transfer ecosystems, and the leader's role in optimizing collaboration dynamics determines the direction of systemic outcomes. Future studies are recommended to more comprehensively examine the system's equilibrium stability by integrating factors such as information asymmetry, trust level, and technology maturity level (TRL) into the model.

References:

1. Perkmann, M., Salandra, R., Tartari, V., McKelvey, M., & Hughes, A. Academic engagement: A review of the literature 2011-2019. Research Policy, **2021,** *50*(1), 104114.
2. Borrás, S., Gerli, F., & Cenzato, R. Technology transfer offices in the diffusion of transformative innovation: Rethinking roles, resources, and capabilities.Technological forecasting and social change, **2024**, 200, 123157.
3. Cai, Y. Neo-triple helix model of innovation ecosystems: integrating triple, quadruple and quintuple helix models. Triple Helix, **2022**, 9(1), 76-106
4. Verreynne, M. L., de Oliveira, R. T., Cao, Z., Nguyen, T., & Feast, G. University–business collaboration: A collaboration readiness index and scale. Research Policy, **2025**, 54(8), 105273
5. Kleiner-Schaefer, T., & Schaefer, K. J. Barriers to university–industry collaboration in an emerging market: Firm-level evidence from Turkey. *The Journal of Technology Transfer*, **2022**, *47*(3), 872-905
6. Rossoni, A. L., de Vasconcellos, E. P. G., & de Castilho Rossoni, R. L. Barriers and facilitators of university-industry collaboration for research, development and innovation: a systematic review. Management Review Quarterly, **2024**, 74(3), 1841-1877
7. Wang, L., Cao, Z., & Li, P. Research on the mechanism of leader-follower product sales competition based on market access restrictions and forward contract considerations. *Heliyon*, **2024**, *10*(11).
8. Antelo, M., & Bru, L. Licensing of a cost-reducing innovation in a Stackelberg-differentiated duopoly. *Economic Modelling*, **2024**, *141*, 106893.
9. Bode, O. R., Ferreira, F., & Ferreira, F. A. Comparison between different licensing schemes in a Stackelberg model when the follower is the innovator. Journal of Computational Methods in Science and Engineering, **2021** 21(2), 301-309.
10. Xu, S., & Fan, Y. Differential Game Analysis on University-Enterprise Cooperation considering Social Responsibility. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, **2021**, *2021*(1), 5880286
11. Banerjee, S., Mukherjee, A., & Poddar, S. Optimal patent licensing—Two or three-part tariff. *Journal of Public Economic Theory*, **2023**, *25*(3), 624-648

MODELING STRATEGIC DECISION-MAKING in TECHNOLOGY TRANSFER ECOSYSTEMS: AN EVOLUTIONARY GAME THEORY PERSPECTIVE

SAMET KÜRŞAT BAŞOL [*1,2], ALPTEKİN DURMUŞOĞLU [3], TÜRKAY DERELİ[4]

[1] Gaziantep University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Industrial Engineering, Gaziantep, TÜRKİYE.
[2] Gaziantep University Target Technology Transfer Office Inc., Gaziantep, TÜRKİYE.
[3] Samsun University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, Samsun, TÜRKİYE.
[4] The Economic Policy Research Foundation of Türkiye (TEPAV), Ankara, TÜRKİYE.

Abstract

Technology transfer offices (TTOs) and collaboration mechanisms between universities and industry play a critical role in the sustaining innovative ecosystems. However, the parties' tendency to act independently, information asymmetries and imbalances in cost-revenue sharing, makes it difficult to achieve a stable cooperation equilibrium balance. In this study, the three-way interaction among the TTO, university, and firm is modeled within the framework of evolutionary game theory. Using replicator dynamics, the parties' participation and non-participation strategies are examined, and the behavior of eight different equilibrium points is evaluated through stability analysis. The study defines parameters representing incremental (non), sustaining (low), radical (medium), and disruptive (drastic) innovation scenarios, and incorporates revenue-sharing coefficients, cost allocation, TTO contribution, and licensing policies into the model. Numerical simulation results show that under certain conditions, full collaboration equilibrium constitutes an evolutionarily stable strategy, while in other scenarios, partial collaborations evolve into a stable equilibrium. This study provides a theoretical framework for understanding strategic decision-making processes in the technology transfer ecosystem and makes a methodological contribution to the fields of innovation management and policy design.

Keyword: Technology Transfer Office (TTO), University-Industry Collaboration, Game Theory, Evolutionary Game Theory (EGT),

Assessing the Impact of Digital Modelling and Automation on Sustainability Metrics in 3D Printed Buildings: A Data-Driven Analysis

ZEYAD ASAAD AALBDULLAH [*1], MUAMMER KOÇ [1], SHOUKAT KHAN[1]

1Division of Sustainable Development, College of Science and Engineering, Hamad Bin Khalifa University, Qatar Foundation, Doha P.O. Box 34110, Qatar

Abstract

The combination of 3D printing, digital modeling, and automation is transforming the construction industry by enabling the creation of environmentally friendly structures that utilize materials efficiently and feature geometric complexity. This study presents a data-driven comparative analysis of 25 peer-reviewed investigations that evaluate the environmental, economic, and operational performance of 3D-printed edifices to traditional construction techniques. Life Cycle Assessment (LCA) results show significant drops in key environmental metrics: carbon dioxide emissions by up to 47%, embodied energy by 37%, water use by 21%, construction waste by 70–80%, and construction time by 95%. The chances of acidification, eutrophication, and fossil fuel depletion decrease by 50–55%, while the chances of non-carcinogenic toxicity decrease by 98%. In terms of financial savings, 3D printing can reduce capital costs by 78%, annual energy costs by 37%, and operational costs by up to 60%. However, costs in the life cycle and design phases can be higher in some cases. The results indicate that combining parametric design, digital twin technology, and robotics is the most effective approach to maximize sustainability and operational efficiency. The paper concludes that 3D printing, when combined with advanced digital workflows, is a feasible approach for decarbonizing the built environment and attaining next-generation sustainable construction.

Keyword: Sustainable construction, 3D printing, Digital modelling, Parametric Design, Life cycle assessment, Automation.

HARDOX-400 VE 1045 ÇELİKLERİNİN MAG YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ, MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

HALİL İBRAHİM KURT [1], İBRAHİM YILMAZ [1], AYŞENUR YAYLA[1]

[1]Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi SAMSUN, TÜRKİYE.

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, yüksek aşınma direncine sahip Hardox 400 çeliği ile orta karbonlu 1045 kalite galvanizli çelik plakaların MAG kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. 100x100 mm boyutlarında ve 2 mm kalınlığındaki metal plakalar, saniyede 5 cm tel ilerleme hızı kullanılarak birleştirilmiş; ardından ısıl işlem uygulanarak farklı ortamlarda soğutulmuştur. Mikroyapılar optik ve SEM ile mekanik özellikler sertlik ve çekme testi yapılarak araştırılmıştır. Yapılan analizler; iki farklı çelik türünün kaynak sonrası uyumluluk durumu, sertlik dağılımı, çekme mukavemeti ve mikroyapısal dönüşümleri ortaya konmuştur. Maksimum sertlik (235 HV) ve maksimum çekme dayanımı (314 MPa) suda sertleştirilmiş numunelerde elde edilmiştir. Sonuç olarak, yapılan mikroyapı ve mekanik analizler, Hardox 400 ve galvanizli 1045 çeliğinin MAG kaynağı ile başarılı şekilde birleştirilebildiğini ve uygulanan ısıl işlemlerin kaynak kalitesini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: MAG kaynağı, Hardox 400, 1045 çelik, ısıl işlem

1. Giriş

Yüksek aşınma direncine sahip Hardox 400 çeliği ile orta karbon içeriğine sahip 1045 galvanizli çeliğin birleştirilmesi, endüstriyel uygulamalarda hem dayanım hem de işlenebilirlik özelliklerini bir arada kullanmayı muhtemel kılabilir [1]. Hardox 400, İsveçli SSAB firması tarafından üretilen, yaklaşık 400 Brinell sertliğe (HB) sahip, yüksek aşınma direnci sağlayan özel bir çeliktir [2]. Martenzitik mikroyapısı sayesinde darbe dayanımı yüksek ve dayanıklı bir yapı malzemesi olup, özellikle madencilik ekipmanları, kamyon kasaları, kırıcılar ve aşındırıcı ortamlarda çalışan makinelerde tercih edilmektedir [3]. Bu çelik türü, yüksek aşınma direnci ile hizmet ömrünü uzatırken, daha ince kesitlerle yapısal mukavemetin korunmasına olanak tanır [3]. Yaklaşık 1000 MPa akma dayanımına ve 1250 MPa çekme dayanımına sahiptir. Yoğunluğu 7.85 g/cm³'tür ve yüksek tokluk (darbeye dayanıklılık) sergiler [4]. Kaynaklanabilirliği iyi olmakla birlikte, kalın kesitlerde ön ısıtma tavsiye edilir [5]. İşlenebilirliği nispeten zayıf olup, özel kesici uçlar gerektirebilir [6]. Avantajları arasında uzun hizmet ömrü, yüksek darbe dayanımı, iyi kaynaklanabilirlik ve ince kesitlerle yüksek dayanım sağlanabilmesi bulunur [4,5]. Ancak, sertliği nedeniyle soğuk şekillendirme sınırlıdır, kaynak öncesi ön ısıtma gerekebilir ve ısıl işlem uygulanmaz çünkü özel alaşımlı yapısı ve sertliği fabrikada sağlanır.

Öte yandan, 1045 çeliği, yaklaşık %0.45 karbon oranına sahip, orta karbonlu, sade bir mühendislik çeliğidir. Isıl işlemle mekanik özellikleri geniş bir aralıkta ayarlanabilir ve yaklaşık 7.85 g/cm³

yoğunluğa sahiptir [7]. Genel imalat sektöründe yaygın şekilde kullanılan, iyi kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerine sahip bir malzemedir [8]. Tavlanmış halde yaklaşık 170 HB sertliğe, 310–370 MPa akma dayanımına ve 570–700 MPa çekme dayanımına sahipken, su verilmiş ve temperlenmiş halde sertliği 200–300 HB aralığına yükselebilir [9]. 1045 çeliği ısıl işleme oldukça uygundur; su verme (martenzitik yapı kazandırma), temperleme (tokluk kazandırma), tavlama (yumuşatma ve işlenebilirliği artırma) ve indüksiyonla yüzey sertleştirme gibi işlemler uygulanabilir [9]. Ucuz ve yaygın bulunabilirliği, ısıl işlemle kolayca ayarlanabilen mekanik özellikleri, iyi işlenebilirliği ve yeterli dayanım sağlaması avantajlarıdır [7,8]. Ancak, galvaniz kaplama nedeniyle yüzeyde bulunan çinko, kaynak sırasında buharlaşarak kaynak dikişinde porozite, çatlak ve diğer kusurların oluşmasına sebep olabilmektedir [10]. Bu nedenle, kaynak öncesi yüzey hazırlığı, kaynak parametrelerinin optimizasyonu ve uygun ısıl işlem süreçlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır [10]. Ayrıca, yüksek karbon oranı nedeniyle kaynak yapılacaksa ön ısıtma ve sonrasında yavaş soğutma gerekebilir; Hardox gibi özel aşınma çeliklerine göre daha düşük aşınma direncine sahiptir ve yüksek sertlik istendiğinde gevrekleşebilme riski nedeniyle dikkatli temperleme ihtiyacı bulunur [7,10].

MAG yönteminde tipik olarak %100 CO_2 koruyucu gaz, otomatik beslenen çelik kaynak teli, doğru akım (DC) ve elektrot pozitif kutuplu bağlantı kullanılır. Akım aralığı 100–300 A, gerilim aralığı 18–30 V ve tel çapı 0.8 mm – 1.2 mm arasında değişir [11]. Uygulama alanları yapısal çelik imalatı, otomotiv parça üretimi, basınçlı kaplar, tarım makineleri ve ağır makine şaseleridir [11]. Ancak farklı karbon içeriğine sahip metallerin kaynağında, ısı tesiri altındaki bölgede (HAZ) meydana gelen faz dönüşümleri ve sertlik gradyanları, kaynak kalitesini doğrudan etkilemektedir [12]. Bu nedenle, kaynak işlemi sonrasında uygulanan ısıl işlemlerle bu etkilerin kontrol altına alınması mümkündür [12]. Isıl işlemle, hem kaynak bölgesindeki gerilmelerin azaltılması hem de daha homojen bir mikroyapının elde edilmesi hedeflenmektedir [12].

Meriç ve arkadaşları (2008): Sürtünme kaynağıyla birleştirilen yüksek alaşımlı çeliklerin kaynak bölgesini incelenmiştir. SEM ve EDS analizleriyle kaynak hattındaki yapı ve faz geçişleri değerlendirilmiş, mekanik özelliklerin hangi bölgede zayıfladığı belirlenmiştir. Malzeme eşleşmesi ve kaynak parametreleri önerilmiştir [13]**.** Beköz ve Yıldırım (2010): Hardox 400 ve Hardox 450 çeliklerini MAG yöntemiyle birleştirmiş ve karşılaştırmalı olarak kaynak edilebilirlikleri analiz etmişlerdir. Her iki malzemenin kaynak bölgesinde oluşan yapılar incelenmiş, SG3 telin özellikle Hardox 450 ile daha iyi performans verdiği gösterilmiştir [14]. Teker ve Gençdoğan (2020)**:** Hardox 450 ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliği çift taraflı TIG kaynağıyla birleştirilmiş ve kaynak bölgesindeki faz dönüşümleri, Cr_7C_3, Cr_3Ni_3 ve martensit oluşumları detaylı olarak analiz edilmiştir. SEM, EDS ve EBSD yöntemleri kullanılarak kaynak bölgesindeki difüzyon mekanizmaları açıklanmıştır [15]**.** Ayyıldız (2022)**:** Robotik gazaltı ark kaynağı ile Hardox 450 ve S355J2 çelikleri birleştirilmiştir. Kaynak hızı ve ısı girdisinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sertlik artışı ve tane büyümesi gibi değişimler detaylandırılmış, kaynak bölgesinin homojenliği açısından uygun parametreler önerilmiştir [16]. Özturan (2022)**:** Hardox 450 ve S355J2C+N çelikleri gazaltı ark kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada kaynak dikişlerinin mikro yapısı, sertlik profili ve çekme dayanımı ölçülmüştür. Kaynak bölgesinde ~249 HV sertlik elde edilirken, Hardox tarafında 311 HV ölçülmüştür. En yüksek çekme dayanımı ise 899 MPa olarak tespit edilmiştir [17].

Bu çalışmada, söz konusu iki çelik türünün Metal Aktif Gaz (MAG) kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi ve kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemlerin kaynak bölgesine olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. Malzeme and Yöntem

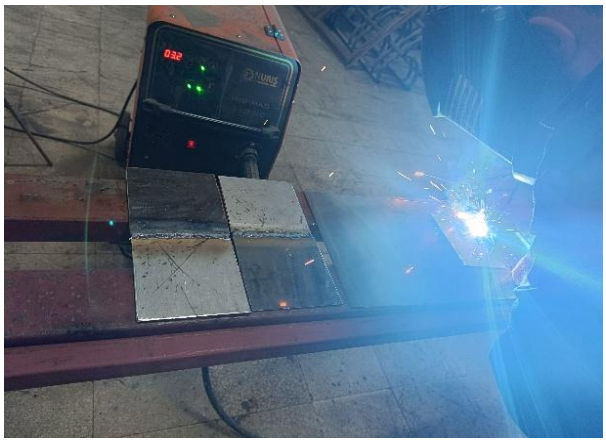
Bu çalışmada**,** yüksek aşınma direncine sahip Hardox 400 çeliği ile orta karbon içeriğine sahip, galvanizli 1045 çeliği kullanılmıştır. Tablo 1'de Hardox400 ve 1045 çeliklerinin içerik tablosu verilmiştir.

Tablo 1. Hardox400 ve 1045 Çeliklerinin İçerik Tablosu

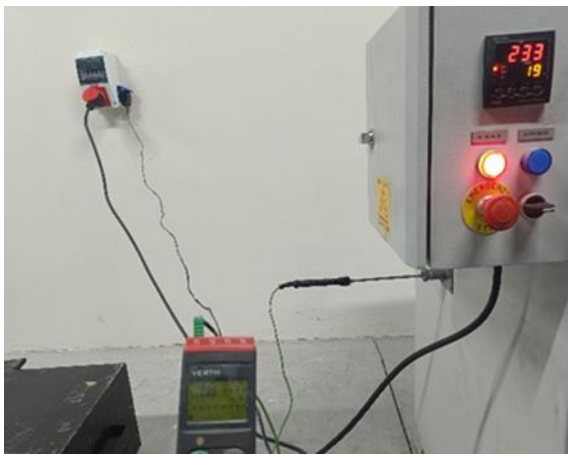
Element (wt.%)	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	B	Fe
Hardox 400	0.12 – 0.18	1.30 – 1.60	0.25 – 0.45	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.60	≤ 0.025	≤ 0.010	≤ 0.005	Kalan
1045	0.43 – 0.50	0.60 – 0.90	0.10 – 0.35					≤ 0.050		Kalan

Her iki malzeme de, kaynak sonrası mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi amacıyla**,** 100 mm x 100 mm boyutlarında **ve** 2 mm kalınlığında levha formunda hazırlanmıştır. Malzeme seçiminde, farklı mekanik özelliklere sahip çeliklerin birleştirilmesiyle elde edilen kaynak bölgesindeki yapısal farklılıkların ve ısıl işlem sonrası dönüşümlerin detaylı olarak analiz edilebilmesi hedeflenmiştir. Çelik levhalar, Metal Aktif Gaz (MAG) kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işleminde koruyucu gaz olarak %100 karbondioksit (CO_2) tercih edilmiştir. Kaynak teli olarak Ø1 mm çapında çelik kaynak teli kullanılmış olup tel ilerleme hızı 5 cm/sn olarak ayarlanmıştır. Kaynak sırasında torç açısı 70°, kaynak gerilimi 22 V, akım şiddeti 100 A olarak belirlenmiştir. Levhalar arasında 1 mm bindirme ile sabitleme yapılmış ve kaynak işlemi çift paso olarak uygulanmıştır. Kaynak işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan ekipman Şekil 1'de görülmektedir. Deney sırasında, Hardox 400 ve 1045 çelikleri arasındaki birleştirme işlemi, MAG kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve bu işleme ait görsel Şekil 2'de sunulmuştur. Kaynak işlemi sonrasında elde edilen numuneler, belirli sıcaklık koşullarında fırında ısı işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada kullanılan ısı işlem fırını Şekil 3'te verilmiş olup, fırında 950 °C sıcaklıkta 60 dakika bekletilen numunelerin soğutulmadan önceki durumu Şekil 4'te gösterilmiştir. Isıl işlem sonrası bazı numuneler metalografik inceleme için mikroyapı analizine hazırlanmış ve bu kapsamda yapılan kesme işlemi sırasında kaydedilen görsel Şekil 5'te yer almaktadır. Bu işlemler sayesinde, kaynak bölgesindeki mikro yapısal dönüşümler detaylı biçimde analiz edilmiştir.Kaynak işleminin ardından, elde edilen numunelere farklı soğutma ortamlarında ısıl işlem uygulanmıştır. Numuneler, 950°C sıcaklığa fırında ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 60 dakika süreyle bekletilmiştir**.** Isıtma sonrası numuneler üç farklı soğutma ortamına tabi tutulmuştur.

Şekil 1. Kaynak makinesi

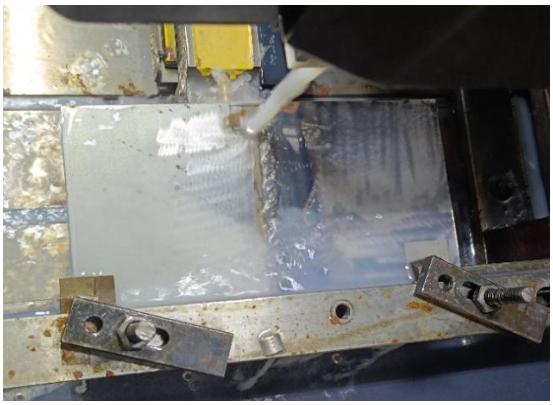


Şekil 2. Malzemelerin Kaynağı



Şekil 3: Numunelerin Isıl İşlem Gördüğü Fırın Görüntüsü

Şekil 4: Fırında Soğutulan Numunelerin



Şekil 5: Mikroyapı Numune Çıkarım Esnasında Çekilen Görüntü

Bu çalışmada, Hardox 400 çeliği ile galvanizli 1045 çeliğinin MAG kaynak yöntemiyle birleştirilmesinden sonra oluşan mikroyapı ve mekanik özellikler detaylı olarak incelenmiştir. Öncelikle numuneler mikroskobik analizlere uygun hale getirilmiş; kesme, zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilerek uygun reaktiflerle dağlanmıştır. Dağlanmış numuneler ışık

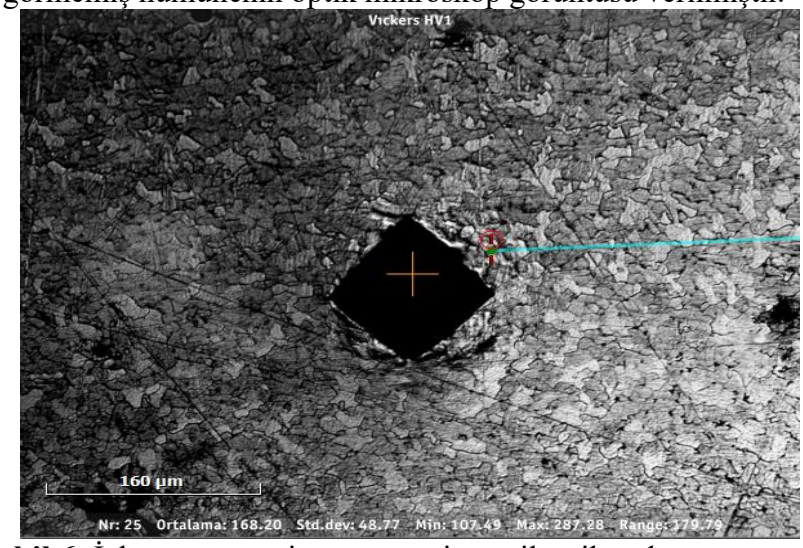
mikroskobu altında incelenmiştir. Bu incelemeler, martensitik yapı oluşumu, tane büyümesi ve faz dönüşümleri gibi mikro yapısal değişimleri ortaya koyarak farklı çelik türleri arasındaki metalürjik uyum hakkında önemli bilgiler sunmuştur. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla çekme ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ile numunelerin akma dayanımı, kopma mukavemeti ve uzama yüzdesi gibi temel özellikleri ölçülmüş; böylece kaynak bölgesinin yapısal dayanımı doğrudan değerlendirilmiştir. Sertlik ölçümleri, Vickers yöntemiyle kaynak dikişi, HAZ ve ana malzeme üzerinde yapılmış ve ısı girdisinin bölgesel etkileri belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapı Sonuçları

3.1.1 işlem Görmemiş Numune

Şekil 6'da işlem görmemiş numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.

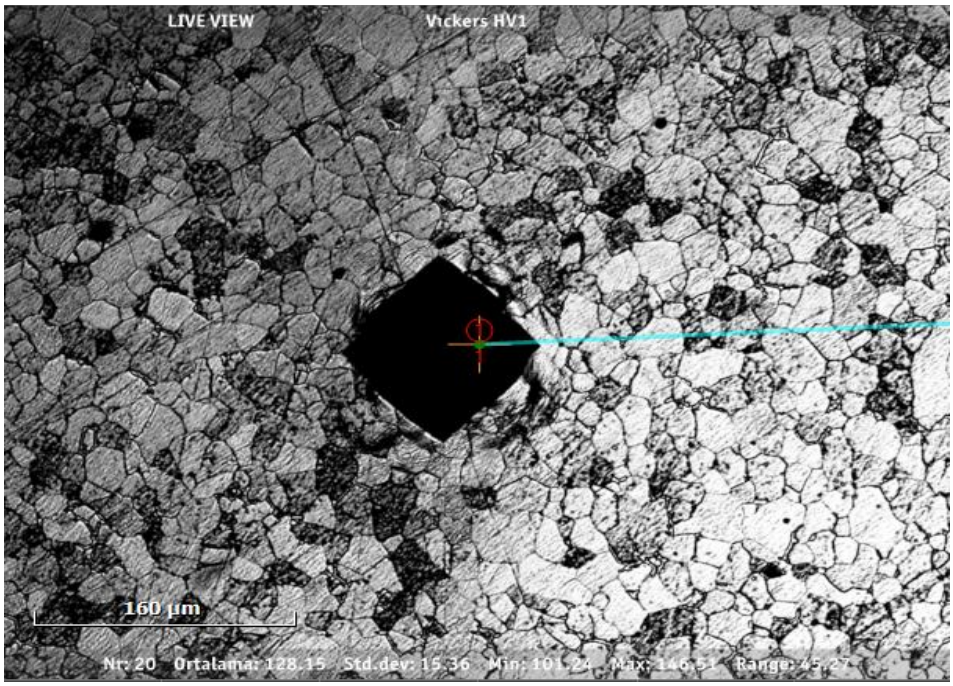


Şekil 6. İşlem görmemiş numunenin optik mikroskop görüntüsü

Bu yapı, üretim sırasında dış müdahale olmadan çevre sıcaklığında soğutulmuş bir çeliğe aittir. Herhangi bir ısıl işlem uygulanmadığı için karbon atomları difüzyonla yeterli süre bulmuş, bu da ferrit ve perlitin doğal oranlarında ve dağınık şekilde oluşmasına neden olmuştur. Ferrit taneleri büyümeden önce difüzyon tamamlandığı için orta boyutta kalmıştır. Yapı yönsüz, düzensiz ve hafif heterojendir. Yapının yer yer perlitçe zengin (daha sert), yer yer ferritçe baskın (daha yumuşak) olduğunu ve homojenlikten uzak olduğunu göstermektedir. Bu yapı, havada soğutulmuş numuneye benzer sertlik düzeyinde olsa da, kontrolsüz soğuma nedeniyle mikroyapı farklılıkları daha belirgindir.

3.1.2 Fırında Soğutulan Numune

Şekil 7'de fırında soğutulan numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.

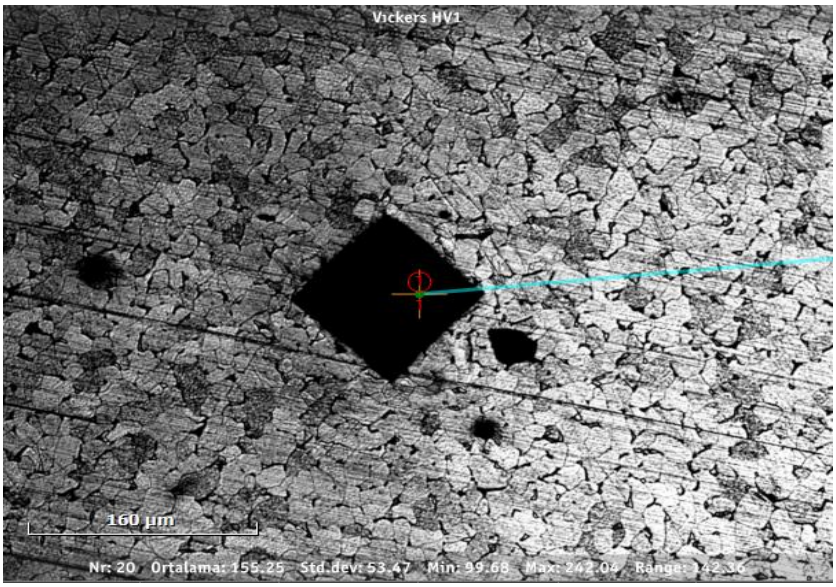


Şekil 7. Fırında soğutulan numunenin optik mikroskop görüntüsü

Görselde çok sayıda eş büyüklükte, belirgin sınırlarla ayrılmış tane yapısı görülmektedir. Bu taneler ferrit + perlit fazlarıdır. Açık gri alanlar: Ferrit (yumuşak ve sünek faz) daha koyu renkli alanlar ise Perlit (ferrit + sementit lamellerinden oluşan daha sert faz) fazıdır. Yapıda martenzit, bainit veya herhangi bir hızlı soğuma ürünü bulunmamakta, bu da yavaş soğumanın sonucudur. Fırında yavaş soğuma ile gerilimler giderilmiş, daha sünek ve işlenebilir bir yapı elde edilmiştir. Fırında yavaş soğutma sonucunda dönüşüm için yeterli zaman olduğu için dengeli mikroyapı gelişmiştir. Perlit lamelleri daha kalın ve ayrışmış şekildedir. Soğuma hızı düştükçe perlit lamel aralığı artar. Tane büyüklüğü nispeten daha fazladır (çünkü yüksek sıcaklıklarda uzun süre kalmak, tane büyümesine neden olmaktadır [19].

3.1.3 Havada Soğutulan Numune

Şekil 8'de havada soğutulan numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.

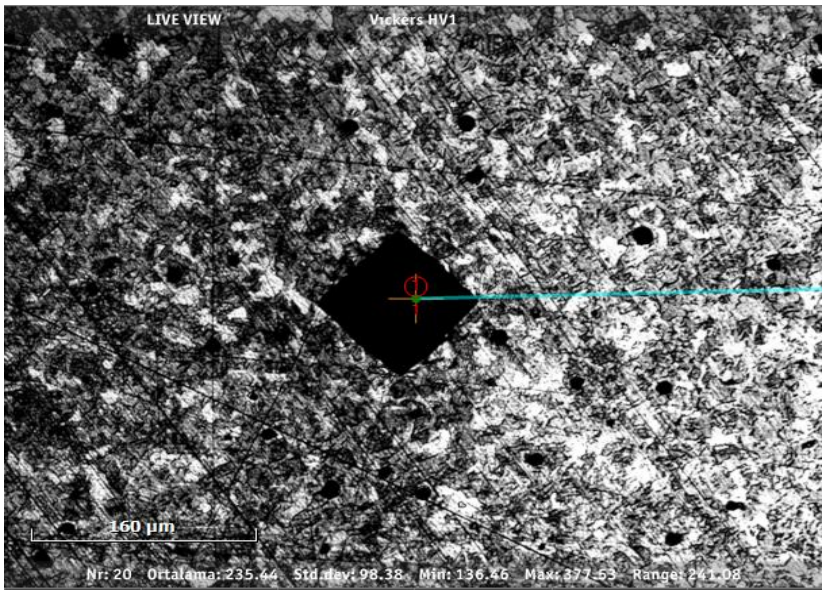


Şekil 8. Havada soğutulan numunenin optik mikroskop görüntüsü

Yapıda çok sayıda belirgin taneler görülmektedir; bu taneler daha küçük ve daha yoğun yerleşmiştir. Görüntüde hem ferrit (açık gri bölgeler) hem de perlit (koyu renkli alanlar) yer almakta, fakat perlit oranı fırında soğutulmuş yapıya göre daha fazladır. Hafif lamelli bir yapı gözlemlenmektedir, bu da daha ince yapılı perliti işaret eder (daha hızlı soğuma = daha ince lameller). Hava ortamında soğuma, fırına göre daha hızlı olduğundan, karbon atomları difüzyonla daha az zaman bulur, bu nedenle perlit oranı artar ve ferrit taneleri küçülür.

3.1.4 Suda Soğutulan Numune

Şekil 9'da havada soğutulan numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



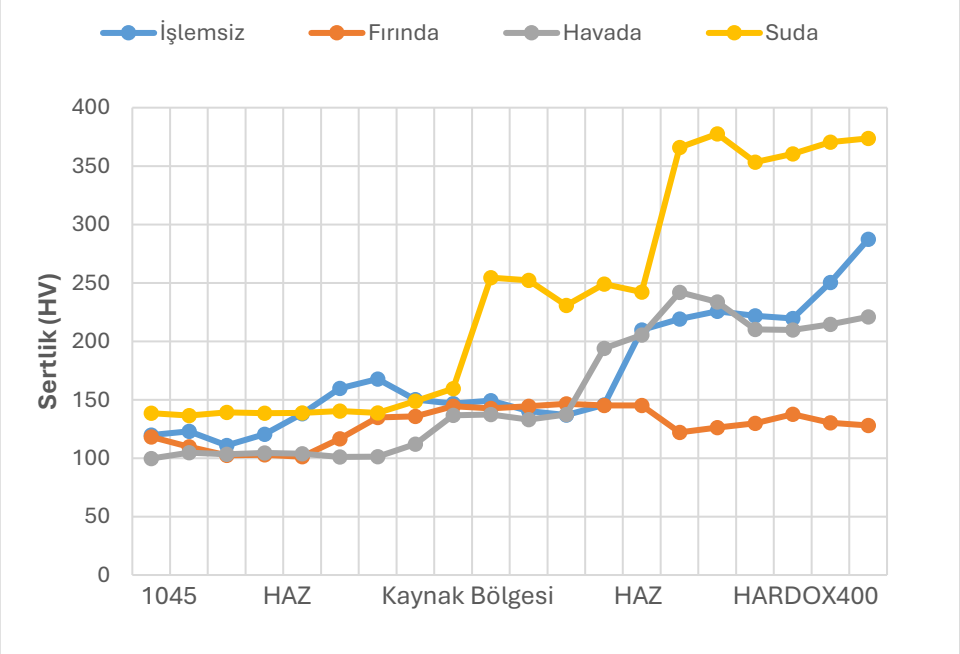
Şekil 9. Suda soğutulan numunenin optik mikroskop görüntüsü

Şekil 9'da havada soğutulan numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Görüntüde mikroyapı oldukça ince ve iğne (akupunktur iğnesi gibi) biçimli fazlardan oluşmaktadır. Bu yapı tipik olarak martenzit fazıdır. Martenzit, çok hızlı soğuma ile (örn. su banyosu) östenitin difüzyonsuz dönüşümüdür. Oldukça sert, kırılgan ve yoğun iç gerilime sahiptir.

Yapıda ayrıca: Daha koyu, iğne benzeri yapı: Martenzit Daha açık alanlar: Dönüşmemiş östenit ya da az miktarda ferrit olabilir. Mikro yapının homojen olmadığı, bazı bölgelerde farklı sertlik değerleri gösterdiği görülmektedir.

Su ile soğutma, çelikte en hızlı faz dönüşümünü tetikler. Austenit - Martenzit dönüşümüyle sonuçlanır. Bu yapı en yüksek sertlik değerini verir. Ancak hızlı soğuma iç gerilimler, çatlak oluşumu ve kırılganlık riskini de artırır. Suda soğutma ile çelikte sert, kırılgan, iğne yapılı martenzitik bir mikro yapı oluşmuştur. Bu yapı yüksek aşınma direnci sağlar ancak şekillendirilebilme özelliği düşüktür. Genellikle sertlik istenen uygulamalarda kullanılır. İç gerilimlerin giderilmesi için temperleme (tavlama) gibi işlemler uygulanabilir.

3.2 Mekanik Test Sonuçları
3.2.1 Sertlik Sonuçları
Şekil 10'da sertlik sonuçları verilmiştir.



Şekil 10. Vickers sertlik grafiği

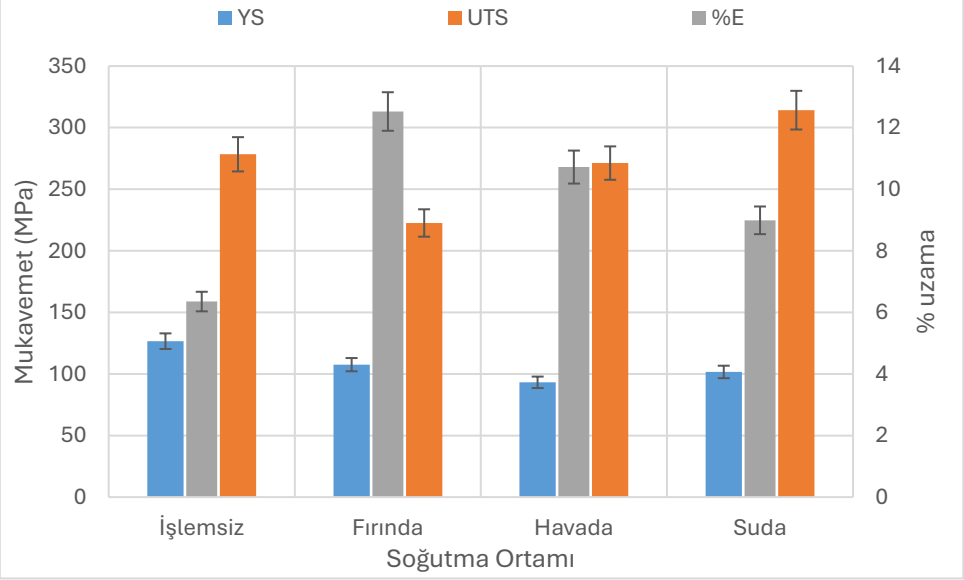
Farklı konumlardan alınan sertlik ölçümleri, soğutma yönteminin malzeme iç yapısındaki değişimlere doğrudan etki ettiğini göstermiştir. Ortalama sertlik değerleri işlemsiz numune için ortalama 172 HV, fırında soğutulan numune için ortalama 128 HV, havada soğutulan numune için ortalama 155 HV ve suda soğutulan numune için ortalama 235 HV dir. En yüksek sertlik değeri, doğal olarak hızlı soğutulan ve işlemsiz numunede gözlenmiştir. Bu yapı, martenzitik faz oluşumuna benzer şekilde daha sert ama gevrek bir yapı oluşturur. Fırın

ortamında yavaş soğuma ile elde edilen düşük sertlik değeri, daha büyük ve kaba ferrit-perlik yapının oluştuğunu göstermektedir. Bu yumuşaklık, aynı zamanda sünekliğin artmasını da desteklemiştir.

İşlem görmemiş çelik numune, hem ferrit hem de perlit fazlarını içeren klasik bir ferrit-perlit mikroyapı sergilemektedir. Sertlik bakımından orta seviyede bir değer sunarken, yönsüz ve düzensiz tane yapısı nedeniyle mekanik özellikler bölgeler arasında değişkenlik gösterebilir. Bu tür yapılar genellikle ön işlem görmemiş, soğuk şekillendirme veya talaşlı imalat öncesi ham çeliklerdir. Fırında soğutulan numunenin ortalama Vickers sertliği 128 HV olarak ölçülmüştür. Bu değer, ferrit ağırlıklı, düşük sertlikte bir yapı olduğunu destekler. Sertlik düşük, süneklik yüksektir. Bu tip yapı, kaynak sonrası gerilim giderme işlemleri veya şekillendirme öncesi ısıl işlemler için uygundur. Havada soğutma, çeliğe orta derecede bir sertlik ve yeterli süneklik kazandırır. Yapı daha fazla perlit (ince) içerdiğinden, mekanik dayanım artar. Yine de çok sertleşmediği için şekillendirme işlemleri yapılabilir. Bu tür bir yapı genellikle normalize edilmiş çelik yapısına benzer. Suda soğutulan numunenin **o**rtalama sertlik: 235 HV dir ve bu değer, diğer numunelere kıyasla en yüksek sertlik seviyesidir.

3.2.2. Çekme Testi Sonuçları

Şekil 11'de farklı ortamlarda soğutulan numunelerin çekme testi sonuçları verilmiştir.



Şekil 11. Farklı ortamlarda soğutulan numunelerin çekme testi sonuçları

Bu çalışmada, MAG kaynağı ile birleştirilen Hardox 400 ve galvanizli 1045 çeliklerinin, kaynak sonrası farklı soğutma koşullarına tabi tutulmasının mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen veriler; çekme dayanımı (UTS), akma dayanımı (YS), kopma uzaması (%E) ve sertlik ölçümleri çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Numunelere uygulanan çekme testleri sonucunda, en yüksek çekme dayanımı 314 MPa ile suda soğutulan numunelerde gözlenmiştir. Bu durum, hızlı soğutma sayesinde yapıda martenzitik faz oluşumunun yoğunlaşmasına bağlanabilir. İşlemsiz numunelerde ise çekme dayanımı 278 MPa seviyesinde ölçülmüştür. Bu değer, kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmamasına rağmen yüksek bir dayanım elde edilebileceğini göstermektedir. Ancak bu

tür bir yapı genellikle daha gevrektir ve süneklik açısından zayıf kalır. Havada soğutulan numunelerde çekme dayanımı 271 MPa, fırında soğutulan numunelerde ise 222 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler, kontrollü soğuma ile elde edilen daha ferritik/perlitik yapının dayanımı düşürdüğünü, fakat daha sünek bir yapı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle fırın soğutmasıyla elde edilen düşük dayanım, uzun süreli ve yavaş soğumanın kristal yapıyı daha fazla rahatlatması ile ilişkilendirilebilir. Akma dayanımı (YS) değerleri de benzer şekilde soğutma yöntemlerine duyarlı olarak değişmiştir. İşlemsiz numuneler en yüksek YS değerini (126 MPa) gösterirken, havada soğutulan numuneler en düşük değere (93 MPa) sahiptir. Bu sonuç, kaynak sonrası doğal sertlik durumunun korunduğu yapıların daha yüksek elastik direnç sergilediğini göstermektedir.

Kopma uzaması değerleri açısından değerlendirildiğinde, en yüksek süneklik %19,5 ile fırında soğutulan numunelerde elde edilmiştir. Bu bulgu, yavaş soğumanın daha homojen ve sünek mikroyapılar oluşturduğunu destekler niteliktedir. Havada soğutulan numunelerde %17,5 , suda soğutulan numunelerde ise %14,2 uzama değerleri gözlenmiştir. Soğutma hızı arttıkça süneklik azalmış, ancak mukavemet artmıştır.İşlemsiz numunelerde %16,3 ile en düşük uzama değeri kaydedilmiştir. Bu durum, kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmayan numunelerin sert fakat kırılgan bir yapı oluşturduğunu ve bu nedenle plastik deformasyona karşı direnç gösteremediğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen tüm veriler, mekanik özelliklerin yalnızca kaynak kalitesine değil, aynı zamanda kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemin türüne ve soğutma hızına bağlı olarak büyük oranda değiştiğini göstermektedir.

Genel olarak:

- Su verme, yüksek mukavemet sağlar; ancak sünekliği sınırlar.
- Fırın soğutması, düşük dayanım ancak yüksek süneklik sunar
- Hava soğutması, dengeli özellikler sağlar. İşlemsiz numuneler, sertlik ve dayanım bakımından iyi sonuçlar verirken, süneklik açısından sınırlı kalır.

Bu sonuçlar, uygulama amacına göre uygun bir ısıl işlem ve soğutma stratejisinin seçilmesinin önemini vurgulamaktadır.

4. Genel sonuçlar

Bu çalışmada, yüksek aşınma direncine sahip Hardox 400 çeliği ile galvanizli 1045 çeliğinin MAG kaynağıyla birleştirilmesi sonrasında uygulanan farklı soğutma yöntemlerinin (su, hava, fırın ve işlemsiz) mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler ve yapılan değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki genel bulgulara ulaşılmıştır:

Soğutma yöntemi, kaynaklı birleşimlerin mekanik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle çekme dayanımı, süneklik ve sertlik gibi temel özellikler soğutma hızına doğrudan bağlı olarak değişmiştir.

Suda hızlı soğutulan numuneler, en yüksek çekme dayanımını göstermiştir. Bu durum, martenzitik yapının oluşumu ile açıklanabilir. Ancak bu yapı, süneklik açısından sınırlı bir performans sergilemiştir.

Fırın ortamında yavaş soğutma uygulanan numunelerde, çekme dayanımı düşük olmasına rağmen süneklik önemli ölçüde artmıştır. Bu yapı, ferrit ve perlit fazlarının hakimiyetinde daha yumuşak ve şekillenebilir bir davranış ortaya koymuştur.

Havada doğal soğutulan numuneler, dayanım ve süneklik açısından dengeli bir sonuç vermiştir. Bu yöntem, mekanik özelliklerin ortalama düzeyde tutulması gereken uygulamalarda tercih edilebilir.

Isıl işlem uygulanmamış (işlemsiz) kaynaklı numuneler, yüksek sertlik ve kabul edilebilir düzeyde çekme dayanımı sunmuş olsa da, en düşük sünekliği göstermiştir. Bu da bu tür yapıların çatlama veya kırılma riskine daha açık olduğunu göstermektedir.

Sertlik ölçümleri, soğutma yöntemine bağlı olarak mikroyapıdaki dönüşümle paralellik göstermiştir. Hızlı soğutulan numunelerde daha yüksek sertlik, yavaş soğutulan numunelerde ise daha düşük değerler elde edilmiştir.

KAYNAKÇA

[1]SSAB, "Hardox 400 Product Data Sheet."
[2] SSAB, "Hardox 400 Datasheet – Technical Description."
[3] Tiryakioğlu, M. (2015). Aşınmaya Dayanıklı Çelikler. Metalurji Dergisi.
[4] Demir, H. (2014). Malzeme Bilgisi, Nobel Yayınları.
[5] Kaya, Y. (2019). Kaynak Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık.
[6] Yalçın, H. (2020). İşleme Teknolojileri, Nobel Akademik Yayıncılık.
[7] Smith, W.F. & Hashemi, J. (2010). Foundations of Materials Science and Engineering. McGraw-Hill.
[8] Çelik, A. (2018). Mühendislik Malzemeleri ve Uygulamaları. Birsen Yayınevi.
[9] Kalpakjian, S. & Schmid, S.R. (2014). Manufacturing Engineering and Technology. Pearson.
[10] Özer, M. (2021). Galvanizli Malzemelerin Kaynağında Karşılaşılan Sorunlar. Kaynak Teknolojisi Dergisi.
[11] Arısoy, M. & Yıldız, M. (2016). Galvanizli Sacların Kaynağında Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Önerileri.
[12] Lincoln Electric. (2013). Welding Handbook: GMAW – MAG/MIG Welding.
[13] Kou, S. (2003). Welding Metallurgy. Wiley-Interscience.
[14] Meriç, C., Köksal, S., Okur, F. (2008). Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilen Yüksek Alaşımlı Çeliklerin Mikro Yapı İncelemesi. Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi.
[15] Beköz, S., Yıldırım, B. (2010). Hardox Çeliklerinin MAG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi. Metalurji Dergisi.
[16] Teker, T., Gençdoğan, E. (2020). Farklı Çeliklerin TIG Kaynağı Sonrası Mikro Yapı Analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi.
[17] Ayyıldız, M. (2022). Robotik Gazaltı Kaynağıyla Yapılan Çelik Birleştirmelerinde Mikroyapı ve Sertlik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
[18] Özturan, A. (2022). Hardox 450 ve S355J2C+N Çeliklerinin Gazaltı Kaynağıyla Birleştirilmesi Üzerine Deneysel Bir Araştırma. Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
[19] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials Science and Engineering: An Introduction (9th ed.). Wiley.

Alüminyum 1000 Serisi Plakalarla Hazırlanan Kompozit Yapıların Katman Sayısına Göre Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

HALİL İBRAHİM KURT [1], MEHAMAT MOUSSA TAHER HAMADA[1], İBRAHİM YILMAZ [1], AYŞENUR YAYLA[1]

[1]Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi SAMSUN, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı, bazalt kumaş lifleri ile takviye edilmiş alüminyum matris esaslı kompozit malzemelerin üretilmesi ve takviye katman sayısındaki değişimin elde edilen kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Mekanik performansın değerlendirilmesi amacıyla üç noktalı eğme testleri ve darbe dayanımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Maksimum eğilme dayanımı 3 katmanlı numunede elde edilirken maksimum deformasyon oranı 7 katmanlı numunede elde edilmiştir. Katman sayısındaki artış kompozitlerin darbe dayanımını artırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Bazalt Kumaş, Üç Nokta Eğme Testi, Darbe Testi.

1. Giriş

Son yıllarda, kompozit malzemeler birden fazla bileşenin avantajlı özelliklerini bir araya getirme yetenekleri sayesinde, önemli bir mühendislik malzeme sınıfı olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Metal matrisli kompozitler arasında, alüminyum esaslı sistemler; düşük yoğunlukları, yüksek korozyon dirençleri ve üstün işlenebilirlikleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu kategori içerisinde, yüksek saflığı ve mükemmel şekillendirilebilirliği ile bilinen 1000 serisi alüminyum, katmanlı kompozit yapılar için son derece uygun bir matris malzemesi olarak öne çıkmaktadır [1].

Bazalt fiber kumaş gibi yüksek performanslı takviye malzemelerinin alüminyum matrislerle birleştirilmesi, bu kompozitlerin mekanik özelliklerini daha da geliştirmekte; mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımı gibi özelliklerde önemli avantajlar sağlamaktadır. Doğal volkanik kayalardan elde edilen bazalt lifleri, termal kararlılık, kimyasal direnç ve çevre dostu yapıları sayesinde sentetik liflere kıyasla belirgin avantajlar sunmaktadır [2]. Metalik ve lifli katmanların ardışık şekilde düzenlenmesiyle oluşturulan kompozit yapılar, katman sayısı ve düzenine büyük ölçüde bağlı olarak karmaşık bir mekanik davranış sergiler. Katman sayısındaki artış; yük dağılımı, enerji sönümleme kapasitesi ve genel yapısal bütünlükte önemli iyileşmelere yol açabilir [3]. Uzun ve Arslan (2024), farklı aspect ratio'daki bazalt fiberler, kendi kendini sıkışan beton içerisine eklenerek eğilme ve bölgesel çekme mukavemeti test etmişlerdir. Fiber oranı arttıkça eğilme ve çekme dayanımı artmış, ancak yüksek aspect ratio bazalt fiber dağılımında agregasyon oluşturduğu için basınç dayanımı azalmıştır. Bu da bazalt fiberin hem mekanik faydasını hem geometrik dağılımın önemini ortaya koymaktadır [4]. **Karaçor ve** Özcanlı (2023), Bazalt-el cam-

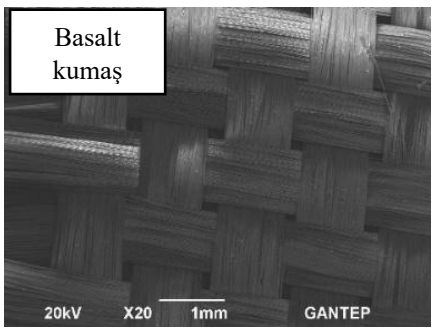
jüt hibrit kompozitler farklı matriks malzemeleri ile hazırlanmış, mekanik performansları analiz etmişler. Bazalt fiber içeren gruplarda, özellikle eğilme ve darbe dayanımı daha yüksek; çünkü bazalt liflerinin arayüzeyde daha güçlü bağlanması ve enerji emilim kabiliyeti diğer doğal liflere göre daha etkili olduğunu beyan ettiler [5]. **Erdoğan** (2022), Basalt + jüt + karbon lifli hibrit epoksi kompozitler, mekanik testlere tabi tuttular. Bazalt içeren karışımlarda, düşük hız çarpma testlerinde enerji absorpsiyonu ve eğilme dayanımı anlamlı şekilde arttığını gördüler. Bu etki, bazalt liflerinin yüksek elastiklik modülü ve iyi fiber–matris etkileşimi sayesinde gerçekleşmiştir [6]. Bazalt fiberin kompozit sistemlere katılımı, özellikle eğilme, esneme ve darbe dayanımı gibi mekanik performans kriterleri açısından genellikle olumlu etkiler göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmalar, bazalt liflerin yüksek elastiklik modülü ve iyi ara yüzey bağlanma kabiliyeti sayesinde, kompozitlerin yük taşıma kapasitesini ve enerji sönümleme özelliklerini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, fiberlerin dağılımı ve geometrik özellikleri de performans üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Özellikle yüksek yoğunlukta veya uzun boy/çap oranına sahip bazalt fiberlerin matriks içinde homojen dağılmaması, agregasyon sorunlarına yol açmakta ve bu durum özellikle basınç dayanımında istenmeyen düşüşlere neden olabilmektedir. Öte yandan, bazalt fiberin cam veya karbon gibi diğer liflerle birlikte kullanıldığı hibrit yapılarda, sinerjik bir mekanik iyileşme gözlemlenmiştir. Bu tür hibrit sistemlerde, bazalt liflerinin enerji absorpsiyonu kapasitesi ve ara yüzey bağ gücü katkısı sayesinde, toplam yapısal dayanıklılığın daha da arttığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, bazalt fiberin yalnız başına veya hibrit kombinasyonlar içinde kullanıldığında, kompozit malzemelerin mekanik performansını optimize etmede önemli bir rol oynadığını göstermektedir [7].

Bu çalışma, 1000 serisi alüminyum levhalar ve bazalt kumaş takviyesi kullanılarak üretilen katmanlı kompozit yapıların imalatı ve mekanik karakterizasyonuna odaklanmaktadır. Çalışmanın temel amacı, katman sayısının kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu doğrultuda, üç noktalı eğme ve darbe dayanımı testleri uygulanmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada matris fazı olarak, ≥%99,7 saflıkta ticari olarak temin edilen 1000 serisi alüminyum levhalar (Şekil 1a, kalınlık: 1 mm) kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise, düz dokuma yapısına sahip, alan ağırlığı 200 g/m² olan bazalt kumaş (Şekil 1b) tercih edilmiştir. Sistem, reçine (Resin Norm A Component) ve epoksi (Resin Norm B Component) bileşenlerinden oluşan iki bileşenli bir epoksi reçine sisteminden oluşmaktadır. Tablo 1'de alüminyumun mekanik özellikleri ve Tablo 2'de alüminyumun kompozisyonu verilmiştir.



a b

Şekil 1. a) Alüminyum levha ve b) Basalt kumaş

Tablo 1. Ticari alüminyum 99.7% mekanik özellikleri

Özellikler	Değerler
Kesme Gücü	44 – 97 MPa
Çekme Dayanımı: Nihai (UTS)	68 – 170 MPa
Çekme Dayanımı: Akma (Kanıt)	22 – 150 MPa
Brinell Sertliği	20 – 45

T

Al	Fe	Si	Cu	Ga	Mg	Zn	Diğerler	Diğer
Kalan	0.2	0.12	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.003

Yüzey yapışa bilirliği ve pürüzlülüğü artırmak amacıyla, kimyasal temizlik sonrası yüzeylere hafif mekanik zımparalama işlemi uygulanmıştır. Alüminyum levha yüzeylerindeki yağ ve oksit tabakalarının giderilmesi amacıyla, zımparalama devamında etil alkol ile temizlik uygulanmış; ardından yüzeyler saf su ile durulanarak nötrleştirilmiştir. Temizlenen alüminyum yüzeylere ve bazalt kumaşa, epoksi reçinesi/ sertleştirici karışımı (Şekil 2) fırça kullanılarak ince ve homojen bir tabaka halinde uygulanmıştır. Havanın içeride hapsolmasını önlemek amacıyla yüzeylerin tamamen ve eşit şekilde kaplanmasına özen gösterilmiştir. Katmanlar, hedeflenen tasarıma bağlı olarak sırayla yerleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin optimize edilmesi amacıyla, bazalt kumaşın lif yönü yükleme koşullarına göre aynı yönde olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan numuneler, reçine sistemine uygun olarak soğuk pres cihazına yerleştirilmiş ve oda sıcaklığında 72 saat boyunca sıkıştırılmış halde bekletilerek kürleme işlemi gerçekleştirilmiştir [8].

Kürlenme işlemi tamamlanan kompozit paneller, mekanik testler için standart boyutlarda numunelere kesilmiştir. Darbe testi için 55 mm × 10 mm boyutlarında, eğme testi için ise 150 mm × 25 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Darbe testi (Şekil 3) sırasında numune, test cihazının tabanına dikey olarak yerleştirilmiş ve ortamın serbest hareketini engellemeyecek şekilde kenarlarından sabitlenmiştir. Belirli bir yükseklikten serbest bırakılan ağırlık, numunenin merkezine düşecek şekilde yönlendirilmiştir. Üç nokta eğme testi, üniversal test makinesi (UTM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler iki sabit destek üzerine yatay şekilde yerleştirilmiş ve yük ortadan uygulanmıştır. Test sırasında etkiyen kuvvet (N) ve buna karşılık gelen deformasyon değerleri kaydedilmiştir [9].

Şekil 2. Karıştırma cihazı

Şekil 3. Darbe Cihazı

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 4'de eğme testi sonuçları verilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen eğilme testi sonuçları, kompozit malzemelerin eğilme direnci ile katman sayısı arasında doğrusal bir artış eğilimi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu gözlem, özellikle katman sayısındaki artışın malzemenin toplam kalınlığını artırmasıyla açıklanabilir [10]. Katman sayısının artması, bileşik yapının kesit geometrisini değiştirerek, eğilme yüklerine karşı direncin belirgin şekilde artmasına neden olmaktadır. Bilindiği üzere, bir yapısal elemanın eğilme direnci, kesit atalet momenti ile doğrudan ilişkilidir.

Düz dikdörtgen kesitler için bu değer;

$$Z = (B.H)^2/6$$

Burada Z kesit modülü (mm), B, numune genişliği ve H, numune kalınlığını ifade etmektedir. Bu ifade, yapı kalınlığında meydana gelen küçük değişimlerin bile eğilme dayanımında büyük farklılıklar yaratabileceğini göstermektedir [11].

Eğme momenti ve Eğilme dayanımı;

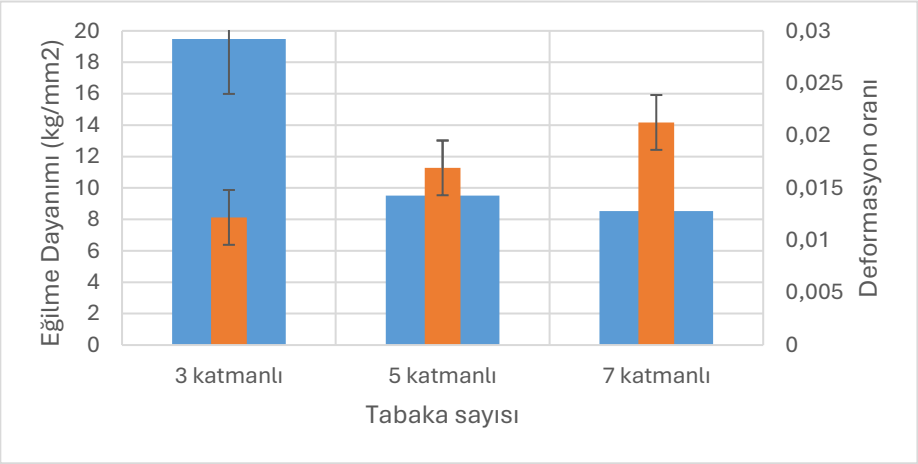
$$Me = P.L/4 \text{ ve } \sigma e = Me/Z = Pmax.L/4.Z$$

Burada; Me, eğme momenti (kg-mm), P, Uygulanan kuvveti (kg), L, mesnetler arası uzaklığı (mm) ve Pmax, uygulanan maksimum kuvveti (kg), ifade etmektedir.
Bu bağlamda, katman sayısındaki artış (Şekil 4), hem toplam kalınlığı artırarak atalet momentini yükseltmekte, hem de yapının enerji sönümleme ve yük taşıma kapasitesini iyileştirmektedir. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar, katman sayısındaki artışın, kompozit malzemenin eğilme direnci üzerinde doğrudan ve olumlu bir etki yarattığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Şekil 5'de eğilme dayanımı deformasyon oranı ilişkisi verilmektedir.

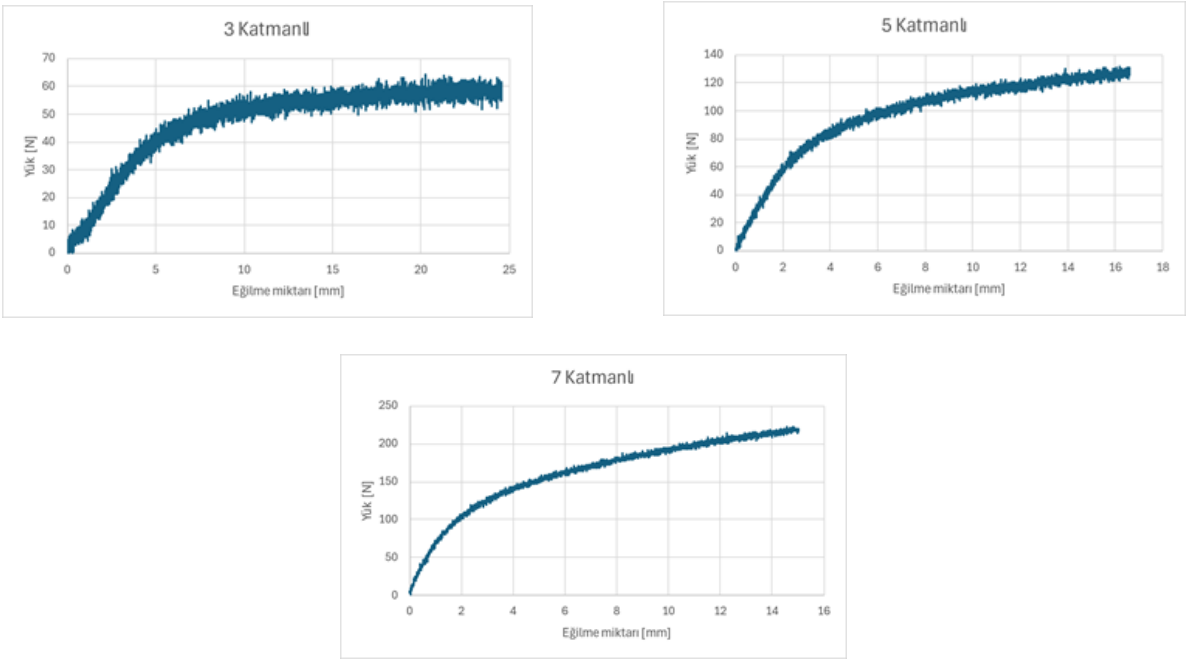
$$\varepsilon = 6.Y.H/L2$$

Burada ε, deformasyon oranını, Y, eğilme miktarını göstermektedir.

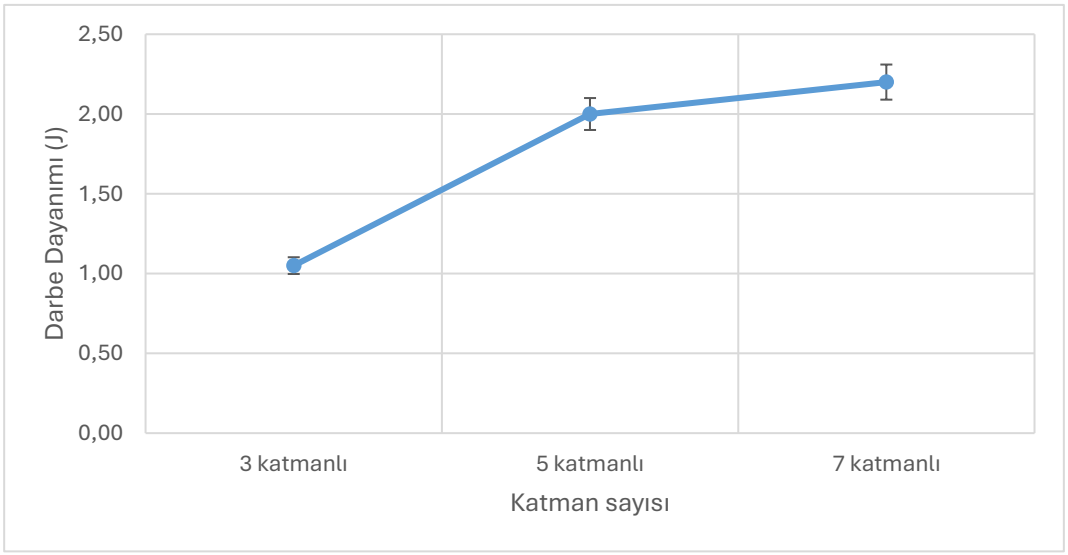
Eğilme miktarına bağlı olarak deformasyon oranı değişmektedir [12]. Şekil 6'da eğilme sonrası numunelerin deformasyon makroskobik görüntüleri verilmiştir. Eğilme dayanımı ile deformasyon oranının ters orantılı olduğu açıkça



görülmektedir. Maksimum eğilme dayanımı 3 katmanlı numunede elde edilirken maksimum deformasyon oranı 7 katmanlı numunede görülmüştür [13].



Şekil 4. Katman sayısına göre eğme testi sonuçları

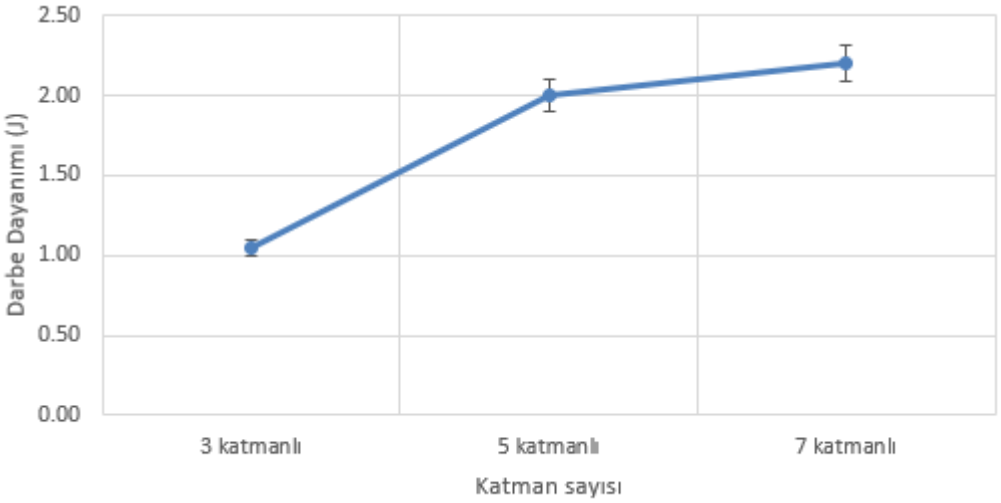


Şekil 5. Katman sayısına göre eğilme dayanımları-deformasyon oranları

Şekil 6. Eğme makroskobik görüntüsü

Darbe testi sonuçları incelendiğinde (Şekil 7), en yüksek darbe dayanımının 7 katmanlı kompozit numunede elde edildiği görülmüştür. Katman sayısındaki artış ile birlikte, kompozit yapıların darbe dayanımında belirgin ve yaklaşık lineer bir artış gözlenmiştir. Bu artış eğilimi, çok katmanlı yapıların darbe enerjisini absorbe etme ve dağıtma kapasitelerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır [14].

Hasar analizi kapsamında yapılan makroskobik ve mikroskobik incelemelerde, 7 katmanlı numunelerde yüzeyde oluşan delaminasyonun, daha az katmanlı numunelere kıyasla oldukça yoğun olduğu tespit edilmiştir. Bu delaminasyon davranışı, kompozit malzemenin nispeten gevrek karakteri ile ilişkilendirilmekte olup, özellikle matris (epoksi), takviye (bazalt elyaf) ve alüminyum ara yüzeyleri arasındaki zayıf ara faz bağlanmasının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir [15].



Şekil 7. Darbe Dayanımı

Bu durum, çok katmanlı yapılar içerisinde meydana gelen darbe esnasındaki gerilme birikiminin, ara yüzeylerde ayrılmalara (delaminasyona) yol açtığını ve bu ayrılmaların, enerjinin emilmesini sağlayarak darbe direncine katkıda bulunduğunu göstermektedir. Ancak bu etki, aynı zamanda ara yüzey kalitesinin yeterince optimize edilmediğini ve özellikle elyaf-matris etkileşiminde geliştirmeye açık alanlar olduğunu da ortaya koymaktadır [16].

Sonuç olarak, katman sayısındaki artış kompozitlerin darbe dayanımını artırmakla birlikte, delaminasyon gibi hasar modlarının da daha belirgin hale geldiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, çok katmanlı kompozit sistemlerde mekanik performansın daha da iyileştirilebilmesi için, ara faz bağlarının güçlendirilmesine yönelik yüzey işlem tekniklerinin ve reçine sistemlerinin optimize edilmesi gerekmektedir.

4. Genel sonuçlar

Yapılan üç nokta eğme testleri sonucunda, üretilen kompozit malzemelerin eğilme-yük taşıma oranlarının katman sayısıyla birlikte lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak buna karşın, eğilme dayanımı değerlerinde genel bir azalma eğilimi kaydedilmiştir. Bu düşüş, artan kesit kalınlığının yarattığı yapısal değişimlere bağlanmaktadır. Özellikle deformasyon oranlarının incelenmesi, bu durumu açıklamada önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Katman sayısındaki artışın deformasyon oranının yükselttiği, dolayısıyla malzemenin daha fazla şekil değiştirme eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.

Öte yandan, darbe testlerinden elde edilen veriler, darbe dayanımındaki artışın, elyaf ve matris fazı arasındaki güçlü bağlanmaya atfedilebileceğini ortaya koymuştur. Bu ara faz bağının etkinliği, kompozitlerin daha fazla darbe enerjisini absorbe edebilmesini sağlamakta ve kontrol numunesine kıyasla daha yüksek sertlik ve dayanıklılık özellikleri kazandırmaktadır. Özellikle epoksi reçine ile bazalt elyafları arasında sağlanan iyi bağlanma, etkin bir yük transfer mekanizması oluşturarak darbe yüklerine karşı dirençte belirgin bir artışa yol açmaktadır.

Ayrıca, malzeme kalınlığında yapılan artışların, belirli bir yük altında eğilme direncinde önemli kazanımlar sağladığı sonucuna varılmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, katman sayısındaki artış, darbe dayanımı üzerinde pozitif etki yaratırken, eğilme dayanımı üzerinde yapısal değişiklikler nedeniyle karmaşık bir etki profili oluşturmaktadır. Bu sonuçlar, kompozit tasarımlarında optimum katman sayısının ve kalınlığın belirlenmesinin, mekanik performans açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

REFERANSLAR

- [1] Demir, A. (2020). 1000 Serisi Alüminyumun Kompozit Uygulamalarındaki Rolü. Metalurji Dergisi, 65(1), 12–18.
- [2] Altun, M., & Kaya, B. (2023). Doğal Liflerin Yapısal Uygulamalarda Kullanımı: Bazalt Elyaf Örneği. Çevreci Malzemeler Dergisi, 5(1), 29–37.
- [3] Kaya, M. (2024). Katman Sayısının Eğilme Davranışına Etkisi. Yapısal Malzemeler Dergisi, 11(1), 34–42.
- [4] Uzun, A., & Arslan, B. (2024). Bazalt Lif Takviyeli Betonlarda Mekanik Davranış Analizi. İnşaat Mühendisliği Araştırmaları Dergisi, 10(2), 123–135.
- [5] Karaçor ve Özcanlı, Çukurova Üniversitesi. (2023). Hibrit Doğal Lif Takviyeli Kompozitlerde Matris Seçiminin Etkisi. Ç.Ü. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 40(1), 77–85.
- [6] Erdoğan, Pamukkale Üniversitesi. (2022). Hibrit Lifli Epoksi Kompozitlerde Düşük Hız Darbe Davranışı. PAÜ Teknik Bilimler Dergisi, 21(3), 66–74.
- [7] Koç, M., & Bilgin, H. (2021). Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Yapısal Performansı. Yapı ve Malzeme Dergisi, 9(1), 53–61.
- [8] Çetin, M., & Öztürk, A. (2022). Sıcak Presleme Yöntemiyle Lifli Kompozit Üretimi. Makine ve İmalat Dergisi, 15(2), 98–106.
- [9] Kılıç, R. (2021). Charpy Testi ile Kompozitlerde Darbe Dayanımının Belirlenmesi. Makine Teknolojisi Dergisi, 6(3), 73–80.
- [10] Koç, M. & Altay, S. (2023). Bazalt Elyaf Katkısının Çekme Dayanımına Etkisi. Kompozit Mekanik Dergisi, 12(2), 89–95.
- [11] Uyar, B. (2022). Lifli Kompozitlerde Yük Aktarımı ve Modül Etkisi. Malzeme Davranışı Dergisi, 5(1), 51–58.
- [12] Kaya, M. (2024). Katman Sayısının Eğilme Davranışına Etkisi. Yapısal Malzemeler Dergisi, 11(1), 34–42.
- [13] Şahin, M., Duman, V., & Koç, A. (2023). Hibrit Lifli Kompozit Sistemlerde Sinerjik Etkiler. Kompozit Teknolojileri Dergisi, 8(3), 91–98.
- [14] Aksoy, F., & Durmuş, H. (2023). Katmanlı Alüminyum Kompozitlerin Üretimi ve Özellikleri. Kompozit Bilimi Dergisi, 12(1), 33–42.
- [15] Güneş, S. (2021). Sandviç Yapılı Kompozit Sistemlerde Katman Diziliminin Etkisi. Yapı Teknolojileri Dergisi, 8(4), 55–64.
- [16] Çetin, M., & Öztürk, A. (2022). Sıcak Presleme Yöntemiyle Lifli Kompozit Üretimi. Makine ve İmalat Dergisi, 15(2), 98–106.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PRECIPITATION HARDENING MECHANISMS IN SEMI AUSTENITIC AND MARTENSITIC STAINLESS STEELS MICROSTRUCTURE HEAT TREATMENT AND MECHANICAL PERFORMANCE

SHAHROZ SAKHAWAT[*1]

[1]Pakistan Welding Institute, Islamabad, Pakistan

Abstract

Precipitation hardening stainless steels are widely used in many engineering applications due to their good combination of strength, corrosion resistance, and dimensional stability. This study presents a comparative analysis of the precipitation hardening mechanisms in two major classes: semi-austenitic (e.g., 17-7PH) and martensitic (e.g., 17-4PH) stainless steels with a focus on their precipitation hardening mechanisms, transformations and resulting mechanical performance. The strengthening of both alloys is dominated by their chemical composition, and they require different set of thermal treatments to achieve hardening. 17-7PH is strengthened through a multi-step hardening procedure while 17-4PH achieves hardening by direct aging process. This work outlines the differences in phase transformation behavior, microstructural evolution, and mechanical properties achieved through transformation and aging treatments. It provides trade-off between ease of processing and mechanical performance supported by heat treatment profiling, hardness measurements, tensile testing and microstructural evaluation through Scanning electron microscopy (SEM) and optical metallography, offering valuable insights for heat treatment design and material selection in industry.

Keyword: Precipitation hardening, Semi austenitic stainless steels, Martensitic stainless steels,17-7 PH, 17-4 PH, Mechanical performance, Structure property relationship

MULTIFUNCTIONAL SILICA AEROGEL NANOCOATINGS for THERMAL INSULATION of GLASS SURFACES

EKIN SU ESKIIZMIRLILER [1], ERKAN ERSÖZ [1], NILAY GIZLI* [1]

[1] Ege University, Engineering Faculty, Chemical Engineering Department, Izmir, TURKEY.

Abstract

Silica aerogels have unique properties such as high surface area, high porosity, low density, low thermal conductivity, and a low refractive index. Their nanoscale pores and 3D network structure reduce heat transfer by suppressing both solid conduction and gas convection. These unique properties make them strong candidates for advanced insulating applications. Glass surfaces are one of the main sources of heat loss in buildings and appliances. Applying aerogel-based coatings with low thermal conductivity helps improve energy efficiency while keeping the transparency of the glass. In addition to thermal insulation, aerogel coatings offer multifunctional advantages, including self-cleaning, water-repellent, and fire-retardant properties. These features make them valuable candidates in a wide range of energy-efficient technologies.

This study aims to develop hydrophobic, transparent, and thermally insulating silica-based aerogel nanocoating to reduce heat loss from glass surfaces. Silica-based nanocomposite films were synthesized via the sol–gel method using tetraethyl orthosilicate (TEOS) as the silica precursor, and glycidoxypropyltrimethoxysilane (GLYMO) and aminopropyltriethoxysilane (APTES) as epoxy- and amine-functional silica sources, respectively. The coatings were applied to glass substrates using various techniques, including dip-coating and spin-coating. To enhance the hydrophobic properties, the coated surfaces were further modified with organofunctional silane agents. The effects of coating application method and surface modification were investigated in terms of optical transmittance, hydrophobicity, and thermal insulation performance.

Results showed that silica-based spin coated samples exhibited the highest transparency values up to 98.4% relative to the bare glass surface. The hydrophobicity of the bare glass (contact angle of 44°) was successfully improved to 108° after surface modification with organofunctional silanes. Moreover, the modified surfaces exhibited a contact angle hysteresis below 15°, indicating effective self-cleaning capabilities. Thermal measurements were conducted using a custom-built experimental setup. Temperature differences between the upper and lower surfaces of the glass exposed to a 100 W light source were recorded using thermocouples. The highest temperature difference of 5.38 °C compared to bare glass was achieved with the unmodified spin-coated sample. Experimental results revealed that while surface modification enhances hydrophobicity, it negatively affects both thermal insulation performance and transparency. These findings suggest that the tunable nature of silica aerogel structures offers a promising route to balance and optimize these desired properties in developing coating systems.

Keyword: Sol-gel coating, Hydrophobic coating, Aerogel coating, Thermal insulation

EVALUATION OF BIOPOLYMERS AS ALTERNATIVE BINDERS IN EARTHEN SOIL COMPOSITES

ARSLAN YOUSAF [*1], SHOUKAT ALIM KHAN [1], MUAMMER KOÇ [1]

[1] Division of Sustainable Development, College of Science and Engineering, Hamad Bin Khalifa University, Doha 34110, Qatar

Abstract

Biopolymers are emerging as a sustainable replacement for traditional soil stabilizers because of their renewability, biodegradability, and environmental friendliness. This paper investigates the prospects of plant, algae and animal-derived biopolymers for improving the mechanical, hygrothermal, and durability properties of treated soils and earthen construction materials. Experimental results for Atterberg limits, compaction behavior, strength development, and durability properties after environmental stress (e.g., wet–dry and freeze–thaw cycles) are reviewed. The paper also reviewed the application methods, ranging from in situ mixing to surface treatments, and compared performance for different types of soil and climatic conditions. The review revealed promising results despite the challenges in terms of long-term durability, lack of standardized testing, scalability of production, and limited field trials. Overall, this paper concluded that with appropriate dosage optimization, soil compatibility, and lifecycle thinking, biopolymers provide a means to move toward a circular, low-carbon geotechnical and construction practice.

Keyword: Biopolymer, Soil stabilization, Earthen construction, Sustainable materials, Geotechnical engineering, Life cycle assessment

1. Introduction

The growing demand for sustainable construction led to a profound reevaluation of traditional soil stabilization with cement, lime, and other synthetic additives. These materials provide adequate geotechnical performance and are widely used; however, they are responsible for 8% of global CO_2 emissions [1–12]. The building and construction sector consumes is responsible for 39% of CO_2 emissions worldwide [13]. Due to its low environmental impact, high local availability, and potential for recyclability and passive hygrothermal regulation, raw earth has regained interest as a construction material [14]. The high variability of raw earth and its susceptibility to water damage make it vulnerable to deterioration and, therefore, it must be stabilized to improve its mechanical properties and durability. Chemical stabilizers, such as cement and lime, are commonly used for this purpose; however, they decrease the recyclability of the material and affect its moisture buffering capacity [15].

In the last decade, biologically based stabilization methods such as microbial-induced calcite precipitation (MICP), enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP), and the

incorporation of biopolymers have been explored due to their potential to enhance soil properties and reduce the environmental impact of geotechnical materials [16,17]. Biopolymers are macromolecules produced by living organisms or their products, such as plants and microorganisms; they have the potential to improve the mechanical properties of earthen materials and to increase their water retention, unconfined compressive strength, and erosion resistance, while enhancing the sustainability of the material [18]. Despite the increasing number of publications, few studies have explored the interaction mechanisms between biopolymers and soil, particularly regarding the understanding of interaction mechanisms at the molecular level. Most of the research has been focused on geotechnical applications and has not explored the hygrothermal behavior of these materials and their potential for use in earthen construction techniques.

The aim of this review is to critically discuss the potential of biopolymers as alternatives to conventional stabilizers in geotechnical engineering and earthen construction regarding their mechanical performance, environmental impact and implementation challenges.

The specific aims are:
1. To understand how biopolymers improve geotechnical properties of various soil types in terms of strength, compaction, erosion and hygrothermal behavior.
2. To characterize the environmental sustainability of biopolymer-based stabilization in terms of life cycle impacts, biodegradability, recyclability and trade-offs such as land use and energy impacts.
3. To identify limitations, open research questions and scalability issues for the field implementation of biopolymers regarding their long-term durability, standardization requirements and socio-technical implementation barriers.

2. Methodology

2.1. Research philosophy

Due to the cross-disciplinary and application-oriented character of biopolymer use in geotechnical engineering and earthen construction, this study is guided by a pragmatism research philosophy [19]. Pragmatism is an appropriate approach to tackle real-world problems. It is open to integrating perspectives from materials science, soil mechanics, civil engineering, the environment, and traditional construction practices to produce actionable knowledge that connects laboratory outcomes with field use and policy relevance. Because biopolymer use is a technologically innovative, environmentally relevant, and socio-technical issue, both quantitative data (e.g., unconfined compressive strength, erosion resistance, life cycle emissions) and vernacular knowledge (e.g., scalability constraints, field case studies) are important to transcend practical barriers to use.

2.2. Research approach

An inductive research method was followed to gather and summarize emerging mechanisms and patterns from a large body of published literature and case histories [20]. The goal was not to test prespecified hypotheses, but to learn general lessons from a set of specific instances of biopolymer use in soil stabilization and earthen construction. These include recurring mechanisms of performance, drivers of performance and environmental trade-offs, and implementation challenges across different geographic contexts and material types.

2.3. Research strategy

The study adopts a bottom-up qualitative multiple-secondary data strategy [21]. The authors referred to a large variety of sources including peer--and academic thesis- and industrial

institutional- and conference- and case study- reports. The databases Scopus, Web of Science, JSTOR, ScienceDirect, and Google Scholar were complemented with grey literature and regional case studies. The gathered materials were thematically coded into categories according to dimensions such as: (i) classification and function of biopolymers; (ii) geotechnical characteristics (strength, erosion, compaction); (iii) hygrothermal characteristics; (iv) environmental and life cycle analysis; (v) challenges and field applications. This approach enables a comprehensive learning perspective on the potential for biopolymers to enhance low carbon construction.

2.4. The use of concept maps in biopolymer–soil interaction analysis

2.4.1. Formulation of research questions and key concepts

Concept maps were developed to visually elucidate the relationships among key variables affecting the performance of biopolymers in soil stabilization and earthen construction (Figure 1) [22]. These maps spanned domains such as the biopolymer (e.g., xanthan gum, lignin, chitosan), soil (e.g., texture, mineralogy, cation exchange capacity), environment (e.g., moisture, temperature), and engineering performance of stabilized soil (e.g., compressive strength, erosion resistance, water retention, thermal inertia).

Research questions were:

- How do the geotechnical and hygrothermal performance of different biopolymers interact with different soil types?
- What environmental and application-specific factors affect the durability and scalability of biopolymer stabilization treatments?
- How do biopolymer stabilizer treatments compare to traditional stabilizers in life cycle impacts and reusability?

2.4.2. Relationship analysis and supporting ideas

The concept maps illustrated important connections between biopolymer chemistry (e.g., hydrogen bonding, ionic cross-linking), soil particle attributes (e.g., size, surface charge), and field performance (Figure 1). For example, increased strength was correlated with biopolymers creating microstructural bridges and pore-filling gels, and hygrothermal buffering was correlated with hydrophilic functional groups. Long-term weathering, field variability, and industrial scalability challenges were also identified through the maps, along with the need for common testing protocols and field trials. The visual map helped to synthesize multidisciplinary information and surface the gaps between laboratory results and application.

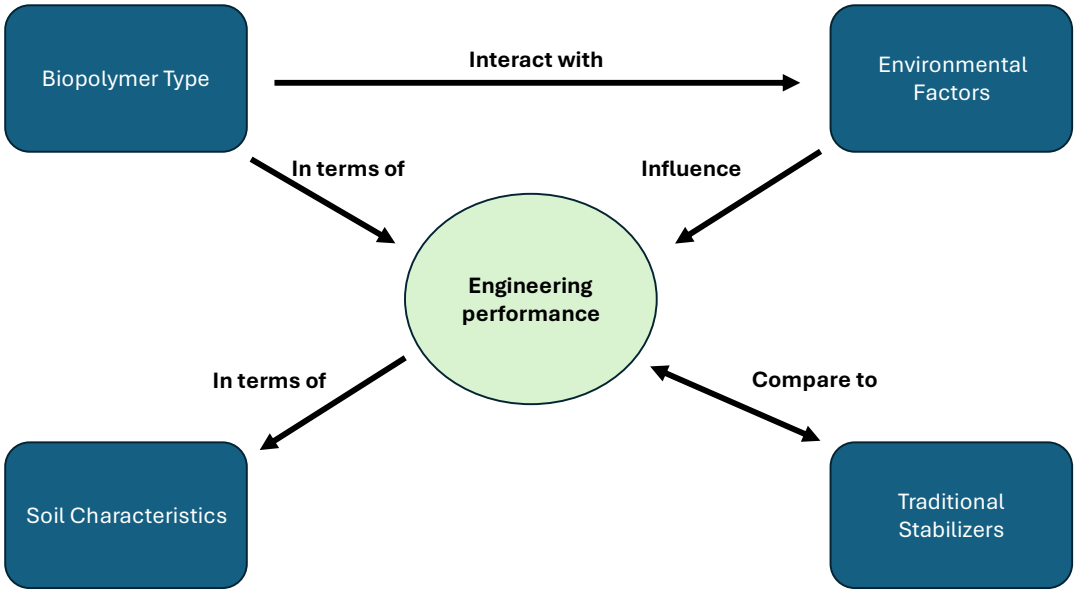


Figure 1. Concept map illustrating the interactions between biopolymer characteristics, environmental conditions, and soil characteristics that influence engineering performance. Engineering performance is measured in terms of compressive strength, erosion resistance, and water retention, and these are compared with conventional stabilizers to demonstrate the efficacy and environmental sustainability of biopolymer soil stabilization.

2. Classification of biopolymers used in soil stabilization .

Biopolymers are naturally synthesized macromolecules which can be used as a more environment friendly replacement of conventional soil stabilizers like cement and lime. They can be classified according to their origin, functionality and interaction with the soil particles as well as their environmental behavior. These macromolecules can be classified into three major groups according to their origin as well as their classification extracted from experimental and review work done in geotechnical and earthen construction applications: biological origin, molecular structure, and source classification.

2.1. According to origin

The biopolymers used in soil stabilization can be classified into three main categories according to their origin as follows:

2.1.1. Plant biopolymers

These biopolymers are mostly extracted from terrestrial plants and marine algae and can be used as soil stabilization materials due to their various polysaccharides contents. The hydrogels produced by Guar gum (extracted from Cyamopsis tetragonoloba) through the hydrogen bonding with the soil particles increase the unconfined compressive strength considerably [23]. Lignin which is a phenolic product of paper industry as a cohesive particle improves the soil strength and reduces the porosity. The addition of 0.75 wt% lignin sulfonate increased the strength of clay by 44% [24]. The produced hydrogels from Agar and Carrageenan which are thermo-gelling substances extracted from red seaweed, increase the strength of fine soils by matrix formation [25]. Sodium alginate extracted from brown algae improves the compressive strength and erosion

behavior of both clay and dune sand by forming cationic gels [26]. The hydroxyl rich molecular structure of Oats and Barley extracted Beta-Glucan increases the pores filling and swelling [27].

2.1.2. Microorganism-based biopolymers

Since these biopolymers are synthesized by microbial fermentation and have been largely explored for various applications in food and pharmaceutical industries, they are recently attracting attention for soil stabilization because of their physicochemical properties. Xanthan gum, secreted by Xanthomonas campestris, improves cohesion in sandy and fine soils and it is generally more ductile and tensile strength than cement [23,28]. Gellan gum, secreted by Sphingomonas elodea, shows thermo-reversible gelation and it can be used as a hydrogel-forming agent to bind the soil particles [29]. Dextran, secreted by Leuconostoc mesenteroides, was reported to increase erosion resistance in the fine sand [30]. Furthermore, ε-polylysine, cationic polymer secreted by Streptomyces species, can enhance the cohesion of soil by attracting negatively charged surfaces of clay particles through ionic bonding [31].

2.1.3. Animal-derived biopolymers

Animal-derived biopolymers produced from animal waste or by-products can be used as efficient soil stabilization materials because of their adhesive and binding characteristics. Chitosan, obtained from crustacean shells, was used as both matrix additive and surface coating, which increased the mechanical strength and water resistance of the stabilized soils [32]. Casein, a protein extracted from milk, and its water-soluble form sodium caseinate, form strong adhesive networks to increase cohesion of sandy soils. These two proteins have also been traditionally blended with lime in earthen architecture to increase its durability and stability [33,34]. Moreover, blood proteins have been used in rammed earth construction. Its use in the matrix increases the compressive strength of the soil by around 36% as a result of the coagulation that takes place during compression and drying [35].

2.2. According to molecular type

Biopolymers can also be classified according to their molecular composition, which determines their ability to interact with soil particles.

- Polysaccharides: Xanthan, guar, agar, carrageenan, alginate, beta-glucan, dextran, and cellulose fibers, which are basically hydrophilic and promote soil binding through gel formation, hydrogen bonding, and water retention [32].
- Proteins: Casein, albumin, and blood proteins act through ionic and electrostatic interactions, as well as through their amphiphilic characteristics that improve both cohesion and water resistance [36].
- Lipids: Hydrophobic materials such as linseed oil, soybean oil, and waxes, which basically act as surface waterproofing barriers; these materials are efficient in preventing erosion but decrease vapor permeability [37].
- Tannins and Complex Molecules: Tannins can chelate metal ions and form macromolecular complexes with clays, improving both strength and water resistance [38].

2.3. Source classification

Understanding the environmental and economic origin of the biopolymer is critical for sustainability cradle-to-cradle assessments.

- Waste Materials (W): Agricultural residues such as tomato and beetroot wastes, cow dung, and chitosan (from shellfish waste). Usually, there is no market value for these materials, and they are reused to minimize landfill and processing costs [39].
- By-Products (BY): A secondary output with no or low market value such as lignin (from the paper industry) and sodium caseinate (dairy industry). They provide economic and environmental co-benefits [40].
- Naturally Extracted (-): Biopolymers such as agar, alginate, guar gum, and xanthan gum are directly extracted from plants or microbes. They are highly effective but their large-scale extraction may compete with food production or the ecosystem unless proper attention is paid to their sustainable extraction [23].

In a few cases, the classification of a waste or by-product is unclear due to the lack of reported market value for the residues and co-products [41].

Table 1: Summary Table of the Classification of Biopolymers Used for Soil Stabilization

Classification	Subcategories	Examples
Origin	Plant-based biopolymers	guar gum, lignin, agar, carrageenan, sodium alginate, beta-glucan
	Microorganism-based biopolymers	xanthan gum, gellan gum, dextran, ε-polylysine
	Animal-derived biopolymers	chitosan
Molecular Type	Waste materials (W)	tomato residues, cow dung
	Proteins	casein, blood proteins
	Lipids	linseed oil, waxes
Source	Waste materials (W)	tomato residues, cow dung
	By-products (BY)	lignin, sodium caseinate
	Naturally extracted (–)	agar, xanthan gum

3. Mechanisms of biopolymer–soil interaction

The ability of biopolymers to modify soil microstructure and interparticle bonding through chemical and physical interactions confers several mechanisms of stabilization to biopolymers in soil (varying with soil type, biopolymer composition, and environmental conditions as shown in Figure 2). In this section, the dominant interaction mechanisms observed in sandy soils, clayey soils, and their respective microstructural changes are explained.

3.1. Interaction with sandy soils

Sandy soils are characterized by their large particle size and low natural cohesion, and are significantly improved by biopolymer application through multiple interrelated bonding mechanisms. The first is coating, in which hydrophilic biopolymers like guar gum, xanthan gum, and sodium alginate are adsorbed onto individual sand grains and develop a hydrogel layer around them (Figure 3). Such coatings promote interparticle bonding and decrease water infiltration by rendering a continuous biopolymer film over particles [31,42]. A second interaction mechanism is pore-filling. When immersed in water, biopolymers take up moisture and swell to fill the pores and voids in the granular matrix, thereby increasing the density of the soil and reducing its permeability.

Sodium alginate and gellan gum are effective in this regard owing to their robust gelling properties [43]. As the biopolymer-treated soil dries out, a third interaction mechanism of hardening and dehydration through the loss of moisture and film formation is activated. As this stage is reached, the hydrogels formed by the biopolymers transform into rigid films through dehydration and hardening, which induce inter-particle bonding through physical contact, leading to a significant increase in unconfined compressive strength (UCS); in some cases, the tensile strength of the biopolymer-treated soil even exceeded that of cement [44]. Finally, bonding at the molecular level of the biopolymer network is due to the presence of –OH groups in dextran and beta-glucan, which act through hydrogen bonding and Van der Waals forces to generate intermolecular bridges [45]. In summary, the combination of these mechanisms endows biopolymers with strong potential for sandy soil stabilization.

3.2. Interaction with clayey soils

Clayey soils have fine particle size, high surface charge and a propensity to swelling. These particles exhibit different interactions with biopolymers depending on the polymer and mineralogical composition of the clay. The most prominent pathway of interaction between clay and biopolymer is through electrostatic and hydrogen bonding. E-Polylysine and chitosan cationic biopolymers interact with negatively charged clay minerals through electrostatic attraction and help in stabilization. On the other hand, hydrogen bonding with inter-particulate surfaces of polysaccharide based biopolymers leads to flocculation and particle aggregation which improves the structure of soil [46].

The mineralogical composition of clay has a significant impact on the amount of interaction that occurs between it and biopolymers. Since montmorillonite has a high CEC, it interacts more with charged biopolymers than less reactive clays such as kaolinite. The interactions that occur between charged biopolymers and montmorillonitic soils often result in significant changes in the structure of the soil, since biopolymers can control the interlayer water and hence influence the swelling behavior and microstructure of the clay [24].

Biopolymer treatment has also been reported to cause microstructural transformations in the soil particles, which have been observed using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques. The results of these studies have shown that the biopolymer treated clay particles undergo reorganization characterized by increased particle aggregation and pore filling, which causes a decrease in the PI and swelling potential, and a progressive increase in strength and durability with time [47]. These transformations in the engineering properties of the particles make the biopolymers a viable alternative for improving the engineering properties of clayey soils.

3.3. Impact on soil microstructure.

The combination of contact between biopolymers and soil particles leads to certain microstructural changes that provide benefits in geotechnical characteristics. First, porosity is reduced, and particles are bridged by biopolymers which fill voids and act as adhesive particles, usually observed in sandy soils. In terms of compaction and unconfined compressive strength (UCS), treatments with xanthan gum, guar gum, or alginate have provided gains over 200% [48]. The final soil compaction behavior is modified by biopolymers, which usually cause an increase in optimum moisture content (OMC) because of the retained water, while sometimes decreasing the maximum dry density (MDD) because polymer films prevent close particle packing [49].

The performance of biopolymers differs according to soil type: in sands, the improvements are due to the physical binding of polymer on soil particles, while in clays, the performance is due to

mineralogy and electrochemical compatibility. In general, lignin-treated sands are stiffer and have lower permeability, while chitosan-treated clays maintain strength and are resistant to further weakening by water [32]. The combination of physical coating, chemical bonding, and microstructural modification makes biopolymers suitable as sustainable soil stabilizers for different geotechnical applications.

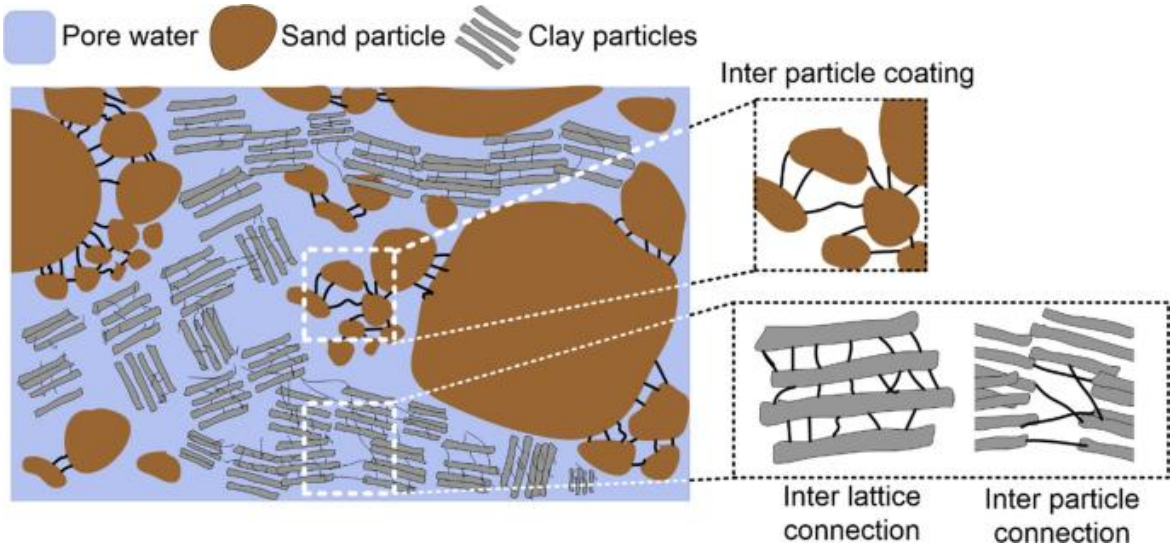


Figure 2. Interaction behavior of biopolymers with the soil particles. Interactions of biopolymers with the soil improve the strength of soil by coating the inter-particles with polymer film on sand grain, bonding inter-lattice of clay layers and inter-particle with clay aggregates bridges. These interfacial bonding actions increase the cohesion, reduce the porosity and improve the mechanical properties of biopolymer treated soils. (reproduced with permission from [50])

4. Effects of biopolymers on geotechnical properties

Biopolymers affect engineering behavior of soil by various improvements in geotechnical properties of soil (Table 2). These polymer coatings affect strength and deformation characteristics of soil, water retention characteristics, and durability of soil for various civil engineering and construction concretes applications. The degree of improvement in soil properties depends on the type of biopolymer, its concentration, soil texture, and environmental conditions.

4.1. Unconfined compressive strength (UCS)

Unconfined compressive strength (UCS) is a parameter commonly used to determine the load bearing capacity of soils and many researchers have reported that biopolymer stabilization can increase UCS for various types of soils. In sandy soils, biopolymers of xanthan gum, guar gum and sodium alginate have resulted in 300% increases in UCS values depending largely on the polymer concentration and curing time [23,48]. On the other hand, for clayey soils, lignin sulfonate, used at 0.75 wt%, increased the UCS by 44% attributed to better flocculation and pore-filling [24]. Chitosan and casein have shown promising results for both cohesive and granular soils due to good binding characteristics and their ability to withstand moisture, which aid in long-term cohesion [32,34]. Moreover, unconventional sources of biopolymers such as cow dung and tomato waste have also shown considerable UCS increases, and these findings provide promising low-cost and sustainable materials for improving soil properties [51,52].

4.2. Shear strength

Shear strength is related to slope stability and foundation design, and biopolymers increase shear strength by improving cohesion (c) to a large extent and internal friction angle (φ) to a minor degree. Cohesion for dune sands treated with xanthan gum and sodium alginate was increased from 2 kPa to more than 20 kPa with little change in φ [23]. Shear strength of casein treated sand was increased by 47% for monotonic shear strength [23]. In clayey soils, increased cohesion due to flocculation leads to aggregated and shear resistant structures and therefore biopolymers can be an effective and sustainable alternative for strengthening soils for geotechnical applications [41].

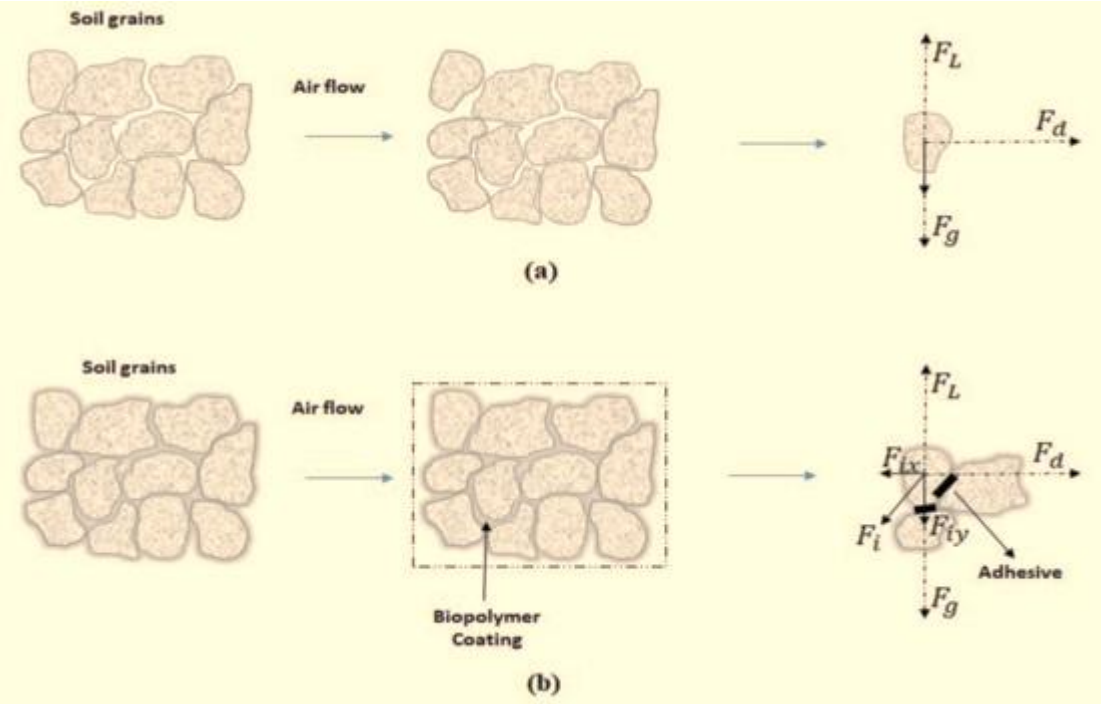


Figure 3. Schematic plot of effect of biopolymer coating on soil resistance to wind erosion in (a) untreated sand and (b) biopolymer-treated sand. Biopolymer coating on the particle surface increases particle cohesion by adhesion forces that overcome aerodynamic forces (lift and drag) and therefore increase the resistance of particles to detachment and soil loss. (reproduced with permission from [31])

4.3. Erosion resistance

Biopolymers increase the ability of the soil to resist erosion by wind and water and are very efficient in the stabilization of topsoil. Erosion of soil is a process in which fluid forces overcome the shear and gravitational resistance of the soil. Biopolymers reduce erosion by decreasing permeability and cohesion, and the formation of protective surface crusts. Shear strength is improved and void ratio is reduced by dextran and xanthan gum. Erosion was reduced from 60% to <2% by beta-glucan and xanthan when rainfall was applied [23]. Xanthan also prevents levees from slumping during floods by reducing pore pressure. Biopolymers resist wind erosion more than carrageenan and starch, keeping them durable for at least two weeks. However, compared to synthetic polymers, guar resists better on long-term dust control in stressful conditions [53].

4.4. Atterberg limits

Biopolymer treatment affects the Atterberg limits of soils by changing the water retention and interparticle bonding behavior of soils. Generally, biopolymers increase the plastic limit (PL) and

decrease the liquid limit (LL), which results in a reduced plasticity index (PI) and hence reduces soil expansiveness and swelling potential [23]. Tannin- treated clays showed a 20% reduction in PI due to cation bridging and restrained shrinkage [54]. Hydrophobic materials, such as linseed oil, decrease both LL and PL by expelling water and, thus, affect the consistency and behavior of the soil [37].

4.5. Compaction and density

Biopolymers affect the compaction behavior of soils by changing the water retention and interparticle friction. Biopolymer-treated soils exhibit different compaction behavior depending on the polymer and soil. Beta-glucan increased both the optimal moisture content (OMC) and maximum dry density (MDD) of Korean residual soil [55]. Xanthan and guar decreased MDD of collapsible soils due to solution viscosity [56]. In lignin-treated silt, MDD increased with lignin content up to 12% before decreasing due to particle oversaturation [57]. For xanthan-treated sand, the optimal MDD was achieved with 1% content and the lowest OMC [58]. In contrast, 3% xanthan in clay reduced MDD and increased OMC [33]. Biopolymers exhibited different behavior compared to traditional stabilizers [59].

4.6. Durability under environmental conditions

Soil treated with biopolymers experience environmental stress, which may impact long term performance particularly for field applications. Long term performance of biopolymer treated soils is of concern. For instance, xanthan and guar gums can lose up to 30% of their strength after ten wet–dry cycles unless coated with hydrophobic coatings or mineral binders. Similarly, freeze–thaw cycles can reduce tensile strength and surface characteristics of the soil. Hybrid stabilization holds promise for increased freeze–thaw resistance [23,30]. In addition, UV radiation and microbial attack can reduce the integrity of the soil over time. Although biodegradability improves the environmental friendly potential of the material, it also demands a protective coating to ensure durability [54].

4.7. Pavement and load bearing structures

Biopolymers are being explored for use in civil engineering for a variety of applications in pavement, embankment and structural walls. California Bearing Ratio (CBR) tests showed considerable improvements in the CBR values of the soils. Up to 100% increases in CBR have been reported for silty sands treated with xanthan gum and sodium alginate [60]. Stabilized subgrade materials with treatment of guar gum showed considerable increases in resilient modulus (Mr) and stiffer values for use in sections of the road with light traffic. In earthen construction, the addition of natural additives of casein, blood and beetroot have increased compressive strength and improved the thermal inertia of rammed earth and adobe construction [35].

5. Applications of biopolymers in earthen construction performance.

Biopolymers have been used in different conventional and modern earthen construction materials such as Compressed Earth Blocks (CEB), adobe, rammed earth and earthen plasters [61,62]. The incorporation of biopolymers into earthen construction materials improved different mechanical, hygrothermal and environmental properties of earth materials which contribute to the new vision of sustainable construction based on circular economy.

5.1. Mechanical behaviour of earth building materials

5.1.1. Applications of biopolymers in earthen construction

The use of biopolymers in earthen construction materials improves the mechanical performance of earth blocks and rammed earth while mitigating shrinkage cracking. Different biopolymers additives can be used in earth blocks such as blood, casein, cow dung and tannins. Blood earth

improved the compressive strength and surface hardness of CEBs and Rammed earth due to the coagulation of proteins retained in the matrix during drying [35]. The use of organic biopolymers such as beetroot pulp, tomato waste and cow dung in adobe and plaster decreased the drying shrinkage and cracking due to the filling of microvoids and retention of moisture inside the material [62]. Casein and tannin treatments improve the ductility and plasticity of the material, increase the workability and mitigate the micro-cracks formation which enhance the seismic performance of the material [54].

5.1.2. Case studies

Different case studies have shown the applicability of biopolymers in improving the mechanical and durability properties of earthen materials. Millogo et al. [52] studied the use of different natural additives in earthen materials in Burkina Faso such as beetroot and tomato residues and showed an improvement in compressive strength (40 – 60 %) with a remarkable decrease in surface cracking. Achenza and Fenu [39] studied the traditional rammed earth of Sardinia and showed that the use of casein and cow dung improved the cohesion and the water absorption of the material [26]. In plasters and renders, different additives such as chitosan, linseed oil and natural waxes have been used to improve the workability of the material and surface durability while preserving the breathable characteristic of the plaster [37].

5.2. Hygrothermal properties

Stabilization of earthen materials with biopolymers improves their hygrothermal behaviour. Hydrophilic biopolymers (beta-glucan, alginate, guar gum) enhance moisture buffering capacity and allow earthen materials to passively uptake and release humidity, which contributes to indoor comfort [37]. Cow dung, blood, and vegetal fibers increase specific heat and thermal inertia, delay heat transfer, and stabilise indoor temperatures, especially in hot climates [52]. Moreover, biopolymers (linseed oil/tannin mixtures) preserve/increase vapor permeability, which is essential for earthen construction to avoid condensation and mold growth [54].

5.3. Recyclability and reusability

Thanks to their potential for disassembly, biopolymer-stabilized earthen materials hold great promise for circular construction and sustainability. Earthen mixes stabilized with natural biopolymers such as casein, beetroot, and blood proteins keep their initial cohesion properties during use; however, they can be rehydrated and remixed without performance loss, allowing for material recovery and reuse [52]. In contrast to cement-based stabilizers, biopolymers are biodegradable and non-toxic, which means that they will undergo an environmentally friendly decomposition or reintegration into new construction without chemical waste or contamination [32]. This corresponds to traditional vernacular practices in which the soils from old constructions are reused—still possible with cow dung, tannins, and plant gums [39,51]. Thus, biopolymer-stabilized earthen materials represent a promising system for regenerative, low-impact buildings.

6. Factors affecting the performance of biopolymers.

The effectiveness of biopolymer-containing soil stabilization and earthen materials for construction applications is affected by a combination of physical, chemical and operational factors [63]. Optimal biopolymer concentration, moisture content, soil type and application method must be achieved for specified geotechnical and structural properties.

6.1. Biopolymer concentration.

The stabilising action of biopolymers on the particles of a soil is a non-linear function of concentration, so optimisation of dosage is important. In general, for sandy and silty soils, the concentration ranges of 0.5% to 2% dry soil weight are effective for improving strength and

compaction for biopolymers such as xanthan gum, guar gum and sodium alginate [32,64]. For clay-rich soils, the concentration is usually in the range of 0.25% to 1% dry soil weight because of the high surface area and charge interactions of the clay particles, which confer binding efficiency on the biopolymer even at low dosages [24,32]. Dosage overdosing may lead to reduced dry density and excessive water retention, which can interfere with compaction [34], as well as increased brittleness and shrinkage cracking due to over-gelation in dried composites [52]. Also, higher dosages lead to an increased cost of material without a corresponding improvement in performance. Hence, the optimal concentration must be determined on a case-by-case basis using dosage trials with specific applications in mind.

6.2. Moisture content and curing.

The performance of biopolymer treatments is highly sensitive to moisture content and curing conditions. Hydrophilic biopolymers such as xanthan, beta-glucan and alginate are not able to gel unless there is sufficient moisture present to activate the adsorbed water, which then allows the bonding of soil particles together and growth of cohesive strength [30]. The typical curing time is 3–14 days at ambient temperature and conditions, during which the dehydration proceeds slowly to foster strong interaction between the polymer and the soil. In contrast, rapid drying may trap the internal moisture, causing incomplete cross linking and potential surface cracking [41]. However, if the biopolymer is moisture-sensitive, such as starch and dextran, these materials will degrade when subjected to wet–dry cycling without a stabilising binder added [34].

6.3. Soil type and mineralogy.

Biopolymer performance in soil stabilization is sensitive to soil texture and mineralogy. In sandy soils, biopolymers increase cohesion by coating soil grains and forming interparticle bridges (best in clean sand with low fines content) [48]. In clayey soils, performance depends on the mineralogy of the soil: for clays with high cation exchange capacity (CEC), such as montmorillonite, clays interact strongly with biopolymers due to electrostatic and hydrogen bonding [54], whereas kaolinite, with lower CEC, requires a significant amount of polymer to achieve similar effects [32]. Furthermore, fine-grained soils present larger surface areas for adhesion, whereas coarse particles limit gel penetration unless pre-gelled.

6.4. Mixing techniques and application methods

Mixing techniques and application methods affect the uniformity, performance, and scalability of biopolymer-stabilized soils. In situ stabilization is used for road subgrades and embankments; here, the biopolymer (usually liquid) is incorporated into the soil in-place using rotary tillers or injectors [65]. Field tests with xanthan and guar gum have shown improvements in California Bearing Ratio (CBR) and Unconfined Compressive Strength (UCS) of the soil mix in lightly trafficked roads [23]. Pre-mixed composites are more appropriate for applications such as CEBs, adobe, or rammed earth, where the soil and biopolymer are well-mixed under controlled moisture conditions to improve consistency and moisture control [51,52]. Surface treatments coat the external surfaces of the aggregate particles and include chitosan or linseed oil coatings to provide water resistance and protection against erosion [37]. Matrix incorporation ensures that the biopolymer is incorporated within the body of the soil.

7. Challenges and research gaps

7.1. Lack of long-term Data on performance and hygrothermal behavior

One of the main research gaps in the area of biopolymer-soil stabilization is the lack of data on long-term performance and hygrothermal behavior in the field. Most of the published studies on biopolymer-soil stabilization report short-term mechanical properties such as unconfined

compressive strength (UCS) and California Bearing Ratio (CBR) after only a few days or weeks of curing. There is a lack of information on the long-term performance of these materials under cyclic loading, long-term exposure to moisture, and/or microbial degradation. In terms of hygrothermal performance, there is a lack of information on thermal inertia, vapor diffusion, and moisture buffering in full-scale buildings. Few studies simulate long-term weathering, e.g., multiple wet–dry or freeze–thaw cycles, which is crucial to understanding the long-term behavior of the material in different climatic zones.

7.2. Lack of standardized testing in earthen construction

The lack of standardized testing in biopolymer-treated earthen materials is another major challenge that hampers the scientific comparability and market acceptance of these materials. Currently, studies using biopolymers in earthen materials employ a wide variety of testing procedures, including different sample preparation, curing times, compaction procedures, and mechanical testing procedures, which limits the scientific comparability between studies and hampers the definition of performance metrics. In addition, conventional standards such as those of ASTM or ISO are developed for cement-based materials or granular soils and are not suitable for the specificities of earthen materials, which generally have lower strength and higher porosity than granular soils. Thus, the definition of testing protocols requires the development of protocols adapted to earthen construction. Another major challenge is the lack of national building codes and civil engineering standards for the formal incorporation of biopolymer stabilizers into construction. This situation limits the use of these stabilizers to experimental or demonstration projects in a small number of construction projects.

7.3. Need for field trials to assess scalability

Just as their lab results suggest, the application of biopolymer technologies in soil stabilization and earthen construction can be promising, but they have yet to be field-verified and scaled up. Most of the existing research has been laboratory-based or conducted on small-scale prototypes, which do not represent actual field conditions in any way. Field trials are needed to investigate the durability, performance, and environmental impacts of these materials over the long term, including across a range of soil types, climatic zones, and construction techniques. There are also scalability challenges, as the industrial application of certain biopolymers may be too expensive or resource-intensive. Even when they are locally produced and derived from waste (such as blood meal, dung, or beet pulp), biopolymers may still have supply issues and be culturally sensitive. There is also a dearth of research on the socio-technical aspects of these materials' implementation, including builder training, community acceptance, and policy support. Overcoming these challenges will be important to translate laboratory success into real-world applications.

8. Conclusion

The current study has demonstrated an exciting potential for using biopolymers as stabilizers in earthen construction and geotechnical practice. Plant and microbial as well as animal-derived biopolymers increase soil strength and reduce porosity while improving water resistance and being environmentally friendly relative to conventional stabilizers. The performance of these materials is influenced by biopolymer type, soil texture, moisture and application method. However, biopolymers are currently limited by variable performance across soil types, the absence of standardized tests and the need for further durability information under real-world climatic conditions over long periods. More field trials, scalability assessments and incorporation into regulatory practice will be necessary to advance the use of biopolymers as a means to more sustainable construction, particularly in poor resource and climate-vulnerable settings.

9. References:

[1] A. Yousaf, S.A. Khan, M. Koç, 3DP for sustainable built environment – synthesis and thermomechanical characterization of composite materials based on local soil and date palm fiber waste, J Clean Prod (2024) 144050. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144050.

[2] A. Yousaf, A. Al Rashid, M. Koç, 3D printing of alkali-activated geopolymers for sustainable and circular economy advancements, Circular Economy (2024) 100101. https://doi.org/10.1016/J.CEC.2024.100101.

[3] A. Yousaf, A. Al Rashid, M. Koç, Parameter tuning for sustainable 3D Printing(3DP) of clay structures, Journal of Engineering Research (2024). https://doi.org/10.1016/J.JER.2024.05.027.

[4] A. Yousaf, M. Koç, Remote Collaboration and Education in 3D Printing (3DP): Strategies for Engaging and Training Remote Learners, Minerals, Metals and Materials Series (2024) 2006–2019. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50349-8_177.

[5] A. Yousaf, M. Koç, Enhancing Thermal Insulation in 3D Printed (3DP) Structures Using Date Palm Waste and Local Soil, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE) 6 (2025). https://doi.org/10.1115/IMECE2024-139078.

[6] A. Yousaf, S.A. Khan, M. Koç, Exploring the potential of construction-compatible materials in structural supercapacitors for energy storage in the built environment, Cem Concr Compos (2024) 105809. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105809.

[7] A. Yousaf, S.A. Khan, M. Koç, Material, process, and design optimization of local earthen soil reinforced with natural fiber waste and nanoclay for 3DP of functional structures, Journal of Building Engineering 111 (2025) 113502. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.113502.

[8] A. Yousaf, A. Al Rashid, R. Polat, M. Koç, Potential and challenges of recycled polymer plastics and natural waste materials for additive manufacturing, Sustainable Materials and Technologies 41 (2024) e01103. https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2024.E01103.

[9] A. Yousaf, V. Kayvanfar, A. Mazzoni, A. Elomri, Artificial intelligence-based decision support systems in smart agriculture: Bibliometric analysis for operational insights and future directions, Front Sustain Food Syst 6 (2023). https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1053921.

[10] M. Khammassi, R. Wali, A. Al-Mutory, A. Yousaf, S. Sassi, M. Gharib, A simplified modal-based method to quantify delamination in carbon fibre-reinforced plastic beam, Nondestructive Testing and Evaluation 34 (2019) 283–298. https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1590828.

[11] A. Yousaf, S.A. Khan, M. Koç, Proof-of-concept design, characterization, and life cycle assessment of recycled PET–sand composite bricks via solvent-based dissolution, Constr Build Mater 491 (2025) 142612. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.142612.

[12] S.A. Khan, A. Yousaf, M. Şahmaran, M. Koç, Mix design and performance evaluation of geopolymer composites with graphene and graphene oxide for multifunctional energy storage built-environment, Case Studies in Construction Materials 22 (2025) e04848. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2025.E04848.

[13] J. Min, G. Yan, A.M. Abed, S. Elattar, M. Amine Khadimallah, A. Jan, H. Elhosiny Ali, The effect of carbon dioxide emissions on the building energy efficiency, Fuel 326 (2022) 124842. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.124842.

[14] P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, G. Dotelli, Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters, J Clean Prod 80 (2014) 179–186. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.05.073.

[15] A. Arrigoni, A.C. Grillet, R. Pelosato, G. Dotelli, C.T.S. Beckett, M. Woloszyn, D. Ciancio, Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation, Build Environ 115 (2017) 358–367. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2017.01.034.

[16] A.I. Omoregie, L.H. Ngu, D.E.L. Ong, P.M. Nissom, Low-cost cultivation of Sporosarcina pasteurii strain in food-grade yeast extract medium for microbially induced carbonate precipitation (MICP) application, Biocatal Agric Biotechnol 17 (2019) 247–255. https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2018.11.030.

[17] S. Liu, R. Wang, J. Yu, X. Peng, Y. Cai, B. Tu, Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of ancient clay roof tiles, Constr Build Mater 243 (2020) 118202. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118202.

[18] I. Chang, M. Lee, A.T.P. Tran, S. Lee, Y.M. Kwon, J. Im, G.C. Cho, Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices, Transportation Geotechnics 24 (2020) 100385. https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2020.100385.

[19] M. Elgeddawy, M. Abouraia, Pragmatism as a Research Paradigm, European Conference on Research Methodology for Business and Management Studies 23 (2024) 71–74. https://doi.org/10.34190/ECRM.23.1.2444.

[20] S.M. Kim, Inductive or deductive? Research by maxillofacial surgeons, J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 47 (2021) 151–152. https://doi.org/10.5125/JKAOMS.2021.47.3.151.

[21] H.I. Cheong, A. Lyons, R. Houghton, A. Majumdar, Secondary Qualitative Research Methodology Using Online Data within the Context of Social Sciences, Int J Qual Methods 22 (2023). https://doi.org/10.1177/16094069231180160/ASSET/D606C7D5-CB79-4BFB-B671-D274E4921213/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_16094069231180160-FIG1.JPG.

[22] C.J. Maker, R.H. Zimmerman, Concept Maps as Assessments of Expertise: Understanding of the Complexity and Interrelationships of Concepts in Science, J Adv Acad 31 (2020) 254–297. https://doi.org/10.1177/1932202X20921770/ASSET/2C7EFAB0-0EEB-4E66-9030-144B255090DB/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1932202X20921770-FIG12.JPG.

[23] I. Chang, J. Im, A.K. Prasidhi, G.C. Cho, Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening, Constr Build Mater 74 (2015) 65–72. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.10.026.

[24] B. Ta'negonbadi, R. Noorzad, Stabilization of clayey soil using lignosulfonate, Transportation Geotechnics 12 (2017) 45–55. https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2017.08.004.

[25] J. Nakamatsu, S. Kim, J. Ayarza, E. Ramírez, M. Elgegren, R. Aguilar, Eco-friendly modification of earthen construction with carrageenan: Water durability and mechanical assessment, Constr Build Mater 139 (2017) 193–202. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.02.062.

[26] A. Bakhshizadeh, N. Khayat, S. Horpibulsuk, Surface stabilization of clay using sodium alginate, Case Studies in Construction Materials 16 (2022) e01006. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01006.

[27] R. Kaur, M. Sharma, D. Ji, M. Xu, D. Agyei, Structural Features, Modification, and Functionalities of Beta-Glucan, Fibers 2020, Vol. 8, Page 1 8 (2019) 1. https://doi.org/10.3390/FIB8010001.

[28] Q. Ma, J. Wu, Y. xia Bai, H. Xiao, Enhance the mechanical properties of the fiber-reinforced sandy soil using xanthan gum, (2023). https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-3155241/V1.

[29] X. Jin, C. Wang, Z. Sun, Y. Lian, Q. Ji, J. Tang, X. Ma, Biocompatible dually reinforced gellan gum hydrogels with selective antibacterial activity, Carbohydr Polym 351 (2025) 123071. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2024.123071.

[30] S.-M. Ham, I. Chang, D.-H. Noh, T.-H. Kwon, B. Muhunthan, Improvement of Surface Erosion Resistance of Sand by Microbial Biopolymer Formation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 144 (2018) 06018004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001900/SUPPL_FILE/SUPPLEMENTAL_DATA_GT.1943-5606.0001900_HAM.ZIP.

[31] H. Fatehi, D.E.L. Ong, J. Yu, I. Chang, Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review, Geosciences 2021, Vol. 11, Page 291 11 (2021) 291. https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES11070291.

[32] R. Aguilar, J. Nakamatsu, E. Ramírez, M. Elgegren, J. Ayarza, S. Kim, M.A. Pando, L. Ortega-San-Martin, The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction, Constr Build Mater 114 (2016) 625–637. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.218.

[33] I. Bozyigit, A. Javadi, S. Altun, Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 13 (2021) 1160–1172. https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2021.06.007.

[34] H. Fatehi, S.M. Abtahi, H. Hashemolhosseini, S.M. Hejazi, A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening, Constr Build Mater 167 (2018) 813–821. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.028.

[35] V. López-Mateu, S. Tormo-Esteve, T.M. Pellicer, The walls construction system in Muza Tower (Benifaio, Spain), Earthen Architecture: Past, Present and Future - Proceedings of the International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture (2015) 227–232. https://doi.org/10.1201/B17392-40/COMPRESSIVE-STRENGTH-BLOOD-STABILIZED-EARTHEN-ARCHITECTURE-KRAUS-HIRMAS-ROBERTS.

[36] D. Kowalska, S. Stolte, D. Wyrzykowski, P. Stepnowski, J. Dołżonek, Interaction of ionic liquids with human serum albumin in the view of bioconcentration: a preliminary study, Chemical Papers 76 (2022) 2405–2417. https://doi.org/10.1007/S11696-021-02021-Y/TABLES/5.

[37] R. Eires, A. Camões, S. Jalali, Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil, J Clean Prod 142 (2017) 3281–3292. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.141.

[38] Y. Du, G. Habert, C. Brumaud, Influence of tannin and iron ions on the water resistance of clay materials, Constr Build Mater 323 (2022) 126571. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126571.

[39] M. Achenza, L. Fenu, On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction, Materials and Structures/Materiaux et Constructions 39 (2006) 21–27. https://doi.org/10.1617/S11527-005-9000-0/METRICS.

[40] Y. Li, H. Wu, Y. Zhang, J. Zhang, H. Huang, G. Du, B. Charrier, H. Essawy, A. Pizzi, J. Liao, X. Zhou, X. Chen, Development of novel sustainable lignin nanoparticles-caseinate nanocomposite films with properties for application as food packaging materials, Food Hydrocoll 167 (2025) 111413. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2025.111413.

[41] K. Pérez, N. Toro, M. Jeldres, E. Gálvez, P. Robles, O. Alvarado, P.G. Toledo, R.I. Jeldres, Estimating the Shear Resistance of Flocculated Kaolin Aggregates: Effect of Flocculation Time, Flocculant Dose, and Water Quality, Polymers 2022, Vol. 14, Page 1381 14 (2022) 1381. https://doi.org/10.3390/POLYM14071381.

[42] A. Al-Jabobi, H. Bilsel, The Effects of Xanthan Gum and Guar Gum on the Mechanical Properties of Sand–Bentonite Mixtures, Sustainability 2025, Vol. 17, Page 5339 17 (2025) 5339. https://doi.org/10.3390/SU17125339.

[43] C.A. Ghiorghita, I.V. Platon, M.M. Lazar, M.V. Dinu, A.C. Aprotosoaie, Trends in polysaccharide-based hydrogels and their role in enhancing the bioavailability and bioactivity of phytocompounds, Carbohydr Polym 334 (2024) 122033. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2024.122033.

[44] A.F. Cabalar, M. Wiszniewski, Z. Skutnik, Effects of Xanthan Gum Biopolymer on the Permeability, Odometer, Unconfined Compressive and Triaxial Shear Behavior of a Sand, Soil Mechanics and Foundation Engineering 54 (2017) 356–361. https://doi.org/10.1007/S11204-017-9481-1/METRICS.

[45] M.S. Reid, M. Villalobos, E.D. Cranston, The role of hydrogen bonding in non-ionic polymer adsorption to cellulose nanocrystals and silica colloids, Curr Opin Colloid Interface Sci 29 (2017) 76–82. https://doi.org/10.1016/J.COCIS.2017.03.005.

[46] Y.M. Kwon, J. Im, I. Chang, G.C. Cho, ε-polylysine biopolymer for coagulation of clay suspensions, Geomechanics and Engineering 12 (2017) 753–770. https://doi.org/10.12989/GAE.2017.12.5.753.

[47] Y.M. Kwon, I. Chang, G.C. Cho, Xanthan biopolymer-based soil treatment effect on kaolinite clay fabric and structure using XRD analysis, Scientific Reports 2023 13:1 13 (2023) 1–11. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38844-w.

[48] S. Muguda, S.J. Booth, P.N. Hughes, C.E. Augarde, C. Perlot, A.W. Bruno, D. Gallipoli, Mechanical properties of biopolymer-stabilised soil-based construction materials, Géotechnique Letters 7 (2017) 309–314. https://doi.org/10.1680/JGELE.17.00081.

[49] N. Latifi, S. Horpibulsuk, C.L. Meehan, M.Z.A. Majid, M.M. Tahir, E.T. Mohamad, Improvement of Problematic Soils with Biopolymer—An Environmentally Friendly Soil Stabilizer, Journal of Materials in Civil Engineering 29 (2016) 04016204. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001706.

[50] S. Jain, P.N. Mishra, S. Tiwari, Y. Wang, N. Jiang, H.R. Dash, I. Chang, A. Kumar, S.K. Das, A. Scheuermann, T. Bore, Biological perspectives in geotechnics: theoretical developments, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 2023 22:4 22 (2023) 1093–1130. https://doi.org/10.1007/S11157-023-09671-2.

[51] S. Banakinao, S. Tiem, K. Lolo, Y. Koutsawa, K.S. Bedja, Dataset of the use of tannin of néré (parkia-biglobosa) as a solution for the sustainability of the soil constructions in West Africa, Data Brief 8 (2016) 474–483. https://doi.org/10.1016/J.DIB.2016.05.072.

[52] Y. Millogo, J.E. Aubert, A.D. Séré, A. Fabbri, J.C. Morel, Earth blocks stabilized by cow-dung, Materials and Structures/Materiaux et Constructions 49 (2016) 4583–4594. https://doi.org/10.1617/S11527-016-0808-6/FIGURES/15.

[53] B. Jiang, Z. Liu, Y. Zhao, X. Zhang, X.H. Wang, B. Ji, Y. Zhang, J. Huang, Development of an eco-friendly dust suppressant based on modified pectin: experimental and theoretical investigations, Energy 289 (2024) 130018. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.130018.

[54] A. Vissac, A. Bourgès, D. Gandreau, R. Anger, L. Fontaine, argiles & biopolymères - les stabilisants naturels pour la construction en terre, (2017) 255. https://doi.org/10.34894/VQ1DJA.

[55] I. Chang, G.C. Cho, Geotechnical behavior of a beta-1,3/1,6-glucan biopolymer-treated residual soil, Geomechanics and Engineering 7 (2014) 633–647. https://doi.org/10.12989/GAE.2014.7.6.633.
[56] M. Ayeldeen, A. Negm, M. El Sawwaf, T. Gädda, Laboratory study of using biopolymer to reduce wind erosion, International Journal of Geotechnical Engineering 12 (2018) 228–240. https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1264692.
[57] Y. Zhang, Q. Zhao, C. Liu, M. Zhou, Properties comparison of mortars with welan gum or cellulose ether, Constr Build Mater 102 (2016) 648–653. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.116.
[58] M.U. Qureshi, I. Chang, K. Al-Sadarani, Strength and durability characteristics of biopolymer-treated desert sand, Geomechanics and Engineering 12 (2017) 785–801. https://doi.org/10.12989/GAE.2017.12.5.785.
[59] G. Cai, T. Zhang, S. Liu, J. Li, D. Jie, Stabilization Mechanism and Effect Evaluation of Stabilized Silt with Lignin Based on Laboratory Data, Marine Georesources & Geotechnology 34 (2016) 331–340. https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.966217.
[60] M.; Sujatha, E.R.; Rehman, A.U.; Moghal, M. Vishweshwaran, E.R. Sujatha, A.U. Rehman, A. Ali, B. Moghal, Efficacy of Acacia Gum Biopolymer in Strength Improvement of Silty and Clay Soils under Varying Curing Conditions, Polymers 2024, Vol. 16, Page 2831 16 (2024) 2831. https://doi.org/10.3390/POLYM16192831.
[61] I. Masrour, K. Baba, S. Simou, Naturally Strengthening Rammed Earth: The Promising Potential of Biopolymers, Materials Research Proceedings 40 (2024) 233–239. https://doi.org/10.21741/9781644903117-25.
[62] A.E. Losini, A.C. Grillet, M. Bellotto, M. Woloszyn, G. Dotelli, Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization – a review, Constr Build Mater 304 (2021) 124507. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124507.
[63] D. Patwa, A.A. Dubey, K. Ravi, S. Sreedeep, Biopolymer Stabilization of Highly Plastic Silty Soil for Rammed Earth Construction Materials, Lecture Notes in Civil Engineering 478 LNCE (2024) 379–389. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1745-3_33.
[64] S. Lee, I. Chang, M.K. Chung, Y. Kim, J. Kee, Geotechnical shear behavior of Xanthan Gum biopolymer treated sand from direct shear testing, Geomechanics and Engineering 12 (2017) 831–847. https://doi.org/10.12989/GAE.2017.12.5.831.
[65] M. Şimşek, S. Çelik, H. Akoğuz, Comparative Study of Mechanical and Microstructural Properties of Biocemented Sandy Soils Enhanced with Biopolymer: Evaluation of Mixing and Injection Treatment Methods, Applied Sciences 2025, Vol. 15, Page 8090 15 (2025) 8090. https://doi.org/10.3390/APP15148090.

SOL GEL DERIVED ARCHITECTURES FOR NEXT GENERATION DATA STORAGE APPLICATIONS

DERYA KAPUSUZ YAVUZ[1]

[1]Department of Metallurgical and Materials Engineering, Gaziantep University, Sehitkamil 27310, Türkiye

Abstract

The growing need for rapid, compact, and energy-efficient data storage solutions necessitates the investigation of innovative material platforms. Sol-gel-based synthesis methodologies have developed as a highly adaptable and economical method for producing advanced nanostructured materials, allowing for precise control over composition, porosity, and functionalization. The present study provides an overview of sol-gel derived systems designed for next-generation data storage applications, which includes DNA-based molecular storage and hybrid inorganic-organic platforms. The sol-gel process allows the encapsulation, stabilization, and distribution of molecules that carry sensitive information within mesoporous silica networks. Significant emphasis is placed on process parameters—including precursor chemistry, pH, and aging conditions—that affect the ultimate structural and functional characteristics of the storage platform. Recent breakthroughs in the integration of hybrid materials, particularly silica-biopolymer systems, are investigated as viable possibilities for stable and scalable molecular storage. This study highlights the potential of sol-gel chemistry to facilitate advancements in data storage technologies, leading to small, biocompatible, and durable storage systems.

Keyword: Mesoporous silica, Data storage, Sol-gel, DNA

IMPACT TOUGHNESS OF CPP AND PET BASED HYBRID THERMOPLASTIC LAMINATES UNDER FLATWISE CHARPY TESTING

NİDA PULGU [*1], AHMET ERKLİĞ[1]

[1] Gaziantep University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Gaziantep, Turkiye

Abstract

In this research, the flatwise charpy impact performance of laminated thermoplastic composites, utilizing a cast polypropylene (CPP) and polyethylene terephthalate (PET) matrix, reinforced with glass, carbon, and hybrid fibers, was examined. The composite laminates were fabricated using the film stacking and hot pressing technique, and the impact toughness was assessed in accordance with the ISO 179-1 standard. The findings indicated that the matrix type and reinforcement configuration substantially influence the energy absorption capability during flatwise loading. In CPP matrix composites, the carbon fiber reinforced structure (CPP_C) exhibited the maximum impact toughness at 0.17 J/mm², nearly 40% greater than the glass fiber structure (CPP_G, 0.121 J/mm²). The hybrid construction CPP_CGC exhibited a 36% increase, achieving 0.165 J/mm² relative to the glass fiber arrangement. In PET matrix composites, the maximum toughness value of 0.14 J/mm² was achieved in the hybrid PET_GCG structure, demonstrating a 25% increase in impact strength compared to PET_CGC. In the overall comparison, the CPP_C sample exhibited roughly 42% more impact toughness than PET_C. This condition demonstrates that the CPP matrix provides superior energy absorption capacity due to its ductile composition. Hybrid configurations exhibit varying effects according on the reinforcement-matrix interaction; nevertheless, impact performance can be partially enhanced even in brittle matrix systems like PET with suitable alignments. The results indicate that the matrix type and reinforcement configuration must be carefully calibrated to enhance impact strength under flatwise loading.

Keyword: Flatwise Charpy impact test, thermoplastic composites, impact toughness, fiber reinforcement, hybrid laminates, CPP, PET

1. Introduction

Thermoplastic matrix composite materials have garnered considerable interest recently owing to their benefits, including recyclability, superior impact strength, and reduced processing durations relative to thermosets. These materials are produced by reinforcing glass, carbon, basalt, or natural fibers within a thermoplastic matrix, such as polypropylene (PP), polyethylene (PE), or polyamide (PA), thereby enhancing their mechanical strength and rigidity. Thermoplastic composites are extensively utilized throughout several industries, including automotive, aerospace, and consumer goods, where lightweight and impact resistance are essential. Moreover, they provide greater flexibility in design and maintenance than thermosets because to attributes including formability and weldability.

The performance of composite materials under impact loads is a crucial indicator, particularly for load-bearing or structural applications. The Charpy impact test is commonly employed to assess the energy absorption capacity and damage tolerance of composites. Despite the extensive research on the impact behavior of thermoplastic composites, the majority of these investigations have concentrated on edgewise Charpy or drop impact testing.

This topic involves an evaluation of contemporary works in the literature regarding the flatwise Charpy impact behavior of thermoplastic matrix composites, highlighting existing research gaps.

Flatwise Charpy impact tests are a significant technique commonly employed to assess the impact strength of thermoplastic composites. Laksimi and Senthilvelan [1] indicated that augmenting the sample thickness and the number of layers in plain woven S-2 glass fiber and HDPE matrix composites markedly enhanced energy absorption, a finding corroborated by notched tests performed per ISO 179 standard. Bhudolia et al. [2] demonstrated that acrylate-based low-viscosity thermoplastic matrix enhanced the flatwise impact strength of carbon fiber reinforced composites while facilitating processing. Ramesh et al. [3] demonstrated that the inclusion of natural fibers enhanced impact performance, achieving high impact toughness while promoting environmental sustainability through the hybrid utilization of sisal, jute, and glass fibers. Trapp et al. [4] demonstrated that the production process markedly enhanced flatwise impact resistance through fiber orientation in polyamide matrix hybrid composites fabricated via the overmolding method. All tests were executed in compliance with the test protocols established in the ISO 179-1 [5] standard, highlighting the dependability and versatility of the flatwise Charpy test in assessing the impact behavior of thermoplastic composites.

Oğuz [6] demonstrates that a strength enhancement of up to 57.9% may be attained in flatwise Charpy impact tests with 2wt.% nanoclay reinforcement in carbon/aramid intraply composites, and illustrates the impact of UV aging by contrasting 450 and 900 hours. Erkliğ et al. [7] demonstrate that the addition of 0.1–0.5 wt.% graphene nanoplatelets to glass/epoxy composites markedly enhances impact toughness. Fayzulla et al. [8] demonstrated the efficacy of the hybrid configuration, achieving an 18.2% enhancement in flatwise Charpy tests for steel–glass hybrid laminates with a polyurethane matrix, corroborated by SEM investigation of the fracture mechanisms. A study on PLA glass-reinforced 3D printer filament indicated that a 10% glass fiber ratio markedly enhanced impact toughness [10], whilst a master's thesis from Konya Technical University effectively examined flatwise Charpy testing techniques and the relationship between sample thickness and notch orientation across various fiber alignments. [10] The influence of void content and post-processing techniques on flatwise Charpy findings in AFP-fabricated thermoplastic composites indicated that impact performance can be enhanced at minimal void levels. [11].

Nevertheless, research on flatwise Charpy impact tests, in which the impact is exerted perpendicularly to the laminate surface, is notably scarce. This test orientation, while simulating out-of-plane impact circumstances commonly observed in practice, has not been adequately examined for standardization, matrix selection, and fiber-matrix interactions. The flatwise impact performance of hybrid fiber systems and nanoparticle-reinforced thermoplastic constructions has not been comprehensively examined in the literature.

2. Materials and Methods

This work utilized two distinct thermoplastic matrices—cast polypropylene (CPP) and polyethylene terephthalate (PET)—for the fabrication of laminated composite plates. Superfilm

provided CPP films, whereas Eres Sentetik (Gaziantep, Turkey) supplied PET films. These matrices possess distinct physical and mechanical properties that influence the impact behavior of fiber-reinforced thermoplastics.

CPP is distinguished by its characteristics of low density, high ductility, and exceptional impact resistance, making it very appropriate for applications necessitating energy absorption and flexibility. Conversely, PET exhibits superior tensile strength, stiffness, and thermal stability; yet, its elongation at break is worse, and it is prone to brittleness under abrupt impact loading. Consequently, as validated by the experimental findings, composites fabricated with a CPP matrix have enhanced impact toughness owing to their capability for plastic deformation and energy absorption. PET matrix composites provide superior structural stiffness and tensile characteristics; yet, they exhibit a greater susceptibility to brittle fracture under abrupt loading conditions. Moreover, CPP is more readily processed at reduced temperatures and has superior chemical resistance, whereas PET's increased density leads to comparatively heavier composites. Thus, CPP is favored for applications prioritizing impact resistance and ductility, whereas PET is chosen for scenarios demanding high stiffness, strength, and thermal performance, despite potential tradeoffs in impact toughness.

Unidirectional E-glass fiber fabric (surface density: 200 g/m²) and plain woven carbon fiber fabric (surface density: 200 g/m²) served as reinforcement materials. Both fiber types were sectioned into uniform layers and utilized in both plain (single fiber) and hybrid configurations. Reinforcements were provided by Dost Kimya, located in Istanbul, Turkiye.

The thermoplastic matrix films were provided in roll format: CPP films had a nominal thickness of 60 µm, whereas PET films had a nominal thickness of 100 µm. The disparity in thickness between the matrices was intentionally selected to provide workability compatibility and to facilitate adequate resin flow and consistent fiber saturation during pressing.

Composite laminates were fabricated using film stacking and subsequent hot pressing. This technique is extensively employed in the fabrication of thermoplastic composites. Each fiber layer was positioned between two thermoplastic matrix films, and this assembly was compacted in a steel mold using a heated hydraulic press. CPP laminates were pressed at 170°C, whereas PET systems were pressed at 180°C. In both instances, heating and retention occurred for 60 minutes at a pressure of around 3 MPa. Cooling was conducted under pressure to avert delamination or the creation of voids.

Eight distinct composite sheet combinations were created.

Configurations with 12 layers of glass fibers (CPP_G, PET_G),

Configurations including 12 layers of carbon fibers (CPP_C, PET_C), Hybrid configurations:

3 glass / 6 carbon / 3 glass (CPP_GCG, PET_GCG)

3 carbon / 6 glass / 3 carbon (CPP_CGC, PET_CGC).

Each composite has 12 reinforcement layers interspersed with matrix films, resulting in a total sheet thickness ranging from roughly 2.4 mm to 4.1 mm, contingent upon the stacking sequence and matrix type. Table 1 presents a summary of the manufactured laminate combinations and their respective thicknesses. Figure 1 illustrates a schematic representation of the stacking sequence and fiber orientations of four distinct composite configurations: glass, carbon, GCG, and CGC.

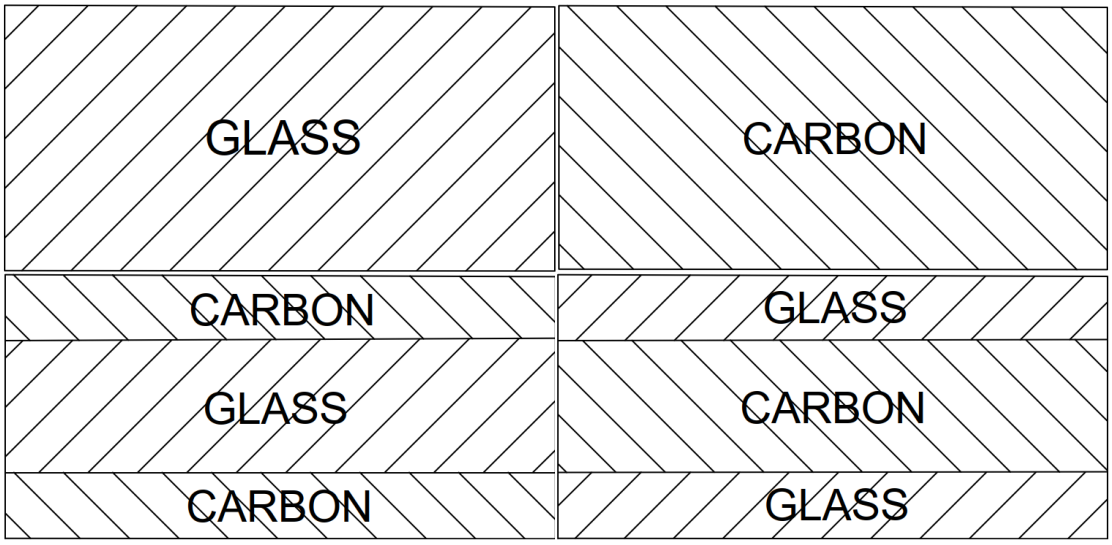


Figure1. Arrangements of Plain Carbon, Plain Glass, CGC and GCG plates.

3. Flatwise Charpy Impact Test

The impact strength of composite laminates was assessed by Charpy impact tests conducted in line with the ISO 179-1 standard, commonly utilized to evaluate the toughness characteristics of fiber-reinforced thermoplastics under dynamic loading circumstances. The testing utilized a pendulum-type Charpy impact tester (Kögel 3/70) including a 15 J capacity hammer and a calibrated analog energy indicator. Each specimen was positioned horizontally on the supports with the notched side oriented towards the hammer. An energy-based approach was utilized to assess the impact toughness post-examination. The impact toughness, denoted as a_cU, was computed using the formula:

$$a_cU = (E/bh)\, fx$$

In this formula, E represents the energy measured during the test (in joules), b signifies the specimen's width, and h indicates the thickness. A minimum of five repetition tests were conducted for each composite configuration, from which average absorbed energy and impact toughness values were derived, and standard deviations were provided to assess data dispersion.

4. Results and Discussion

Figure 2. depicts the impact toughness of specimens with a CPP matrix. The impact hardness of the plates is documented as 0.227, 0.2375, 0.269, and 0.234 J/mm² for CPP_C, CPP_CGC, CPP_GCG, and CPP_G, respectively. The CPP_GCG sample demonstrates the greatest impact toughness at around 0.269 J/mm², suggesting that the hybrid structure of glass and carbon fiber

produces a synergistic effect in energy absorption during impact. The CPP_CGC and CPP_G samples demonstrated similar outcomes (about 0.235–0.240 J/mm²), suggesting that the incorporation of carbon or glass fibers alone is less efficacious than the hybrid configuration. The CPP_C sample exhibited a reduced average impact toughness (~0.228 J/mm²) and suggested that the nature of the additive, coupled with its configuration and dispersion, profoundly affects impact resistance. The findings demonstrate that hybrid reinforcement systems improve resistance to edge impact stresses, with the internal structural synergy of the material being a crucial element in these experimental conditions.

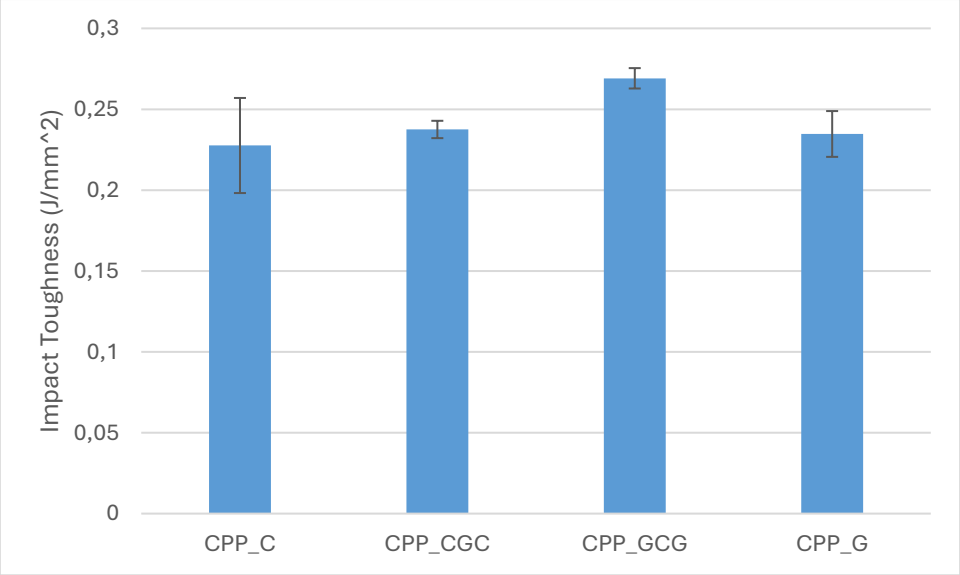


Figure 2. CPP specimens Impact Toughness Graph for Flatwise Charpy Impact Test

Figure 3. depicts the impact toughness values of unreinforced (single reinforced) and hybrid configurations of PET matrix thermoplastic composites. The impact toughness values for the samples PET_C, PET_CGC, PET_GCG, and PET_G were quantified at 0.122, 0.179, 0.171, and 0.157 J/mm², respectively. Among these samples, PET_CGC, which displays the highest impact toughness value, shows a synergistic reinforcing effect against edge impact loads by the combined application of carbon and glass fibers. The PET_GCG and PET_G samples exhibited considerable energy absorption capacity, and the use of glass fiber was observed to improve impact strength. The PET_C sample, consisting exclusively of carbon fiber, had the lowest impact toughness, suggesting that carbon fiber is less effective than glass fiber in absorbing sudden impact energy from the edge. These findings highlight the importance of hybrid reinforcement methods in improving the dynamic performance of thermoplastic composites.

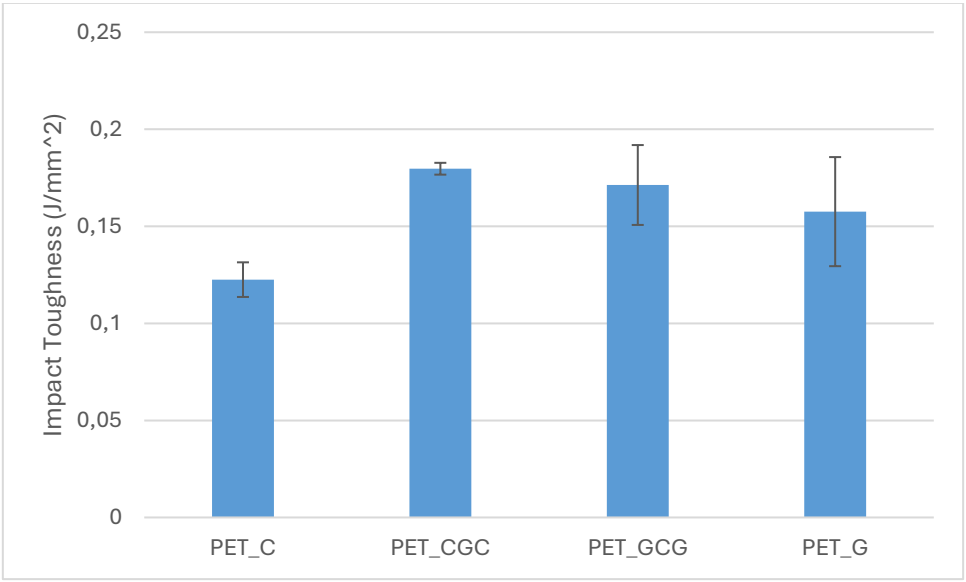


Figure 3. PET specimens Impact Toughness Graph for Flatwise Charpy Impact Test

The Flatwise Charpy impact test findings demonstrated the beneficial impact of hybrid reinforcing structures on the impact resistance of both CPP and PET matrix thermoplastic composite samples. The CPP matrix samples had a maximum impact toughness value of 0.269 J/mm² in the CPP_GCG sample, which features a hybrid structure incorporating both glass and carbon fibers. This outcome indicates that the hybrid reinforcement absorbs energy more effectively during impact. The CPP_CGC and CPP_G samples, composed solely of glass or carbon fiber, had comparable and moderate impact toughness (~0.235–0.240 J/mm²), whereas the CPP_C sample, consisting exclusively of carbon fiber, recorded the lowest result (~0.228 J/mm²). The PET_CGC sample had the greatest impact toughness value of 0.179 J/mm² among the PET matrix samples, indicating that the hybrid reinforcement conferred enhanced resistance to edge impact loads. Although PET_GCG and PET_G samples with glass fiber reinforcement demonstrated considerable energy absorption, the PET_C sample with solely carbon fiber exhibited the lowest value (0.122 J/mm²). The findings indicate that the kind and distribution of reinforcement are critical to impact resistance, with hybrid constructions demonstrating enhanced performance under impact loads.

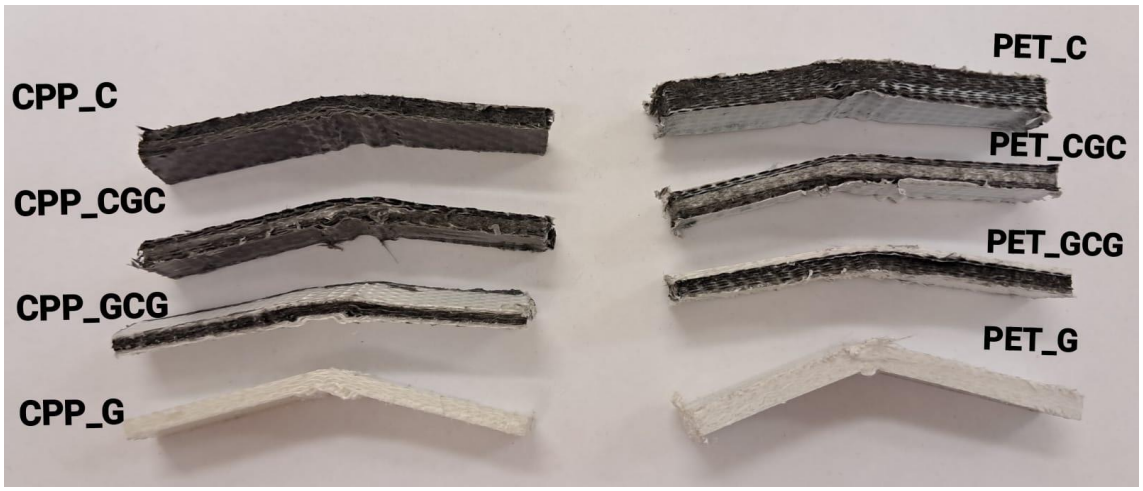


Figure 4. Specimens after Flatwise Charpy Impact Test

The image displays a comparative analysis of the fracture surfaces of CPP and PET matrix composite samples following the Flatwise Charpy impact test. The pronounced delamination and fiber pullout evident in CPP_GCG and PET_CGC samples indicate that hybrid reinforced structures more efficiently absorb impact energy. The fracture surfaces in hybrid reinforced samples exhibit a more intricate and uneven structure, whereas samples like CPP_C and PET_C, which contain solely carbon or glass fiber, display fractures along a more abrupt, linear, and sharp trajectory. This circumstance indicates that the singular reinforced samples demonstrate increased brittleness and possess a diminished ability to disperse impact energy. The fracture morphologies indicate that hybrid reinforcements positively influence impact resistance, demonstrating that the synergistic interaction within the internal structure is crucial for this enhancement.

4. Conclusions

The Flatwise Charpy impact test findings unequivocally illustrate the beneficial influence of hybrid reinforcing systems on impact resistance. Numerous studies in the literature highlight that hybrid composites incorporating both glass and carbon fibers enhance impact resistance by leveraging the benefits of each fiber type. Glass fiber is distinguished by its ductility and capacity to absorb impact energy, whereas carbon fiber offers superior rigidity and strength. The amalgamation of these distinct qualities enables the composite structure to provide a harmonious performance for both hardness and energy absorption in response to abrupt impacts [12,13]. Research has demonstrated that hybrid reinforced composites possess superior impact toughness compared to composites composed solely of glass or carbon fiber [14]. This circumstance aligns with the observation that hybrid structures exhibit more intricate fracture surfaces in our test results. Numerous studies [15] have highlighted the influence of parameters such as fiber-matrix interface, fiber orientation, and reinforcement ratio on this behavior.

References:

1. Laksimi, N. M., Senthilvelan, T., Charpy impact behavior of plain weave S-2 glass/HDPE thermoplastic composites, International Journal of Plastics Technology. 2019, 23(1), 105–113.
2. Bhudolia, S. K., Perrotey, P., Joshi, S. C., Investigation on the mechanical performance of carbon fibre composites with novel acrylate thermoplastic matrix, Composites Part B: Engineering. 2018, 134, 123–131.
3. Ramesh, M., Palanikumar, K., Reddy, K. H., Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites, Composites Part B: Engineering. 2013, 48, 1–9.
4. Trapp, M., Kopp, J., Marterer, R., Drechsler, K., Impact performance of overmoulded hybrid fibre-reinforced thermoplastic composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2020, 137, 106014.
5. International Organization for Standardization, ISO 179-1: Plastics — Determination of Charpy impact properties — Part 1: Non-instrumented impact test, ISO. 2023.
6. Oğuz, Z. A., Measurement of Charpy impact durability of intraply hybrid composites under ultraviolet light and nanoparticle reinforcement, Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM). 2024, 5(2), 316–326.

7. Erkliğ, A., Doğan, N. F., Bulut, M., Charpy impact response of glass fiber reinforced composite with nano graphene enhanced epoxy, Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2017, 5(3), 341–346.
8. Fayzulla, B., Eroğlu, M., Erkliğ, A., Effect of polyurethane matrix and steel fiber in combination with glass fiber or basalt fiber on the properties of hybrid composite laminates, Materials Testing. 2023, 65(10), 1587–1598.
9. Yazıcılar, H., Demirtaş, O., Manufacturing and mechanical properties of a glass fiber reinforced composite filament for 3D printers, ResearchGate. 2024.
10. Konya Teknik Üniversitesi, Charpy darbe test yöntemleri kullanılarak kompozit numunelerin mekanik performansları (Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi), Ulusal Tez Merkezi. n.d.
11. Smith, A., Chen, Y., Zhang, L., A study of post-processing for AFP-fabricated thermoplastic composites with void content and air permeability characterization, Composites Science and Technology. 2025, 245, 110812.
12. Jawaid, M., Thariq, M., Saba, N., Hybrid natural fiber composites: Material formulations, processing, characterization, and applications, Woodhead Publishing. 2016.
13. Sethi, S., Maheshwari, S., Sharma, R. K., Impact and flexural properties of glass/carbon fiber reinforced epoxy based hybrid composites, Materials Today: Proceedings. 2014, 1(1), 414–420.
14. Sarasini, F., Tirillò, J., Green composites based on natural fibers and bio-resins: Mechanical, thermal, and durability properties, In: Jawaid, M., Thariq, M. (Eds.), Sustainable Composites for Aerospace Applications, Woodhead Publishing. 2018, 49–83.
15. Li, Y., Mai, Y. W., Ye, L., Sisal fibre and its composites: A review of recent developments, Composites Science and Technology. 2000, 60(11), 2037–2055.
16. Stumm, W., and Melia, C.R.O. Stoichiometry of Coagulation. Jour. AWWA, **1968**, 60(5):514-539.
17. Black, A.P. Electrokinetic Characteristics of Hydrous Oxies of Aluminum and Iron. In Principles and Application of Water Chemistry. Edited by S.D. Faust and J.V. Hunter. New York: John Wiley and Sons. **1967**.
18. Johnson, P.N., and Amirtharajah A. Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants. Jour. AWWA, **1983**, 75(5):232-239

DIELECTRIC PROPERTIES OF BATIO3 HAP AND BN HA NANOCOMPOSITE A COMPARATIVE STUDY

SEHRİBAN KAYALIIK*[1], SERAP KOÇ[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Van Yüzüncü Yıl University, Van, Türkiye

Abstract

Bone tissue exhibits natural piezoelectric properties. Based on these properties, biomaterials that enhance electric signals are developed. Surface electric charges generate; ionic effects increased cell proliferation, exhibit antibacterial effects, support bone regeneration, and improve mechanical strength. This study, investigating piezoelectric properties of boron nitride (BN) and barium titanate ($BaTiO_3$) doped hydroxyapatite (HAp) matrices, and biomaterials with enhanced functional properties were produced. HAp, was produced through the sol-gel method, and composite structures containing different amounts of BN and $BaTiO_3$ were prepared. The obtained mechanical test results indicate that the composites exhibited better mechanical strength than pure HAp. The composite with 80% $BaTiO_3$ and 20% HAp showed the highest mechanical strength. XRD analysis showed a peak at 45.7°, corresponding to $BaTiO_3$, indicating its positive effect on piezoelectricity. The most suitable crystallite sizes among the $BaTiO_3$ ratios were found in the compositions with 60% and 80% by weight, with an average size calculated as 32.6 nm. According to the literature, this size corresponds to a proper nanoscale crystal. In addition to structural properties, biocompatibility positively affected piezoelectric performance. SEM analysis showed that increasing $BaTiO_3$ content decreased porosity and improved mechanical properties. Additionally, SEM images of HAp composites with 10 wt% BN showed that BN particles were homogeneously distributed within the matrix, porosity decreased, and this structural change improved mechanical strength.

Keyword: Hydroxyapatite,Bor Nitride,Barium Titanate,Dielectric Properties

GAME-BASED REHABILITATION WITH THE CWRR ROBOT: DEVELOPMENT OF A MATLAB-BASED INTERFACE

HAMİDE ASLAN [*1], MEHMET İLTERİŞ SARIGEÇİLİ [1]

[1] Çukurova University, Engineering Faculty, Mechanical Eng. Department, Adana, Türkiye

Abstract

Stroke is a common health issue that causes death, physical disability, and cognitive function loss, especially in elderly individuals. Therefore, an effective rehabilitation process plays a critical role in post-stroke recovery. However, the insufficient number of physiotherapists, patient load, and high costs make access to treatment difficult. Rehabilitation robots developed in this context offer significant contributions by reducing costs and the need for human labor. Nevertheless, the ineffectiveness of such systems in patients with low motivation necessitates user interaction involved in the therapy process. In this study, a MATLAB–Simulink-based game interface compatible with the pneumatically actuated Çukurova Wrist Rehabilitation Robot (CWRR) was developed. The developed system presents a game based on aiming a laser beam at a target object, using real-time control signals obtained from the user's wrist movements. During the exercise, target positions are dynamically determined, and encouraging visuals slide on the screen to increase motivation. The main purpose of the interface is to make the rehabilitation process more motivating, customizable, and enjoyable for the user.

Keyword: Rehabilitation, Robot, Upper Limb, Wrist, Forearm, Game Interface.

1. Introduction

Stroke is a significant and common health problem among the elderly, causing death, physical disability, and loss of brain functions. Among stroke survivors, millions experience different levels of disability and become unable to perform daily living activities independently. Caring for these individuals imposes a high and costly burden on healthcare professionals and family members. Stroke survivors need to perform rehabilitation exercises frequently and for extended periods to regain their previous physical functions. However, difficulties in accessing rehabilitation exercises may arise due to the insufficient number of physiotherapists, the large number of stroke patients, lack of equipment, and the increasing cost from the prolonged process. For these reasons, rehabilitation robots have been developed in recent years for repetitive and long-term exercises, proving useful and highly effective in reducing the physical involvement of physiotherapists and minimizing costs [1].

Motivation is considered one of the most important factors affecting the recovery process in stroke patients, as motivation and willingness directly affect the quality of physical therapy exercises. Using rehabilitation robots reduces patient-therapist interaction, so if there is no suitable entertainment and encouragement, patients get bored and lose motivation during the treatment, which directly decreases treatment quality. Implementing therapy tasks through games increases patient motivation and accordingly shortens the recovery period [2]. In this study, a rehabilitation

game with customizable exercise range and duration, which presents real-time control signals on a MATLAB-based game interface, was designed for the pneumatically actuated Çukurova Wrist Rehabilitation Robot (CWRR).

Many game interfaces have been developed in the literature for upper and lower limb physical therapy methods. Pan et al. [2] designed an interface for a robotic system performing upper limb rehabilitation movements. This interface includes four different games (fantasy piano, apple collector, whack-a-mole, and click the picture). These games use scenarios that support the user's reaction time and goal-directed movement skills. It was observed that through these games, users performed repetitive movements in a more motivating manner, positively affecting motivation and participation levels.

Özgür et al. [3] designed an upper limb rehabilitation game using Celluo robots. This Pacman-themed game is played in a physical environment on printed papers with maze patterns, where users control the robot to avoid agents (ghosts) and collect target objects (apples).

Shi et al. [4] designed three virtual reality games integrated with an upper limb exoskeleton robot: flying balloons, fun fishing, and magic ball games. The flying balloons game is designed for shoulder adduction and abduction movements. The fun fishing game is for elbow flexion and extension. The magic ball game targets multiple joint movements of the limbs.

The fruit game integrated into the upper limb rehabilitation robot RehapRoby by Erdoğan et al. [5] enables patients to perform elbow flexion/extension movements. In this game, patients control a basket using elbow movement to collect fruits and avoid rocks.

Many game interfaces developed in the literature include multiple games and complex structures, which may create limitations for individual therapy compliance. In this study, a simple interface focused on a single game theme, emphasizing user interaction and visual feedback, was designed for upper limb rehabilitation. This interface aims to increase patient motivation and support the therapy process by focusing on a specific task.

2. Materials and Methods

In this study, a game interface has been designed for the CWRR wrist and forearm rehabilitation robot with two degrees of freedom (Figure 1.). This robot enables patients to perform wrist flexion/extension, wrist radial/ulnar deviation, and forearm pronation/supination movements. The CWRR robot can be used for both right and left hands, and its angular range of motion is designed to exceed the expected range (70°-90°) in healthy individuals, with limits of +135° to -135°. The CWRR robot is mounted on a fixed base. It has a forearm support that grips the user's forearm and an elbow support that prevents axis deviations. The mechanical components of the robot include a semi-rotary pneumatic cylinder, incremental encoder, and torque sensor. The control system of the CWRR includes two pressure control valves, two pressure sensors, and a Quanser Q8 USB DAQ card. Data from the sensors are processed by control blocks within MATLAB/Simulink, producing real-time control signals. After necessary control blocks and noise filtering, the user's wrist angular position is displayed in Simulink in real-time [6]. This data is used to control the game interface designed in MATLAB–Simulink. The purpose of the developed game interface is to maintain the user's motivation during repetitive movements and enhance learning and participation in the rehabilitation process.

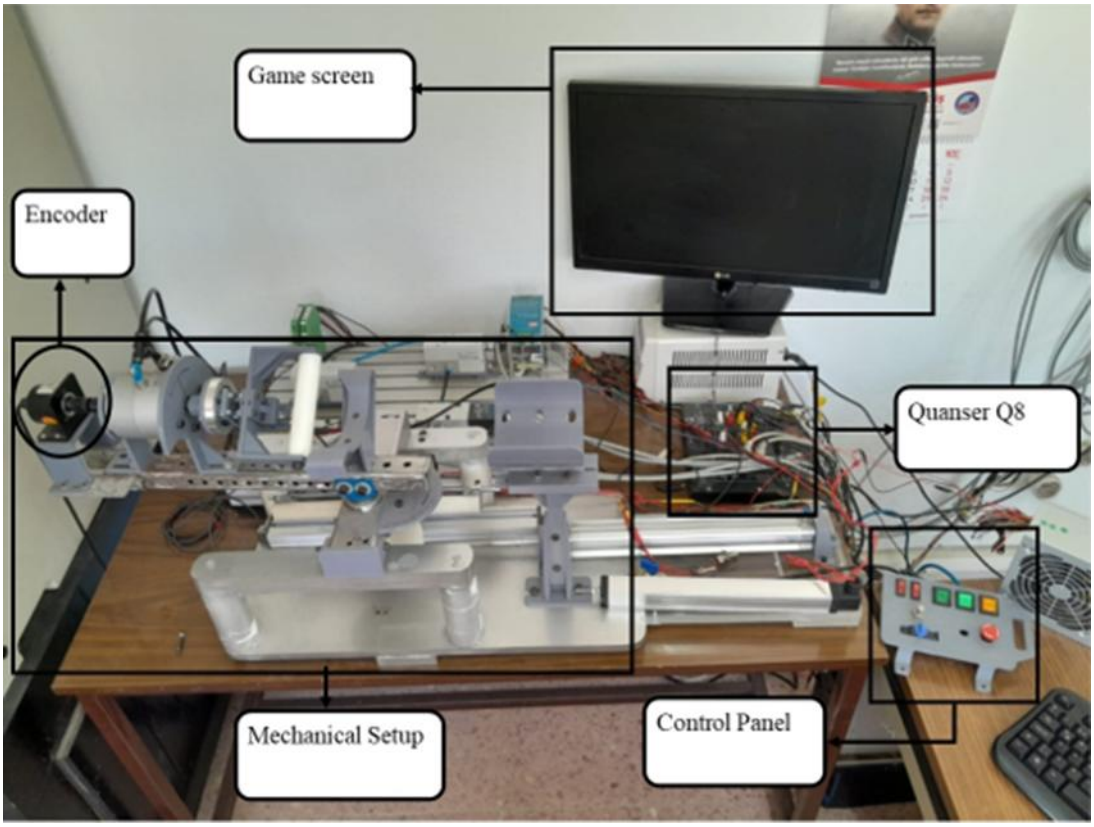


Figure 1. CWRR forearm rehabilitation robot

The design flow chart of the game is presented in Figure 2. The game consists of a laser beam and a target object. The angular data obtained from Simulink directly determines the position of the laser beam. This beam moves synchronously on the screen as the user rotates his / her wrist. The target object appears sequentially at random positions predefined by the user in the position function. This prevents targets from appearing too close to each other or at the same points, allowing the completion of exercises with better quality and larger movement ranges. Additionally, a square indicator representing the exercise duration is developed based on the required exercise time. This indicator progresses at fixed intervals and allows the user to exercise for a set period. The square, positioned at a specific location on the screen, moves as time passes, enabling the user to visually track the remaining time. When the square reaches its final position (e.g., step 10), the exercise session ends. If the user moves the laser beam onto the target within a designated tolerance range, the target "bursts," and a new target position is set at the next location. This cycle continues throughout the exercise (i.e., until the green square reaches step 10). To increase motivation, encouraging messages (e.g., "Bravo!", "You Are Doing Well", "Don't Give Up!") scroll across the top of the game screen from time to time (Figure 3). These messages are evenly spaced along a straight line and continuously move from left to right, providing visual dynamism and creating a constant morale-boosting atmosphere for the user. Thanks to all these mechanisms, the rehabilitation process is gamified, allowing the user to have fun while effectively completing the necessary exercises. Thus, the user learns the required movements through the game and completes the treatment process without boredom or loss of focus.

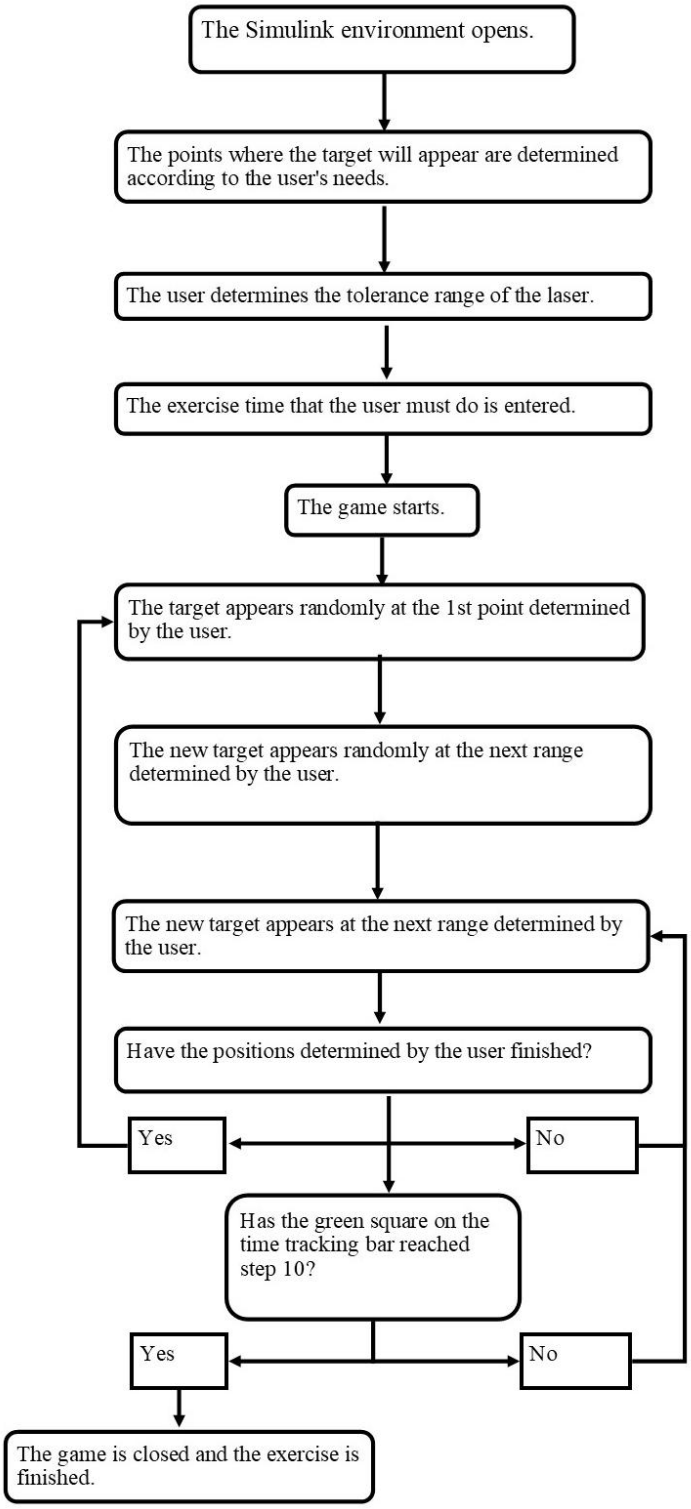


Figure 2. Schematic diagram of the interface's working principle

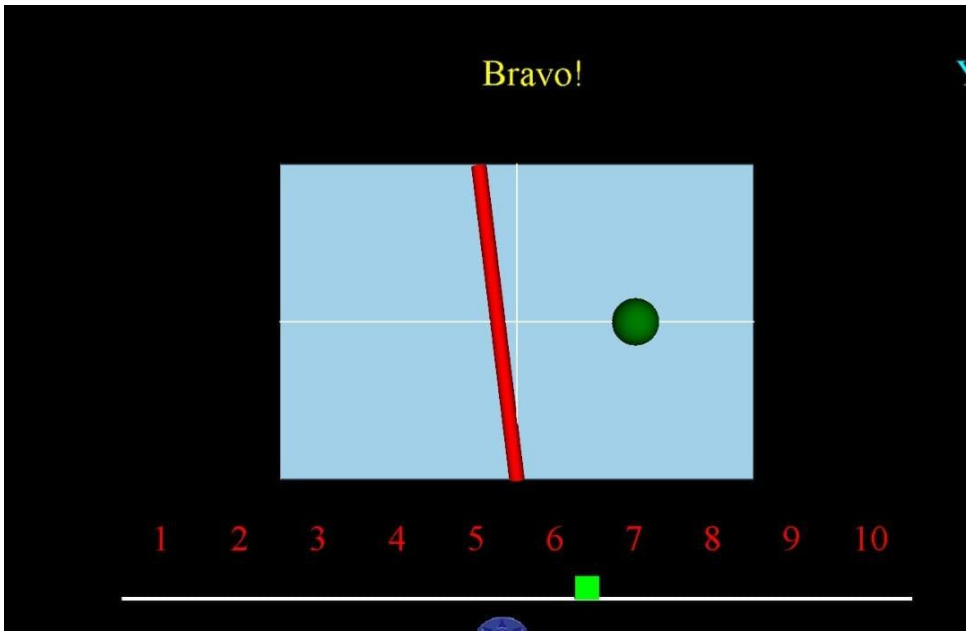


Figure 3. Visual of the game interface

3. Results and Discussion

Stroke is a disease more commonly seen in elderly individuals, often resulting in death, physical disability, and loss of brain functions. Long-term, repetitive, and frequent rehabilitation exercises are required to improve physical impairments and enable patients to regain their previous functions. However, this process is hindered by the insufficient number of therapists, the high number of patients, and the high costs, which make accessing these services difficult. Therefore, rehabilitation robots have been developed. This has reduced the need for therapists and lowered costs. However, in treatments performed with robots, the interaction between patient and therapist decreases, leading to certain motivation losses in patients. Lack of motivation can negatively affect the quality and duration of treatment. The solution to increase patients' motivation and focus is gamification of this process. Thus, the quality of therapy and the recovery process are improved. In this study, a MATLAB game interface operating with real-time control data was designed for the pneumatically actuated CWRR robot, featuring a customizable exercise range and a scoring system.

Currently, the game provides only visual feedback. It is planned to add haptic and auditory feedback as well. This will allow the user's focus to be fully on the game, and auditory feedback will further enhance motivation. Integrating such multisensory feedback is expected to make the rehabilitation process more efficient and improve its quality, thereby shortening the recovery period.

Acknowledgments: The authors gratefully thank to ÇUKUROVA University/Engineering Faculty and QUANSER for their great support and interest.

References:

1. Huq, R., Lu, E., Wang, R., and Mihailidis, A. Development of a Portable Robot and Graphical User Interface for Haptic Rehabilitation Exercise, The Fourth IEEE RAS/EMBS

International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Roma, Italy, **2012**. DOI: 10.1109/BioRob.2012.6290273

2. Pan, L., Zhao, L., Song, A., Yin, Z., and She, S. A Novel Robot-Aided Upper Limb Rehabilitation Training System Based on Multimodal Feedback, Front. Robot. AI, **2019**, 6:102. DOI: 10.3389/frobt.2019.00102
3. Ozgur, A.G., Faucon, L.P., Maceira-Elvira, P., Wessel, M.J., Johal, W., Ozgur, A., Cadic-Melchior, A., Hummel, F.C., and Dillenbourg, P. Towards an Adaptive Upper Limb Rehabilitation Game with Tangible Robots, Proc. 2019 IEEE 16th Int. Conf. Rehabil. Robot. (ICORR), Toronto, Canada, **2019**, pp. 1037–1042. DOI: 10.1109/ICORR.2019.8779425
4. Shi, P., Zheng, J., and Yu, H. A Virtual Reality Rehabilitation Training System Based on Upper Limb Exoskeleton Robot, 2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, **2018**. DOI: 10.1109/IHMSC.2018.00058
5. Erdogan, H., Palaska, Y., and Masazade, E. Vision-based game design and assessment for physical exercise in a robot-assisted rehabilitation system, The Institution of Engineering and Technology Comput. Vis., **2018**, 12(1):59–68. DOI: 10.1049/iet-cvi.2017.0122
6. Dagdelen, M., Sarigecili, M.İ., and Ozbek, N.S. A cascade fuzzy adaptive based interaction torque control of a pneumatically actuated forearm rehabilitation robot under disturbance effects, J. Mechanical Engineering Science, **2024**, 238(10):4679–4701. DOI: 10.1177/09544062231210081

DEVELOPMENT AND NUMERICAL ANALYSIS OF CORE DESIGNS TO ENHANCE FLOW PERFORMANCE IN THE GOV PROCESS

MURAT KALAK*[1], MEHMET HANİFİ DOĞRU[1], İBRAHİM GÖV[1], BURAK ŞAHİN[1], KÜRŞAD GÖV[1]

[1] Aerospace Engineering Department, Faculty of Aeronautics and Aerospace, Gaziantep University, 27310 Gaziantep, Turkey

Abstract

Although the GOV process is highly effective way for improving surface enhancement, achieving uniform and controlled flow distribution, particularly in complex internal geometries, remains a major challenge. This study focuses on the numerical analysis of specially designed flow cores to enhance flow efficiency and surface effect homogeneity of the GOV process. Based on the results of preliminary geometric flow analyses, several flow core structures were designed and modelled in CAD program. These cores were strategically positioned to guide the flow toward critical regions and ensure more homogeneity distribution. The models were analyzed using ANSYS Fluent to evaluate critical parameters such as pressure distribution, wall shear stress, and velocity profiles. Simulation results revealed that cores placed at specific positions could effectively redirect the flow either toward the center or outward, eliminating dead zones in corner regions. Additionally, some core designs improved the uniformity of surface shear distribution by balancing flow intensity. This study provides a numerical basis for flow core design in GOV process applications and contributes to the development of more efficient surface treatment methods. Future studies will focus on validating the numerical results with experimental tests.

Keyword: Flow core design, GOV process, Non-Newtonian fluid, Computational fluid dynamics (CFD)

PREDICTION OF PILOT GEOMETRY FORMS FOR NON NEWTONIAN FLUIDS IN GOV PROCESS AND NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW BEHAVIOUR

MURAT KALAK*[1], MEHMET HANİFİ DOĞRU[1], İBRAHİM GÖV[1], BURAK ŞAHİN[1], KÜRŞAD GÖV[1]

[1] Aerospace Engineering Department, Faculty of Aeronautics and Aerospace, Gaziantep University, 27310 Gaziantep, Turkey

Abstract

The GOV process is an innovative surface treatment method used to improve the surface quality of especially complex and difficult-to-reach internal surfaces. In this study, the flow behaviour of non-Newtonian media used in the GOV process in different geometries was investigated. The aim is to identify pilot geometric forms that will increase homogeneous wear and flow direction efficiency of mould surfaces and to evaluate flow behaviour over these forms. Within the scope of the study, three different pilot forms (cylindrical, square, and hexagonal) were modelled in a CAD program and prepared for analysis. CFD (Computational Fluid Dynamics) analyses were performed using ANSYS Fluent software for each form; critical parameters such as pressure distribution, wall shear stress and velocity profiles were evaluated. The GOV process media was modelled as a non-Newtonian fluid whose viscosity varies with shear rate. The findings show that the cylindrical shape provides the most homogeneous and symmetrical flow profile, while the square and hexagonal shapes exhibit significant velocity and stress differences in the corner regions. It has been concluded that these differences can cause irregularities in material removal rates, and therefore flow directing designs should be specifically designed for these regions. This study is a fundamental approach to understanding the behaviour of non-Newtonian fluids and provides a numerical analysis-based preliminary assessment for improving the efficiency of the GOV process.

Keyword: GOV process, Non-Newtonian fluid, Computational fluid dynamics (CFD), Pilot geometry forms

KALSIYUM VE MAGNEZYUM KATKILI MANYETIK SRFE O NANOPARCACIKLARI TAKVIYELI PAN TABANLI NANOFIBER URETIMI

MERT ESMEROĞLU[1], SAMET TOPAL[1], DAMLA DİLARA ÇAKIL[1], SULTAN ÖZTÜRK[1], KÜRŞAT İÇİN[1]

[1] Karadeniz Technical University, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Trabzon, Türkiye

Abstract

Bu çalışmada, kemik doku mühendisliği uygulamaları için biyouyumlu potansiyel taşıyan, manyetik ve antibakteriyel özelliklere sahip nanokompozit yapılar geliştirilmiştir. Araştırma kapsamında, $SrFe_{12}O_{19}$ (stronsiyum hekzaferrit) ve kalsiyum (Ca^{2+}) katkılı $SrFe_{12}O_{19}$ nanoparçacıkları, hidrotermal yöntemle sentezlenmiş; ardından poliakrilonitril (PAN) matrisli nanofiberlere elektrospinning tekniğiyle entegre edilmiştir. Hidrotermal sentez basamağı, kontrollü kristal büyümesi ve yüksek saflıkta nanoparçacıklar elde edilmesini sağlarken; elektrospinning, yüksek yüzey/hacim oranına sahip, gözenekli ve ince çaplı nanoliflerin oluşumuna olanak tanımıştır. Hazırlanan toz örnekler ve nanofiber matrisler, FTIR, XRD, DSC/TGA, SEM ve VSM analizleri ile kapsamlı biçimde karakterize edilmiştir. FTIR spektrumları, 540–590 cm^{-1} bölgesindeki Fe–O gerilme bantlarının belirginleşmesiyle $SrFe_{12}O_{19}$ fazının kalsinasyon sonrası kristallik düzeyinin arttığını göstermiştir. XRD desenleri, Ca katkısının altıgen hekzaferrit kafes parametrelerinde hafif daralmaya yol açtığını ve ikincil faz oluşumunun baskılandığını ortaya koymuştur. SEM görüntüleri, homojen partikül dağılımına sahip, 200–400 nm çaplı nanolif matrislerinin başarılı şekilde üretildiğini; VSM ölçümleri ise nanofiber örneklerde doygunlaşma mıknatıslanmasının 20–40 emu/g, koersivitenin 2800–3200 Oe aralığında gerçekleştiğini rapor etmiştir. DSC/TGA analizleri, Ca katkısının termal stabiliteyi iyileştirdiğini ve ferrit faz dönüşümünün 650–700 °C'de başladığını göstermiştir.

Henüz biyouyumluluk çalışmaları tamamlanmamış olmakla birlikte, elektrospun nanofiberlerin yüzey ıslanabilirliğini ve kimyasal işlevselliğini artırmak için Ca katkısının olumlu etki yaratabileceği öngörülmüştür. Bu bağlamda, ilerleyen aşamalarda MTT ve Live/Dead gibi in vitro sitotoksisite testleri; osteoblast hücre çizgileri (MG-63, MC3T3-E1) ile yapışma, proliferasyon ve diferensiyasyon analizleri planlanmaktadır. Ayrıca, nanofiberlerin antibakteriyel potansiyelini değerlendirmek üzere standardize edilmiş S. aureus ve E. coli inokülasyon testleri gerçekleştirilecektir. Biouyumluluk kriterlerine uygunluk doğrulanması halinde, özellikle kemik doku rejenerasyonu modellerinde (3D hücre kültürü ve hayvan deneyleri) uygulama aşamasına geçilmesi hedeflenmektedir.Elde edilen karakterizasyon verileri, kalsiyum katkılı $SrFe_{12}O_{19}$/PAN nanofiberlerin hem manyetik hem de yapısal açıdan ileri mühendislik uygulamalarına uygun temel özellikler sunduğunu ortaya koymuştur. Planlanan biyouyumluluk ve antibakteriyel değerlendirmeler, bu yapıları kemik doku mühendisliği için güçlü adaylar haline getirecek; sürekli

manyetik alan kontrolüyle hücre metabolizmasını ve rejenerasyon süreçlerini yönlendirme potansiyeli sağlayacaktır.

Keyword: $SrFe_{12}O_{19}$, Ca katkılı hekzaferrit, elektrospinning, nanofiber, kemik doku mühendisliği, biyouyumluluk planlaması, manyetik özellikler

THE EFFECT OF COPPER CONTENT ON THE MICROSTRUCTURE HARDNESS AND MAGNETIC PROPERTIES OF HIGH ENTROPY ALLOYS

ZEHRA MUTLU[1], MERVE GÜL TÜLEK[1], SÜMRAN BİLGİN[1], CANBERK GAMSZ[1] SULTAN ÖZTÜRK[1]

[1] Karadeniz Technical University, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Trabzon, Türkiye

Abstract

In this study, high-entropy alloys (HEAs), which stand out from conventional alloy systems due to their multi-component structures, were developed, and the effects of varying copper (Cu) content on their microstructural, mechanical, and magnetic properties were investigated. The base composition of the alloys consists of Aluminium (Al), Cobalt (Co), Titanium (Ti), Iron (Fe), Nickel (Ni), and Niobium (Nb). While the ratios of all other elements were kept constant, only the Cu content was altered in different proportions, and the effects of this variation were comparatively evaluated.

The alloy production process was carried out using powder metallurgy techniques. In the initial stage, high-purity metallic powders were precisely weighed in appropriate ratios and mixed to obtain a homogeneous mixture through mechanical alloying (ball milling). The blended powders were compacted via cold pressing and then melted using arc melting under a vacuum atmosphere to produce dense and homogeneous HEA samples.

Various characterization tests were conducted on the obtained alloy specimens. Microstructural analyses were performed using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM), while elemental distribution was examined through energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). To determine the mechanical properties, Vickers microhardness tests were applied, and magnetic behavior was evaluated using a vibrating sample magnetometer (VSM). The effects of copper content variation on microstructural homogeneity, phase stability, and physical properties of the alloys are currently being analyzed. The findings are expected to demonstrate that customized material design can be achieved in HEAs through the substitution of a single element and to contribute to the limited existing literature on this topic. In this context, the study aims to shed light on new material development processes from both academic and industrial perspectives.

Keyword: High-entropy alloys, Copper content, Microstructure, Magnetic properties

MYRTUS COMMUNIS L. YAPRAKLARINDAN BİYOAKTİF BİLEŞİKLERİN EKSTRAKSİYONU İÇİN UYGUN KOLİN KLORÜR TABANLI DERİN ÖTEKTİK ÇÖZÜCÜLERİN SEÇİMİ

EZGİ KALKAN*[1], MEDENİ MASKAN[1]

[1]Food Engineering Department, Engineering Faculty, Gaziantep University, 27310, Şehitkamil, Gaziantep, Türkiye

Özet

Myrtus communis L., Myrtaceae familyasına ait yenilebilir bir tıbbi bitkidir ve meyveleriyle birlikte birçok bilim insanı ile geleneksel tedavi uygulayıcısının ilgisini çekmiştir. Son yıllarda, tıbbi bitkiler; gıda, kozmetik ve farmasötik sektörlerinde antioksidan potansiyele sahip polifenoller gibi biyoaktif bileşiklerin mükemmel bir kaynağı olarak büyük ilgi görmektedir. Bu çalışma, Myrtus communis L. yapraklarındaki biyoaktif bileşenlerin çevre dostu ve yenilikçi derin ötektik çözücüler (DES) kullanılarak ekstrakte edilmesini amaçlamaktadır. Literatürde, Myrtus communis L. yapraklarındaki biyoaktif bileşiklerin DES'ler aracılığıyla stabilitesi ve korunma kapasitesi üzerine herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. En uygun DES kombinasyonları, toplam fenolik madde miktarı ve radikal süpürme aktivitesi (RSA) yöntemiyle belirlenen antioksidan kapasiteye göre taranmıştır. Bu çalışma, geleneksel organik çözücüler kullanılmadan biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonunu maksimize etmek için yeşil, güvenli ve ekonomik bir yaklaşım sunmakta olup, doğrudan gıda formülasyonlarında kullanılabilecek doğal antioksidanların elde edilmesini sağlamaktadır.

Anahtar Kelime: Derin ötektik çözücü, Myrtus communis, Ekstraksiyon, Fenolik bileşikler

THERMAL OXIDATION AND ANODISATION OF ZINC FOR CORROSION APPLICATION

ABDULCABBAR YAVUZ[1], ABDULRAHMAN ALHAJ OMAR[1]

[1]Department of Metallurgical and Materials Engineering, Gaziantep University, Sehitkamil 27310, Türkiye

Abstract

This work investigates the corrosion resistance of zinc treated with different surface treatments, including thermal oxidation and anodisation. Zinc samples were subjected to oxidation (anodisation) in Reline solution for different periods (1, 3, and 10 min) by the application of 5 V. Additionally Zn electrodes were subjected to heat treatment at 200 °C and 300 °C for 30 minutes. Electrochemical tests, using cyclic polarization, were performed in both potassium hydroxide (KOH) and sodium chloride (NaCl) solutions to evaluate corrosion resistance of modified electrodes. The results showed that the duration of oxidation did not significantly affect corrosion resistance, as shorter periods showed improved resistance, while the heat treatment temperature showed varying effects on corrosion behavior. On the other hand, because of the imperfections and structural abnormalities present, zinc generated through thermal oxidation exhibited a higher rate of corrosion. Furthermore, comparative analysis between KOH and NaCl solutions highlighted the distinct corrosion mechanisms under alkaline and saline conditions. By determining the most effective processing parameters, industries that rely on zinc materials can develop strategies to stop corrosion and improve product life. In addition, the study emphasizes the importance of taking analytical environments into account in corrosion studies, as different conditions can significantly affect material performance. Overall, this research advances knowledge in the science of zinc corrosion and provides practical implications for industries seeking to enhance corrosion resistance in zinc-based products, thereby enhancing sustainability and reliability in diverse industrial sectors.

Keyword: Zinc Corrosion, Anodization, Heat Treatment, Cyclic Polarization, Corrosion Rate, Electrochemical Performance

ELECTROCHEMICAL AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF INDIUM BASED ALLOY COATED FLEXIBLE ELECTRODES IN IONIC LIQUID ELECTROLYTE FOR ENERGY STORAGE APPLICATIONS

ABDULCABBAR YAVUZ*[1], METİN BEDİR[1]

[1]Department of Metallurgical and Materials Engineering, Gaziantep University, Sehitkamil 27310, Türkiye

Abstract

Flexible energy storage devices are gaining considerable attention due to their potential to power next-generation wearable and portable electronics. The development of mechanically compliant, thermally stable, and electrochemically efficient electrodes is critical for advancing this field. In this study, a graphite-based flexible substrate was used as the current collector for the deposition of an indium-based alloy via electrochemical growth under varying conditions. An ionic liquid electrolyte was employed to enable stable and wide electrochemical windows, enhanced thermal stability, and minimized volatility, which are crucial for flexible device applications. The electrochemical deposition was performed under multiple growth potentials, and temperatures were varied to examine their role in alloy formation kinetics and interfacial properties. The deposited indium-based alloy films were characterized using a combination of spectroscopic, surface, and structural techniques. These analyses revealed significant changes in surface roughness, phase formation, and particle distribution as a function of both potential and temperature. The electrochemical behavior of the alloy-coated flexible electrodes was evaluated using cyclic voltammetry at various scan rates. The results showed distinct redox features, good reversibility, and scan rate-dependent electron transfer behavior. The contribution of pseudocapacitance and diffusion-controlled mechanisms was analyzed based on the CV response, demonstrating the potential of the system for application in flexible energy storage systems. This study highlights the synergistic role of indium-based alloys, ionic liquid electrolytes, and flexible graphite substrates in achieving high-performance, thermally stable, and mechanically adaptable energy storage components. The findings provide valuable insights into tuning deposition parameters and understanding structure–performance relationships in flexible electrode materials.

Keyword: Flexible electrodes, Indium-based alloy, Ionic liquid electrolyte, Electrochemical deposition, Cyclic voltammetry, Energy storage devices

APPLICATION OF NATURAL DEEP EUTECTIC SOLVENT FOR COTTONSEED OIL EXTRACTION PROCESS AN EFFICIENT ALTERNATIVE TO HEXANE

EZGİ KALKAN*[1], MEDENİ MASKAN[1]

[1]Food Engineering Department, Engineering Faculty, Gaziantep University, 27310, Şehitkamil, Gaziantep, Türkiye

Abstract

In the present study, natural deep eutectic solvents (NADESs) were incorporated, for the first time, into the ultrasound-assisted cottonseed oil extraction process. While the application of NADES in the extraction of phenolic compounds from agro-food by-products has been well-documented, there is a lack of information regarding its use in oil extraction. In the oil industry, hexane, a toxic petroleum-derived solvent, is commonly employed to improve oil efficiency, despite its serious environmental and health problems. Therefore, combining NADES with ultrasound-assisted extraction offers several advantages over conventional methods and solvents, including biodegradability, non-volatility, non-flammability, ease of removal, improved oil yield, reduced solvent consumption, and higher product quality. D-optimal mixture design was employed for the first time to investigate the influence of solvent composition of NADESs, water, and ethyl acetate on the oil recovery from cottonseed. The effects of the independent variables on the response were visualized using Piepel's trace plot, 2D ternary contour plots, and 3D surface plots. The highest oil recovery (90.68%) was achieved with a mixture containing 20% NADES, 20% water, and 60% ethyl acetate. The result showed that NADESs exhibited outstanding ability of increasing oil efficiency. Furthermore, FTIR analysis confirmed the purity of the oil extracted with NADESs by demonstrating complete spectral overlap with hexane-extracted oil. The present work introduced an innovative approach to oil extraction that not only aligns fully with the principles of green chemistry and technology but also offered a safer, more economical, and more efficient alternative for the oil industry.

Keyword: Natural deep eutectic solvent, Cottonseed oil, Oil recovery, Ultrasound

IMPACT OF Fe AND Co ADDITIONS ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOYS: A MOLECULAR DYNAMICS STUDY UNDER HIGH STRAIN RATE

HAMİT ALİ REİS [*1], KAAN GÖRKEM ELRİ [1], BÜLENT ÖZTÜRK[1], RAŞİT SEZER[1]

[1] Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, Trabzon, Türkiye

Abstract

Shape memory alloys (SMAs), particularly NiTi-based systems, exhibit unique functional properties such as the shape memory effect and superelasticity due to reversible phase transformations. However, their application is limited by functional fatigue and degradation under cyclic loading, especially in doped and high-entropy variants. This study investigates the effects of Fe and Co additions on the mechanical behavior of NiTi alloys using molecular dynamics (MD) simulations. A series of uniaxial tensile tests was performed on nanostructured NiTi systems with 2–8 at. % substitution of Ni by Fe or Co using the LAMMPS simulation package and a MEAM potential. Simulations were conducted at 1 K with high strain rates to observe stress – engineering strain behavior and quantify changes in elastic modulus, ultimate tensile strength (UTS), and engineering strain at failure. The results showed that Fe doping led to a reduction in UTS and ductility with minimal change in stiffness, suggesting degradation in phase stability and transformation capacity. In contrast, Co additions increased the elastic modulus significantly, indicating enhanced lattice stiffness, but also caused moderate reductions in both UTS and ductility. These findings are consistent with literature reports linking Fe to the formation of brittle secondary phases and Co to stabilization of the austenite structure. The study confirms a trade-off between strength, stiffness, and ductility when doping NiTi with transition metals, emphasizing the importance of composition control in alloy design. While limitations exist due to simulation scale and strain rates, this study provides atomistic insights into dopant effects and offers a foundation for future multiscale studies aimed at optimizing the performance of NiTi-based shape memory alloys (SMAs) in advanced applications.

Keyword: NiTi, shape memory alloy, molecular dynamics, lammps, tensile testing,

1. Introduction

Shape memory alloys (SMAs) are a class of materials capable of recovering their original shape after deformation through a reversible phase transformation between martensitic and austenitic structures, known as the shape memory effect [1, 2]. Among them, nickel-titanium (NiTi) alloys are the most widely studied due to their superior mechanical properties, biocompatibility, and corrosion resistance, which make them suitable for diverse applications in biomedical, aerospace, and automotive fields [3–7].

NiTi, recognized for its unique functionalities, exhibits outstanding mechanical performance primarily attributed to its ability to undergo reversible phase transformations between austenite

and martensite, enabling phenomena such as super elasticity and the shape memory effect [8, 9]. These transformations allow the alloy to withstand strains up to 8% without permanent deformation, which is particularly valuable in biomedical implants [8, 10, 11]. Despite these advantages, the alloy's mechanical behavior is strongly influenced by its phase stability. NiTi generally exists in three crystallographic phases, namely austenite, twinned martensite and detwinned martensite, each providing distinct mechanical responses [12]. External stimuli such as stress and temperature can induce phase transitions that, under prolonged or extreme conditions, may lead to property degradation and fatigue [13, 14].

Despite the broad application potential of NiTi shape memory alloys (SMAs), the development of reliable and scalable components remains hindered by several critical limitations. One of the most fundamental challenges is their functional stability under cyclic loading; while transformations are expected to proceed with minimal irreversibility, repeated cycling drives microstructural evolution toward fatigue-like behavior and progressive performance degradation [15]. This issue manifests as both structural fatigue, involving crack initiation and propagation, and functional fatigue, encompassing transformation pathway evolution, detwinning, and reversible plasticity, all of which significantly constrain device lifetimes [15]. Moreover, the transformation temperatures and hysteresis behavior of NiTi are highly sensitive to chemical composition and thermo-mechanical history, with precipitate formation and thermal treatments playing a decisive role in phase stability [16]. In addition, microstructural inclusions and heterogeneities act as local stress concentrators or misfit regions that accelerate fatigue crack initiation and growth, further undermining the reliability of NiTi alloys [17].

To address these limitations, several studies have explored alloying strategies aimed at tailoring NiTi's transformation behavior, fatigue resistance, and high-temperature performance. Among these, Cu has been widely used to adjust transformation temperatures and reduce thermal hysteresis, thereby enabling application-specific actuation responses and improved elastocaloric stability [18–20]. Nb additions have been shown to enhance high-temperature functionality and mechanical robustness, with NiTiNb foams offering attractive combinations of strength, ductility, and recoverable strain for biomedical and soft-robotic applications [21, 22]. Fe has been investigated primarily to elucidate its substitution behavior at Ni or Ti sites, influencing local chemistry and phase stability, with implications for long-term shape memory and super elastic performance [23]. More recently, Co has gained attention, particularly in multi-component and high-entropy NiTiX systems, where its incorporation has been associated with reduced hysteresis, improved damping, and enhanced functional fatigue resistance, albeit with significant challenges in phase control and manufacturability [24]. Collectively, these alloying efforts highlight that linking composition to processing and microstructure is essential to achieve predictable transformation characteristics, minimized hysteresis, and reliable cyclic stability in NiTi-based devices.

The existing literature on NiTi shape memory alloys (SMAs) has primarily concentrated on experimental and processing-oriented studies aimed at quantifying actuation, damping, and fatigue performance at the device and manufacturing level, while comparatively fewer investigations have addressed the underlying atomistic mechanisms. For instance, reviews of NiTi-Cu alloys produced via powder-sintering-based additive manufacturing highlight persistent processing challenges, such as high thermal gradients, residual stresses, and non-uniform phase distributions, that compromise the reproducibility and reliability of fusion-based components [18]. Similarly, extensive experimental work has examined transformation temperatures, hysteresis, and cyclic

responses in Cu,F-containing NiTi systems, emphasizing the pronounced influence of composition, geometry, and processing conditions on thermo-mechanical behavior [16, 24, 25]. In contrast, the atomistic mechanisms that fundamentally govern actuation and fatigue, particularly dislocation behavior, phase stability, and defect interactions, remain insufficiently understood, especially under cyclic loading and in doped variants. Related studies on dislocation dynamics in concentrated solid solution Ni-based alloys have demonstrated the strong correlation between dislocation activity and mechanical response [26], while atomistic simulations of SME and SE in nano-porous NiTi have revealed the critical role of microstructural features in shaping transformation kinetics and stress–strain behavior [27]. Although density functional theory (DFT) studies have provided valuable insights into NiTi phase stability and local chemistry [28], there remains a significant absence of systematic molecular dynamics (MD) investigations addressing how dopants such as Co and Fe influence the mechanical response of NiTi across varying temperatures, strain conditions, and cyclic regimes. This gap is particularly relevant as high-entropy NiTiX systems incorporating these elements are being explored to expand the functional design space [24]. Bridging this knowledge deficit is critical for predictive design and reliability assessments, as addressing functional fatigue, transformation pathway stability, and dopant–microstructure interactions in NiTi requires comprehensive atomistic quantification under operational conditions [29, 30].

Building on these findings, the present study addresses the identified gap by focusing on the effect of Co and Fe addition on the mechanical behavior of NiTi alloys using molecular dynamics simulations. While the resolution and scale of the simulations are limited by available computational resources, the results provide valuable preliminary insights into dislocation mechanisms, deformation pathways, and phase stability. Accordingly, this work should be regarded as a preliminary study, offering a foundation for future, higher-resolution investigations that can more comprehensively quantify dopant effects under diverse loading and thermal conditions. In this way, the study complements experimental observations in the literature, highlights key atomistic trends, and points toward directions for more advanced simulation-driven design efforts.

2. Materials and Methods

Molecular dynamics simulations were performed using the Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS) [31] to investigate the tensile behavior of NiTi-based nanowires under periodic boundary conditions. The initial structure consisted of a 20×20×20-unit cell lattice B2 NiTi lattice (Figure 1). To investigate the effects of alloying, separate sets of simulations were carried out in which nickel (Ni) atoms were replaced by iron (Fe) or cobalt (Co) at concentrations of 2%, 4%, 6%, and 8% of the total number of atoms, generating distinct NiTi-Fe and NiTi-Co compositions. Only Ni atoms were substituted, while Ti atoms remained unchanged. Interatomic interactions were described using the modified embedded atom method (MEAM) potential parameterized by Sharifi and Wick [32], which reproduces key mechanical properties including elastic constants, dislocation dynamics, and defect energetics, though it was not optimized for temperature-dependent properties such as thermal conductivity or thermal expansion. The nanowire was divided into three regions: two fixed end layers to anchor the wire during uniaxial stretching, and a central deformable section where atoms evolved dynamically under applied strain. Simulations were carried out in metal units with a 0.005 ps timestep, and initial velocities were assigned according to a Maxwell–Boltzmann distribution at 1 K, with zero net linear momentum. Before deformation, all systems were equilibrated for 100-time steps under an NPT ensemble at 1 K and 1 bar using the Nose–Hoover thermostat and barostat [33] with

damping parameters of 0.5 ps and 5 ps, respectively, ensuring relaxation of initial stresses. Following equilibration, the simulation cell was reset and subjected to uniaxial tensile loading along the x-direction at a constant engineering strain rate of 0.01 ps^{-1} using the fix deform command with remap x, which enforces an affine transformation of atomic positions consistent with the deforming simulation box. Atomic dynamics during deformation were integrated using the NVT ensemble with the Nose–Hoover thermostat [33] to maintain constant temperature. Structural and energetic data, including per-atom kinetic and potential energies and common neighbor analysis, were recorded at regular intervals in CFG format for visualization, while macroscopic stress and lattice dimensions were monitored from the pressure tensor and simulation box, respectively.

The tensile testing strain rate of 0.01 ps^{-1} applied to the NiTi alloy is intentionally high to examine the effect of Fe and Co doping on the mechanical behavior. Although these strain rates exceed typical service conditions, they allow for accelerated evaluation of the material's mechanical response within the limited timescales of molecular dynamics simulations. Using elevated strain rates ensures that stress–strain curves can be obtained efficiently and that trends in ultimate tensile strength with different doping elements are clearly visible. This approach is consistent with prior computational studies, facilitating reliable comparison of UTS values across alloy variations.

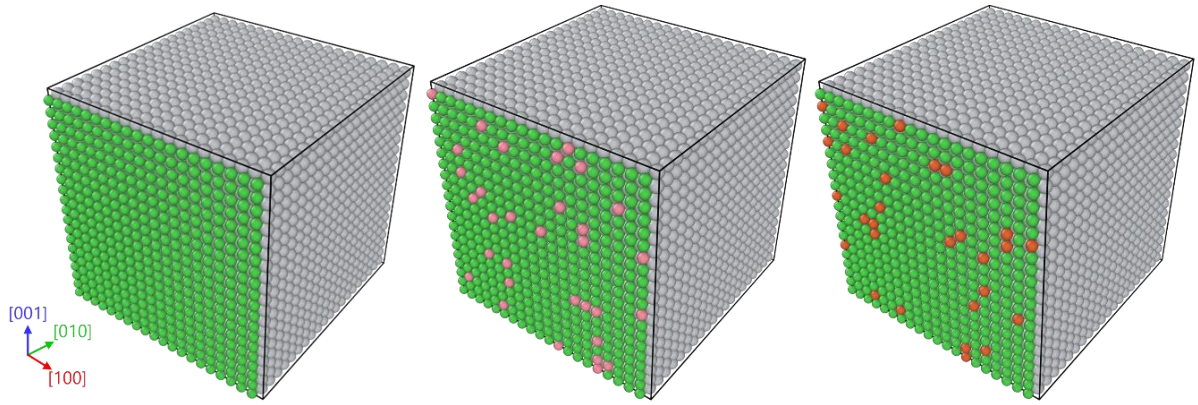


Figure 1. Atomic model of a 20 × 20 × 20-unit cells of NiTi shape memory nanocube with a B2 (CsCl-type) cubic lattice structure, illustrating the ordered arrangement of atoms. Ni atoms are shown in green, Ti in grey, Co in pink, and Fe in red. A 4% substitution of Ni by Co and Fe is included as an example.

3. Results and Discussion

The tensile behavior of NiTi (SMAs) with Fe and Co additions was evaluated under monotonic loading. Figure 2 compares the stress–engineering strain response of the pure alloy with Fe additions (2–8 at%), while Figure 3 shows the corresponding curves for Co doping. Table 1 summarizes the mechanical properties extracted from the stress–engineering strain curves.

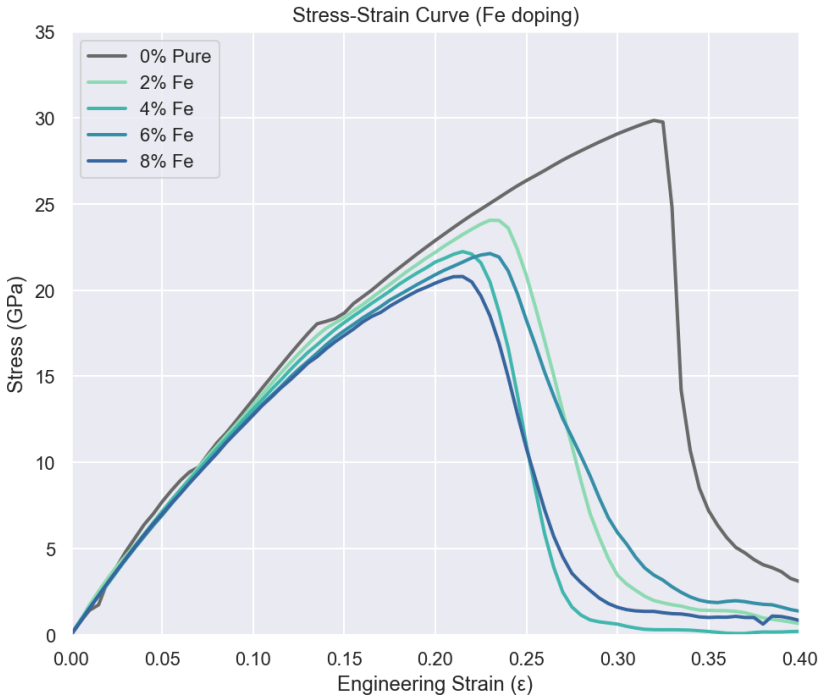


Figure 2. Stress–Engineering Strain curve of 2, 4, 6, and 8 at. % Fe addition to NiTi shape memory alloy

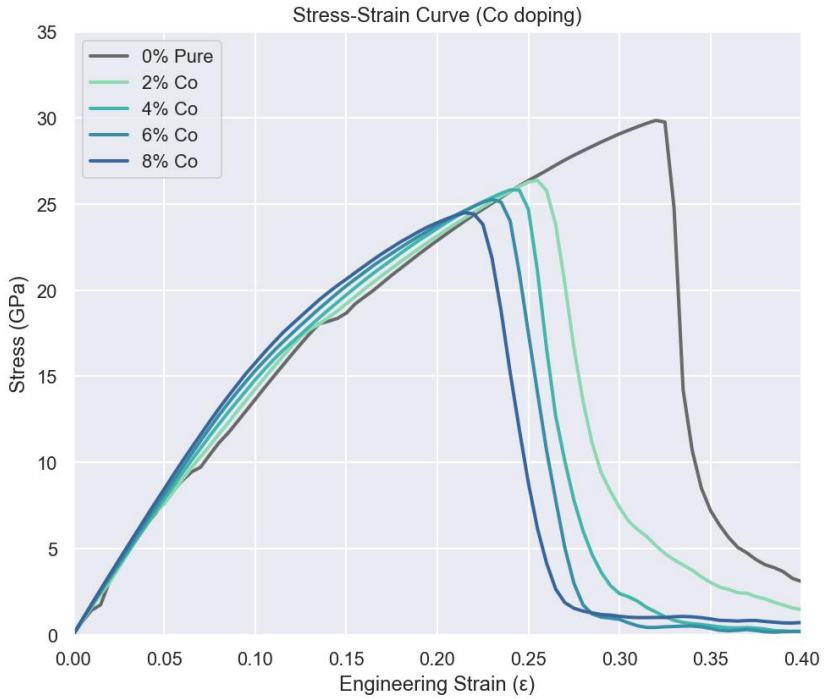


Figure 3. Stress–Engineering Strain curve of 2, 4, 6, and 8 at. % Co addition to NiTi shape memory alloy

Table 1. Mechanical properties derived from the stress–engineering strain curves

Alloy	Elastic Modulus (GPa)	Ultimate Tensile Stress (GPa)	Engineering Strain at UTS
0% - NiTi	141.84	29.85	0.32
2 % - Co	158.89	26.37	0.25
4 % - Co	165.98	25.82	0.24
6 % - Co	169.89	25.26	0.23
8 % - Co	178.17	24.50	0.21
2 % - Fe	174.35	24.06	0.23
4 % - Fe	157.45	22.24	0.22
6 % - Fe	151.39	22.12	0.23
8 % - Fe	146.59	20.79	0.22

All simulations were performed at the lowest accessible temperature to minimize thermal effects, which resulted in brittle fracture for all alloys. Because only monotonic loading was applied, neither hysteresis nor strain recovery was present, and the shape memory effect was not observed. As expected for atomistic simulations, stress increased with strain until the UTS, after which a sharp drop marked fracture. Strain continued to accumulate beyond this point due to imposed box deformation, but with negligible stress, reflecting the separation of atomic fragments rather than true plastic deformation.

Fe-doped NiTi exhibited a systematic loss of tensile strength, with UTS decreasing from ~24 GPa at 2 at% to ~20 GPa at 8 at%. The strain at UTS also fell markedly compared to the undoped alloy, while the elastic modulus remained nearly constant. This indicates that Fe additions mainly degrade strength and ductility. In literature, the drop of UTS and ductility with increasing Fe content is attributed to the destabilization of martensitic structure. Since the ability to undergo phase transformation is reduced, it leads to a drop in strength and ductility boundaries [34, 35]. Fe has been reported to promote the formation of Ti_2Ni intermetallics at grain boundaries [35], however, this cannot be observed in this study, as a single-crystal nanocube structure is being simulated.

By contrast, Co doping increased the elastic modulus significantly, from ~159 GPa at 2 at% to ~178 GPa at 8 at%, indicating stiffening of the B2 austenite lattice. However, this gain in stiffness was accompanied by a moderate decrease in UTS and a steady reduction in strain at UTS. These results agree with prior findings that Co stabilizes the austenite phase and raises transformation stresses, thereby enhancing rigidity but narrowing the recoverable strain window. The results were also supported with experimental and computational studies [36–38], which report that the addition of Co increases the elastic modulus, thereby enhancing stiffness. These studies also show that improvements are often linked to reductions in ductility and strength. These observations are consistent with the present simulation results.

From a design perspective, these trends highlight the trade-offs inherent in doping strategies for NiTi-based SMAs. Co-doping may be advantageous in applications requiring enhanced stiffness and dimensional stability, such as micro-actuators or precision medical devices, provided that reduced ductility can be tolerated. In contrast, Fe additions appear less beneficial for load-bearing applications, as the accompanying loss of strength and strain capacity outweighs the limited gains in stiffness. Tailoring the composition of NiTi thus requires balancing stiffness enhancement against the preservation of strength and functional strain, depending on the intended application.

4. Conclusions

Molecular dynamics simulations using LAMMPS have been instrumental in studying the mechanical properties of Fe- and Co-doped NiTi alloys. However, results often differ from experimental data due to limitations such as the choice of interatomic potentials and the assumptions inherent in MD simulations, including periodic boundary conditions and idealized atomic arrangements [32, 39, 40].

Discrepancies can also occur due to variations in temperature and strain rates, as simulations often run at high strain rates and low temperatures, which might lead to an overestimation of strength. Despite these challenges, MD simulations provide valuable atomic-scale insights and allow exploration of compositions and conditions difficult to achieve experimentally [40].

Fe and Co doping significantly affects the tensile properties of NiTi alloys, influencing strength and stiffness through microstructural modifications such as secondary phase formation and solid solution strengthening. Understanding these effects is key to tailoring NiTi alloys for specific applications. Future studies could investigate shape memory behavior at lower strain rates and larger simulation boxes to capture detailed microstructural evolutions.

Acknowledgments: The authors declare that no external funding was received for this study and no additional assistance was provided. AI-assisted tools are used for language refinement, formatting suggestions, and improving clarity. All content has been critically reviewed, verified, and finalized by the authors to ensure accuracy, originality, and responsibility for the submitted work.

References:

1. Xiong Y, Huang J, Shu RZ (2021) Combined braking performance of shape memory alloy and magnetorheological fluid. J Theor Appl Mech 355–368
2. Petrini L, Migliavacca F (2011) Biomedical Applications of Shape Memory Alloys. J Metall 2011:1–15
3. Zhou L, Lan J, Liu J, Li X, Shi B, Zheng S (2019) Effect of Gradient Heat Treatment on Microstructure and Properties of Cu–Al–Mn Shape Memory Alloy. Materials 12:2505
4. Chang W-S, Araki Y (2016) Use of shape-memory alloys in construction: a critical review. Proc Inst Civ Eng - Civ Eng 169:87–95
5. Sun F, Feng X, Wang H, Cao X, Liu X, Liu Y, Li Y, Liu Z, Yi X (2023) Brief Overview of Functionally Graded NiTi-Based Shape Memory Alloys. Adv Eng Mater 25:2201434
6. Liu Q, Yin XQ, Duan B, Shong SY, Feng YR (2011) Study on Hot Deformation Behavior of TiNiFe Shape Memory Alloy. Adv Mater Res 393–395:312–318
7. Hannula SP, Söderberg O, Jämsä T, Lindroos VK (2006) Shape Memory Alloys for Biomedical Applications. pp 109–118
8. Bansiddhi A, Sargeant TD, Stupp SI, Dunand DC (2008) Porous NiTi for bone implants: A review. Acta Biomater 4:773–782
9. Shi XB, Cui LS, Jiang DQ, Guo FM, Yu MY (2014) Nanocrystalline NiTi shape memory alloys with huge superelasticity and high mechanical damping. Mater Res Innov 18:S4-578-S4-583
10. Li L, Li Q, Zhang F (2011) One-Dimensional Constitutive Model of Shape Memory Alloy with an Empirical Kinetics Equation. J Metall 2011:1–14
11. Haberland C, Elahinia M, Walker JM, Meier H, Frenzel J (2014) On the development of high quality NiTi shape memory and pseudoelastic parts by additive manufacturing. Smart Mater Struct 23:104002
12. Shi Z, Wang J, Wang Z, Qiao Y, Xiong T, Zheng Y (2018) Cavitation Erosion and Jet Impingement Erosion Behavior of the NiTi Coating Produced by Air Plasma Spraying. Coatings 8:346
13. Wang X, Kustov S, Van Humbeeck J (2018) A Short Review on the Microstructure, Transformation Behavior and Functional Properties of NiTi Shape Memory Alloys Fabricated by Selective Laser Melting. Materials 11:1683
14. Sun Y, Yu Z, Liu Q, Ren L, Zhao X, Wang J (2025) The Anisotropic Osteoinductive Capacity of a Nickel–Titanium Alloy Fabricated Through Laser Powder Bed Fusion. Int J Mol Sci 26:4640

15. Frenzel J (2020) On the Importance of Structural and Functional Fatigue in Shape Memory Technology. Shape Mem Superelasticity 6:213–222
16. Rowolt C, Milkereit B, Broer J, Springer A, Kessler O (2021) Continuous Heating Dissolution and Continuous Cooling Precipitation Diagrams of a Nickel-Titanium Shape Memory Alloy. Shape Mem Superelasticity 7:541–549
17. Koschella K, Degel C, Hempel P (2023) Numerical Investigation on the Effect of Inclusions on the Local Fatigue Strain in Superelastic NiTi Alloy. Shape Mem Superelasticity 9:74–86
18. Behvar A, Sojoodi M, Celebi A, Elahinia M (2025) Insights into the Future of Manufacturing and Designing NiTi-Cu Shape Memory Alloys with Powder Sintering-Based Process Binder Jet Additive Manufacturing: A Short Review. Shape Mem Superelasticity. https://doi.org/10.1007/s40830-025-00538-9
19. Bechtold C, Chluba C, Zamponi C, Quandt E, De Miranda RL (2019) Fabrication and Characterization of Freestanding NiTi Based Thin Film Materials for Shape Memory Micro-actuator Applications. Shape Mem Superelasticity 5:327–335
20. Gil FJ, Planell JA (1999) Effect of copper addition on the superelastic behavior of Ni-Ti shape memory alloys for orthodontic applications. J Biomed Mater Res 48:682–688
21. Bansiddhi A, Dunand DC (2009) Shape-memory NiTi–Nb foams. J Mater Res 24:2107–2117
22. Hamilton RF, Lanba A, Ozbulut OE, Tittmann BR (2015) Shape Memory Effect in Cast Versus Deformation-Processed NiTiNb Alloys. Shape Mem Superelasticity 1:117–123
23. Bozzolo G, Noebe RD, Mosca HO (2005) Site preference of ternary alloying additions to NiTi: Fe, Pt, Pd, Au, Al, Cu, Zr and Hf. J Alloys Compd 389:80–94
24. Hinte C, Barienti K, Steinbrücker J, Hartmann J-M, Gerstein G, Herbst S, Piorunek D, Frenzel J, Fantin A, Maier HJ (2020) The Effect of Increasing Chemical Complexity on the Mechanical and Functional Behavior of NiTi-Related Shape Memory Alloys. Shape Mem Superelasticity 6:181–190
25. Cadelli A, Manjeri RM, Sczerzenie F, Coda A (2016) Uniaxial Pre-strain and Free Recovery (UPFR) as a Flexible Technique for Nitinol Characterization. Shape Mem Superelasticity 2:86–94
26. Zhao S, Osetsky YN, Zhang Y (2017) Atomic-scale dynamics of edge dislocations in Ni and concentrated solid solution NiFe alloys. J Alloys Compd 701:1003–1008
27. Leino AA, Samolyuk GD, Sachan R, Granberg F, Weber WJ, Bei H, Liu J, Zhai P, Zhang Y (2018) GeV ion irradiation of NiFe and NiCo: Insights from MD simulations and experiments. Acta Mater 151:191–200
28. Guda Vishnu K, Strachan A (2010) Phase stability and transformations in NiTi from density functional theory calculations. Acta Mater 58:745–752
29. Ko W-S, Choi WS, Xu G, Choi P-P, Ikeda Y, Grabowski B (2021) Dissecting functional degradation in NiTi shape memory alloys containing amorphous regions via atomistic simulations. Acta Mater 202:331–349
30. Gao Y, Casalena L, Bowers ML, Noebe RD, Mills MJ, Wang Y (2017) An origin of functional fatigue of shape memory alloys. Acta Mater 126:389–400

31. Thompson AP, Aktulga HM, Berger R, et al (2022) LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales. Comput Phys Commun 271:108171
32. Sharifi H, Wick CD (2025) Developing interatomic potentials for complex concentrated alloys of Cu, Ti, Ni, Cr, Co, Al, Fe, and Mn. Comput Mater Sci 248:113595
33. Nosé S (1984) A molecular dynamics method for simulations in the canonical ensemble. Mol Phys 52:255–268
34. Yuan B, Ge J, Chen H, Pan J, Zhang L, Qi X (2022) Printability and microstructure of Fe doped NiTi shape memory alloy fabricated by laser powder bed fusion. Mater Lett 328:133099
35. Zhao Y-N, Jiang S-Y, Zhang Y-Q, Liang Y-L (2017) Influence of Fe Addition on Phase Transformation, Microstructure and Mechanical Property of Equiatomic NiTi Shape Memory Alloy. Acta Metall Sin Engl Lett 30:762–770
36. John R, Umamaheshwari M (2023) Ductility reduction upon cobalt substitution in B2 NiTi. Comput Mater Sci 220:112049
37. Puopolo R, Ruschendorf S, Thadayil ASK, Cook S, Celikin M (2024) The effect of cobalt alloying on the phase transformation kinetics of Ni-Ti alloys. Heliyon 10:e37390
38. Jing R, Liu F (2007) The Influence of Co Addition on Phase Transformation Behavior and Mechanical Properties of TiNi Alloys. Chin J Aeronaut 20:153–156
39. Gorbunov SA, Volkov AE, Voronkov RA (2022) Periodic boundary conditions effects on atomic dynamics analysis. Comput Phys Commun 279:108454
40. Luo C, Min Y, Guo P, Chen F, Jiao S, Liu C (2025) Molecular dynamics simulation of the structure and transport properties of Fe-Cr-Ni alloy melts. J Non-Cryst Solids 650:123362

POWER ANALYSIS OF SOLAR CELLS WITH DIFFERENT BUSBAR NUMBERS ACCORDING TO THE NUMBER OF SOLDER PROBES

HASAN MİTHAT DELİBAŞ[1], NECİP FAZIL YILMAZ[2,3]

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hasan Kalyoncu University, 27410 Gaziantep, Türkiye
[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gaziantep University, 27310 Gaziantep, Türkiye

[3] Board of Trustees, Hasan Kalyoncu University, 27010, Gaziantep, Türkiye

Abstract

The continuous increase in global population and living standards inevitably increases the demand for energy. Today, about 80% of this increasing demand is met by fossil fuels. The environmental impacts of fossil fuels have accelerated the shift towards reliable, uninterrupted, clean and virtually limitless renewable energy sources. Solar energy has been particularly prominent thanks to advances made in the last 25 years. However, commercially produced photovoltaic systems are still only about 17% efficient under field conditions. Researchers are therefore working hard to increase conversion rates and minimize efficiency losses due to design conditions. The aim of this study is to analyze the power distribution of solar cells with different busbar numbers and finger types according to the change in the number of solder probes using GriddlerSolar2.5 to support different studies in the literature and to generate new ideas for future studies. In this study, the main power behaviors (e.g. power output, resistive losses, recombination losses, shading losses) between three different busbar numbers and seven different solder probe numbers are comparatively discussed.

Keyword: Solar cells,Photovoltaics,Energy,Cell geometry,Power analysis

1. Introduction

With the world's population increasing by an average of 1% per annum over the last decade and living standards rising, global energy demand is constantly increasing and becoming a major challenge. Fossil fuels still account for a significant share of energy production today, but they bring with them three main problems. First, as non-renewable resources, they cannot naturally replenish themselves, limiting their useful life and leading to their inevitable depletion. Secondly, the economic sustainability of these resources is weakened by the continuous increase in supply, production and transportation costs compared to previous years. The third and most critical problem is their environmental impact. The most important of these impacts is that the use of fossil fuels increases greenhouse gas emissions, accelerating global climate change and causing serious ecological risks [1]. These problems have made it necessary to turn to reliable, sustainable, environmentally friendly and inexhaustible energy sources. In this context, renewable energy sources have a strategic importance in terms of establishing a sustainable supply-demand balance and reducing environmental damage. Photovoltaic (PV) systems, in particular, stand out as a strong alternative to fossil-based sources thanks to their capacity to convert direct sunlight into electrical

energy [2]. In recent years, increasing technology development efforts have focused on increasing the efficiency of photovoltaic modules and minimizing losses caused by design conditions. However, PV systems also have some disadvantages. Sensitivity to operating and design conditions is an important cause of efficiency losses, leading researchers to develop new module manufacturing techniques and optimization methods. Studies in this field continue unabated and PV technology is expected to play a more widespread and effective role in energy conversion [3].

At this point, literature studies show that resistive losses and recombination losses play an important role in operational and design induced efficiency losses. Contacts cause some energy loss by creating resistance at their intersection points. However, it is also the basis for recombination loss. Various efforts have been made to overcome these disadvantages caused by contact resistors [4-7]. It appears that metallization designs and applications need to be improved to address the decline in productivity caused by internal factors. The metallization process in solar cells basically consists of busbar and finger structures, and the element that allows the current to complete the loop and form a circuit is tabbing wires. Since the output voltage of a single cell is usually below 1 V, multiple cells are connected in series with the help of tabbing wires in order to reach the required output voltage and this process is applied by soldering technique. Soldering quality is critical at this point and poor or inadequate solder joints reduce the power output of the module and negatively affect its lifetime. As a matter of fact, it is stated in the literature that approximately half of module failures are caused by metallization defects. On the other hand, excessive soldering processes also carry risks. High temperature and mechanical stresses during soldering increase the likelihood of delamination and microcracks. Therefore, soldering conditions and techniques should be carefully selected, minimizing thermomechanical stresses and preventing contamination during the process should be among the primary objectives [8-11].

This study aims to analyze the power distribution of solar cells with different busbar numbers according to the change in the number of solder probes in order to support different studies in the literature and to provide new ideas for future studies. The cells modeled in the study were developed using the GriddlerSolar2.5 program. The study will determine the resistance and recombination losses in cells with different solder probe numbers and relate these losses to power outputs. At the same time, to be compatible with existing cell technologies, the cell dimensions are designed to be approximately one quarter of a standard M6 cell. This will provide a concept of what the power dissipation of a quarter-cut cell would be like as an alternative to half-cut technology.

2. Materials and Methods

In this study, a finite element model based on quarter cut technology was developed for an M6 type wafer. In the modeling process, the ingot diameter was fixed as 120 mm and the metallization processes were designed as 2 and 3 busbars. For each busbar, different numbers of solder points from 1 to 7 were applied and analyzed. In the metallization geometry created based on literature data, care was taken to ensure that the surface coverage rate did not exceed 10% of the cell surface and in this direction, the contact area was kept at approximately 12-13 cm^2 in all geometries. In the study, ingot diameter, cell surface area, soldering points and metallization geometry were taken as constant values in all scenarios. At the same time, cell internal resistances (finger plate and layer plate resistances), radiation intensity and current ratios were also fixed in such a way that they do not vary, and with this approach, it is aimed to ensure normalization for all models. Finite element analysis was performed using GriddlerSolar 2.5 software to evaluate the power distributions in the developed cells. As shown in Figure 1 and Figure 2, for each model with different busbar numbers,

seven different soldering points were analyzed and power variations were examined in detail. All cells were designed to be single-sided, so the data obtained was evaluated only on the front surface.

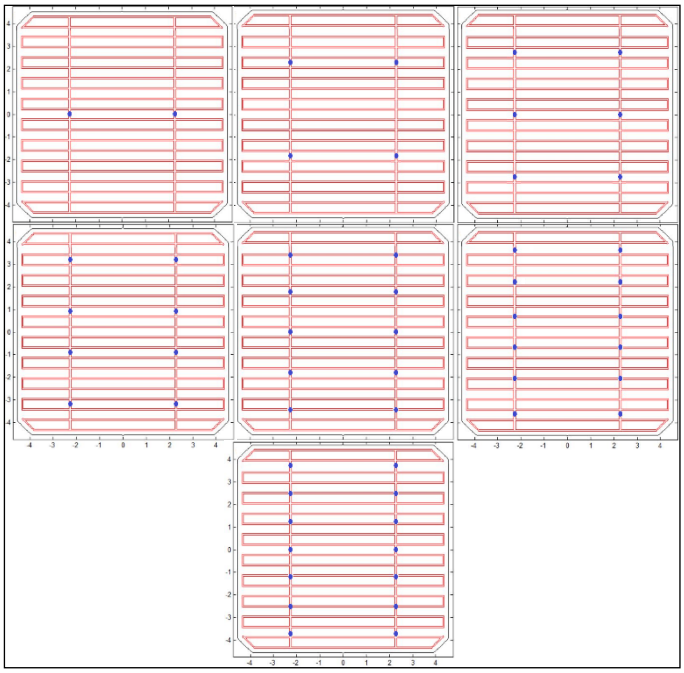


Figure 1. Solder points for 2 busbars design.

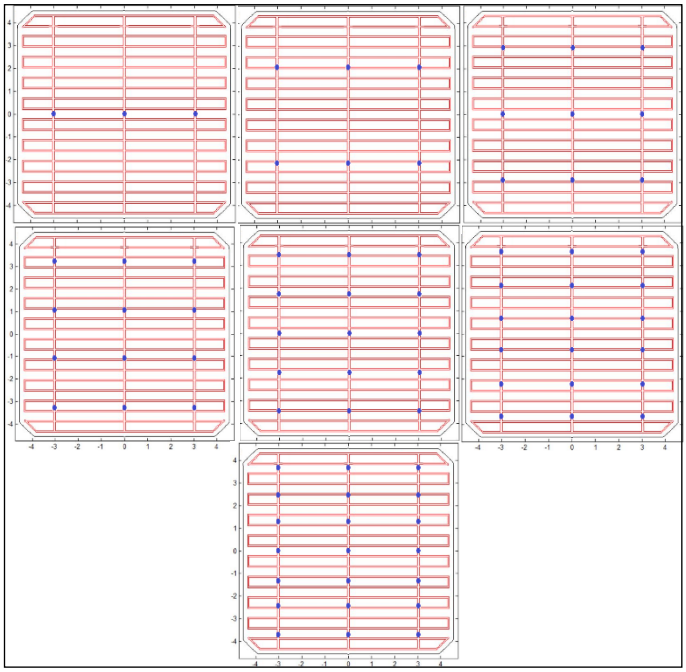


Figure 2. Solder points for 3 busbars design.

The assumptions and simplifications made in finite element modeling are generally as mentioned below;

a) Simulation studies were carried out at 25°C and 100 mW/cm2 radiation intensity.

b) Internal resistance and shunt conductivity of the semiconductor junction were assumed to be zero.
c) The cell was designed as monofacial and no metallization process was applied to the back surface.
d) Terminal voltage was taken as 500 mV in power analyses.
e) Simulations were based on the Galerkin Method. In the mathematical calculations, two diode equations suitable for this method were used.
f) Saturation current density (J1 and J2) originating from diodes was assumed to be constant.
g) Resistances originating from passivation area and metal contact areas were assumed to be uniform.
h) It is assumed that for all designs the busbar is fixed with a single solder from the exact center point.
i) Metallization paste was assumed to be completely opaque.

The finite element approach is based on the Galerkin Method and therefore, the mathematical calculations are based on a two-diode model in accordance with the structure of the method. The schematic layout of these two diode models considered in the study is shown in Figure 3 [12-14].

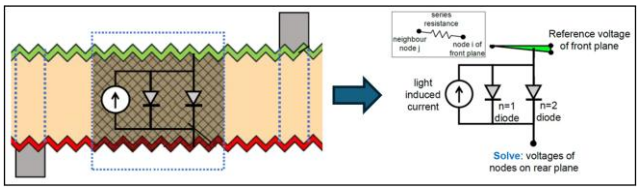


Figure 3. Schematic representation of two diode models.

The basic equations and quantities to be used for mathematical modelling within the framework of the above assumptions and simplifications are given below.

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q\,(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \tag{1}$$

In the given equation, since the voltage value will be zero in the short circuit current (I_{sc}), the short circuit current will be equal to the IL value and equation 1 will become equation 2. In the open circuit voltage (V_{oc}), since the current will be zero this time, the equation will become equation 3.

$$I_{SC} = I_L \tag{2}$$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \tag{3}$$

The current (I_{mp}) and voltage (V_{mp}) values that give the maximum power output (P_{max}) will be found by taking V_{min} as zero due to grounding and V_{max} value as Voc by using the specified equations. Mathematical modelling will be performed based on the Galerkin Method used in the simulation. Maximum power output and cell efficiency are given in Equation 4 and Equation 5.

$$P_{max} = V_{mp}\, x\, I_{mp} \tag{4}$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \tag{5}$$

3. Results and Discussion

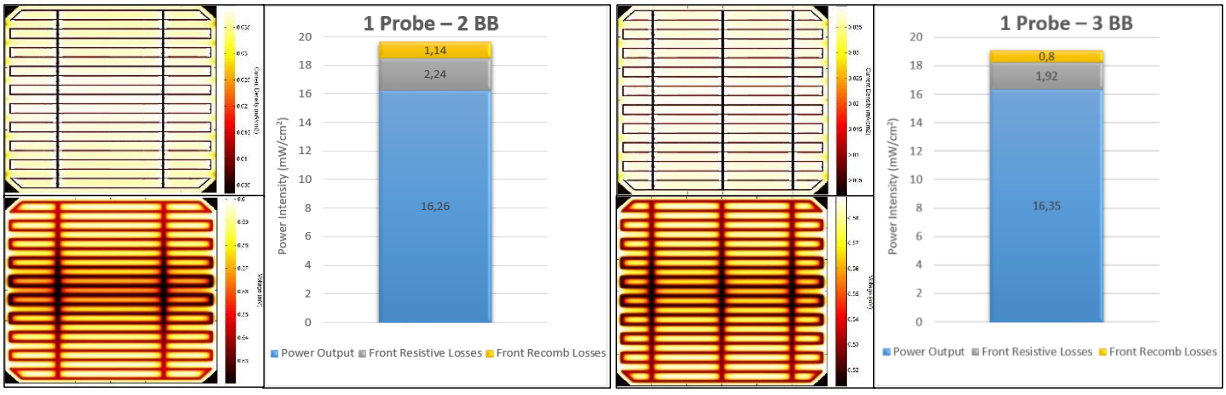
According to Equation 1, the net output current (I) is obtained from the difference between the light-dependent current (I_L) and the diode current (I_0). This net current is the current responsible for power generation in photovoltaic cells, and the larger the difference between the two currents, the more power the cell can generate. In the short-circuit condition, there is no voltage between the diode terminals, resulting in a short-circuit current (I_{sc}) and this value represents the highest current that the cell can provide. On the other hand, in the open circuit condition, when the current is zero, the voltage reaches a maximum level and at this point the open circuit voltage (V_{oc}) is measured.

As can be seen from the same equation, an increase in the circuit voltage leads to an exponential increase in the diode current, resulting in an inverse relationship between the net output current and the circuit voltage. This exponential behavior manifests itself as a pronounced curvature in the characteristic curves of photovoltaic cells. The point where the product of current and voltage is the highest is defined as the maximum power point (P_{max}), where the voltage is called V_{mp} and the current is called I_{mp}. These relationships are among the key parameters for evaluating the performance and efficiency of photovoltaic systems.

The findings of the finite element analysis within the framework of the theoretical background and their comparative discussions will be discussed in detail in the rest of the chapter.

3.1. One solder point for each busbar numbers

As shown in Figure 4, if only one solder point is used, the current is collected from only one contact point. This leads to elongated current paths and significant voltage drops across the fingers. Under this condition, the series resistance loss on the front surface reaches 2.24 mW/cm² and 1.92 mW/cm², while the reconnection loss increases to 1.14 mW/cm² and 0.8 mW/cm² due to the accumulation of carriers in the finger areas.



a) **b)**

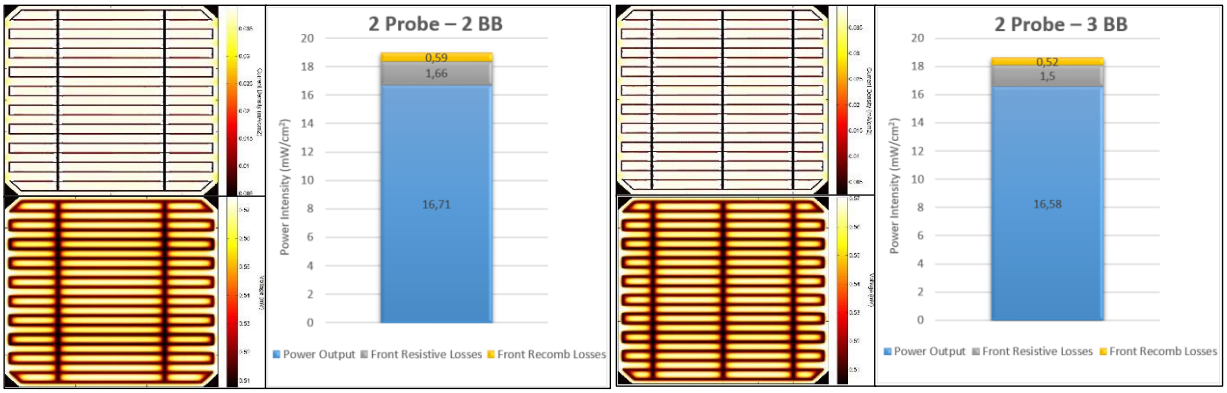
Figure 4. Current density, voltage and power distribution;
a) 1 Probe – 2 Busbar, b) 1 Probe – 3 Busbar.

The combined increase in series resistance and recombination losses adversely affects the overall performance of the cell and causes the output power to remain at 16.26 mW/cm² and 16,35

mW/cm². Furthermore, under these conditions, a significant current density gradient appears on the cell surface, clearly demonstrating the critical impact of metallization defects on cell efficiency.

3.2. Two solder points for each busbar numbers

As shown in Figure 5, by using two probes, the current paths are shortened and the current is distributed symmetrically on the cell. As a result of this arrangement, the series resistance loss decreases to 1.66 mW/cm² and 1.5 mW/cm² and the recombination loss to 0.59 mW/cm² and 0.52 mW/cm². Therefore, it is seen that the biggest improvement is realized at this stage. The reduction in losses increases the output power of the cell to 16.71 mW/cm² and 16.58 mW/cm² and that makes the current distribution on the surface more homogeneous. It is clear that the instabilities observed especially in the single probe configuration are significantly eliminated in this case.

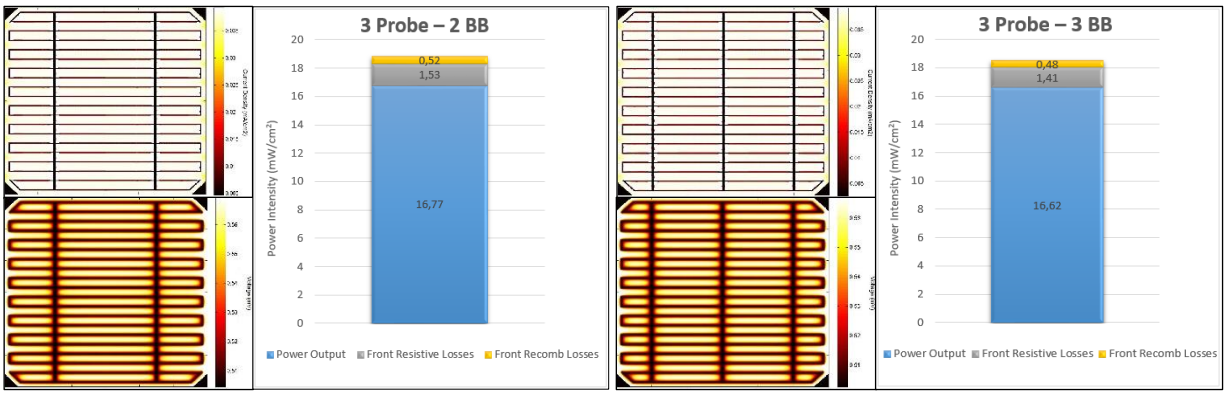


a) **b)**

Figure 5. Current density, voltage and power distribution;
a) 2 Probe – 2 Busbar, b) 2 Probe – 3 Busbar.

3.3. Three solder points for each busbar numbers

As shown in Figure 6, using three probes shortens the current paths even further, resulting in a series resistance loss of 1.53 mW/cm² and 1.41 mW/cm² and a recombination loss of 0.52 mW/cm² and 0.48 mW/cm². These improvements increase the output power to 16.77 mW/cm² and 16.62 mW/cm².



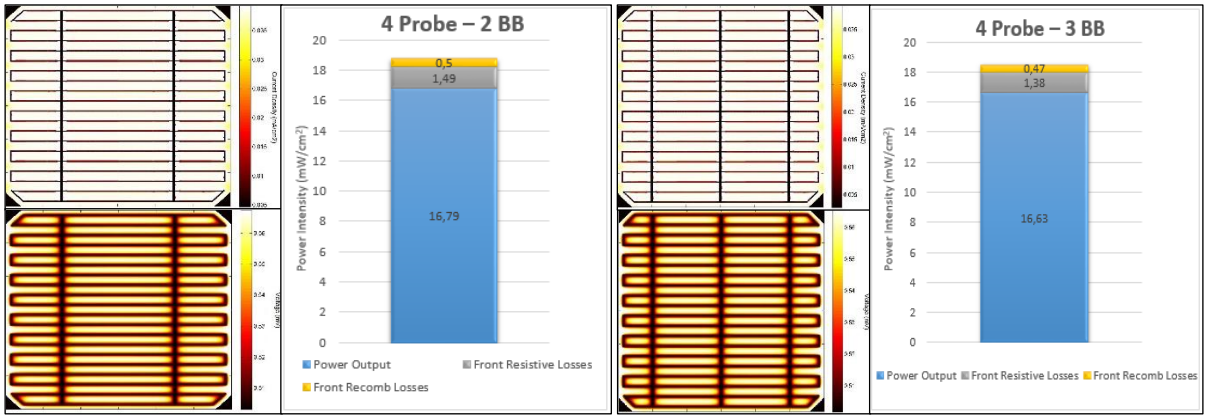
a) **b)**

Figure 6. Current density, voltage and power distribution;
a) 3 Probe – 2 Busbar, b) 3 Probe – 3 Busbar.

However, the gains are more limited compared to the improvements observed when switching from 1 to 2 probes. Nevertheless, the current distribution becomes more balanced compared to the previous scenarios and a more homogeneous electrical profile is formed on the cell surface.

3.4. Four solder points for each busbar numbers

As shown in Figure 7, when using four probes, the series resistance loss decreases to 1.49 mW/cm² and 1.38 mW/cm² while the recombination loss decreases to 0.50 mW/cm² and 0.47 mW/cm². As a result of these improvements, the output power reaches 16.79 mW/cm² and 16.63 mW/cm². At this stage, the charge sharing on the cell surface is largely balanced and the current paths approach the optimum level and it is seen that the electrical performance is carried to the most efficient level.

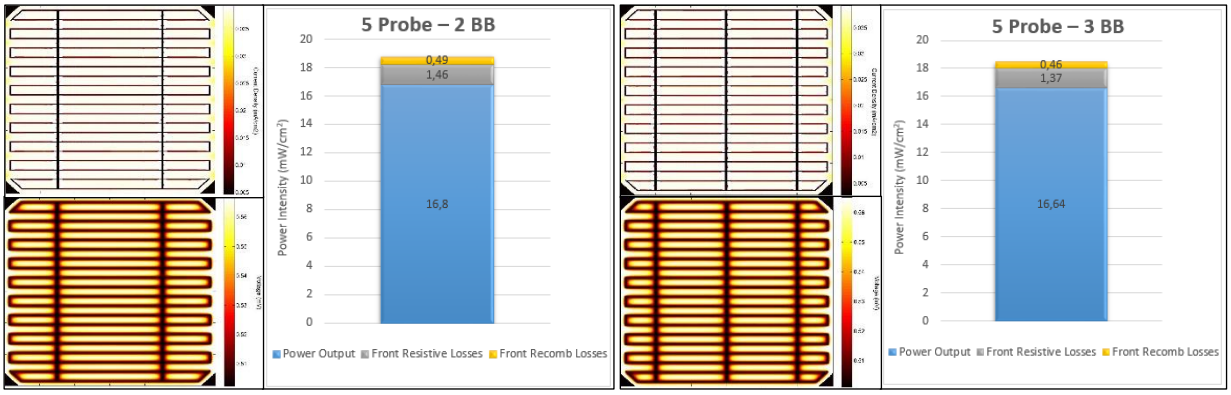


a) **b)**

Figure 7. Current density, voltage and power distribution;
a) 4 Probe – 2 Busbar, b) 4 Probe – 3 Busbar.

3.5. Five-Six-Seven solder points for each busbar numbers

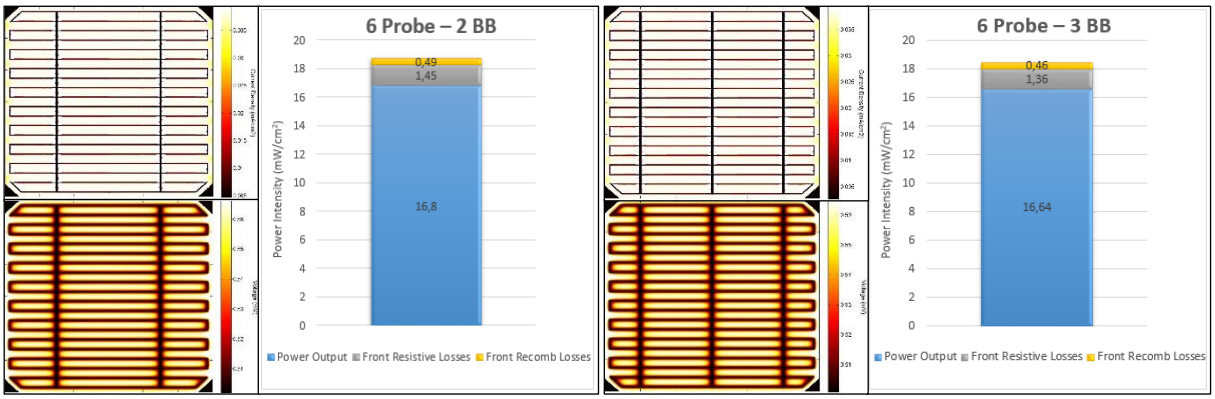
As shown in Figure 8, Figure 9 and Figure 10, in the scenarios with five, six and seven probes, the improvements in losses are quite limited and the results show similar values. In this case, the series resistance loss stabilizes in the range of 1.46-1.45 mW/cm² and 1.36-1.37 mW/cm², while the recombination loss remains at around 0.49 mW/cm² and 0.46 mW/cm².



a) **b)**

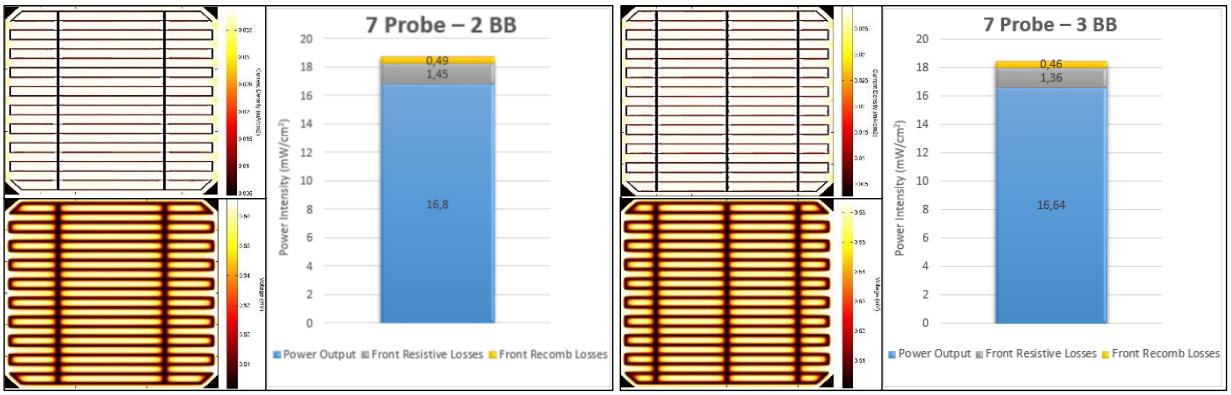
Figure 8. Current density, voltage and power distribution;
a) 5 Probe – 2 Busbar, b) 5 Probe – 3 Busbar.

The output power reaches 16.8 mW/cm² and 16.64 mW/cm², but from this point on the increase is negligible. Hence, increasing the number of probes does not add any additional contribution to the cell efficiency, since both series resistance and recombination losses seem to have reached saturation level.



a) **b)**

Figure 9. Current density, voltage and power distribution;
a) 6 Probe – 2 Busbar, b) 6 Probe – 3 Busbar.



a) **b)**

Figure 10. Current density, voltage and power distribution;
a) 7 Probe – 2 Busbar, b) 7 Probe – 3 Busbar.

The main reason for the improvement achieved by increasing the number of probes is the shortening of the current's path across the cell surface and the consequent reduction in series resistance losses. With a single probe, as the current travels long distances, the heat losses due to resistance increase, leading to carrier concentration and high recombination losses. When the second and third probe are added, the current is more homogeneously distributed, the potential gradients become smaller and the recomb losses drop significantly. However, after the fourth probe, the current paths are already short enough that there is no marginal contribution from the additional number of probes; the output power saturates. Thus, while increasing the number of probes significantly improves electrical efficiency up to a certain point, beyond this point the gain is negligible.

4. Conclusions

The results show that the single probe case, all the current is carried out of the cell from a single solder point through the busbar. Since the current is directed to a single point, the electrical resistance increases along the busbar and the finger, which results in a voltage drop. The increase in the power loss due to resistance directly reduces the maximum power output. Since the current coming from the fingers is directed only to a single probe point, the current density along the busbar is unbalanced. Most of the current is concentrated in the areas close to the solder, which causes performance drops.

More probe points allow the current to be divided and carried to different points. This balances the current density along the busbar and reduces resistive losses and thus higher voltage is obtained at the cell edges. Electrical energy losses are limited by the increase in probe points, because the current is carried with lower resistance. Therefore, a significant power increase is seen with 2 or 3 probe points.

When the number of probes is 4 or more, the power increase decreases noticeably and becomes almost zero. The main reason for this is that after 3-4 probes the current will be carried sufficiently stable and the resistive losses will already be minimized. Therefore, additional probe points do not provide a significant improvement in current balance. The increase in probe points requires extra physical space on the busbars, which brings with it the difficulty of application.

In cells with 2 busbars, the current per busbar is higher. Therefore, the resistance loss is higher in the case of single probe. However, as the probe points increase, this resistance loss decreases rapidly because the distribution of current becomes more effective. In cells with 3 busbars, the current per busbar is lower. As the number of solders increases, the advantage of the 3-busbar design becomes limited. Because the total busbar resistance is higher compared to 2 busbars, and adding probe cannot significantly reduce this resistance. As a result, as the number of probes increases, the low number busbar design become more advantageous the higher number busbar design due to the total resistance advantage.

The results show that the variation in the number of solder probes has a significant effect on the power distributions in solar cells with different busbar numbers. In addition, it is important to support these findings with experimental studies using different soldering technologies in future research in order to increase the reliability of the methods and to expand their application areas.

References

1. Delibaş, H.M., Yenilikçi bir tasarim ile birlikte fotovoltaik panel verimliliğinin arttirilmasi, MSc. Thesis, Karabük Üniversitesi Graduate Education Institute, **2021**.
2. Delibas, H. M., and Yilmaz, N. F., Characterization and power analysis of solar cells with different geometries, The International Journal of Materials and Engineering Technology (TIJMET), **2025**, 8(1): 22-31.
3. Delibas, H. M., and Yilmaz, N. F., Fotovoltaik teknolojisinin güncel durumu ve kapsamli değerlendirmesi, The 5th International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET'23), **2023**, 260-274.
4. Benda, V., Crystalline Silicon Solar Cell and Module Technology, A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems with Special Focus on Photovoltaic Systems, **2018**, 181-213.

5. Abdulraheem, Y., Ghannam, M., Radhakrishnan, H. S., and Gordon, I., The Role of Silicon Heterojunction and TCO Barriers on the Operation of Silicon Heterojunction Solar Cells: Comparison between Theory and Experiment, International Journal of Photoenergy, **2021**, 6632180.
6. Moharam, M.M., El Shazly, A.N., and Anand, K.V., Semiconductors as Effective Electrodes for Dye Sensitized Solar Cell Applications, Top Curr. Chem, **2021**, 379: 20.
7. Ferdiansjah, F., and Mularso, T. K., Analysis of Back Surface Field (BSF) Performance in P-Type And N-Type Monocrystalline Silicon Wafer, E3S Web of Conferences, **2018**, 43: 01006.
8. Goodarzi, D.M., Lauri, J., Putaala, J., Nousiainen, O., and Fabritius, T., Eddy current soldering of solar cell ribbons under a layer of glass, Solar Energy Materials and Solar Cells, **2023**, 259; 112427.
9. Campeau, Z., Anderson, M., Hasselbrink, E., Kavulak, D., Shen, and Lacerda R., SunPower Module Degradation Rate white paper, SunPower, **2013.**
10. Aghaei, A., Fairbrother, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K., Oreski, G., Reinders, A., Schmitz, J., Theelen, M., Yilmaz, P., and Kettel, J., Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules Renew. Sustain. Energy Rev., **2022**, 159; 112160.
11. Kongwiriyaphaisan, A., and Viboon, T., Crack reduction in tabbing and stringing processes for solar cells Key Eng. Mater., **2018**, 777; 126-131
12. Online: PV Lighthouse, Griddler 2.5 For Industry Cells & 2j Tandems User Manual [PDF], 2023, 24-30. https://griddlersolar.com/wpcontent/uploads/Griddler_and_PRO_manual.pdf
13. Harmon, M., Gamba, I.M., and Ren, K., Numerical algorithms based on Galerkin methods for the modeling of reactive interfaces in photoelectrochemical (PEC) solar cells, Journal of Computational Physics, **2016**, 327, 140- 167.
14. Li, Q., Tian, Y., Wu, D., Gao, W., Yu, Y., Chen, X., and Yang, C., The nonlinear dynamic buckling behaviour of imperfect solar cells subjected to impact load, Thin-Walled Structures, **2021**, 169, 108317.

Machine Design and Mechanical System Design, Analysis and Damage Formation

HASAN AYTUĞ KURT[1], MUSTAFA BAKKAL[2], UMUT KARAGÜZEL[2], HASAN ÇAKIR[1]

[1]Yılmaz Makine San. ve Tic. A. Ş., Taşdelen Mah. Atabey Cad. No:9, 34788 Çekmeköy/İstanbul, Türkiye.
[2]Mechanical Engineering Department, ITU Mechanical Engineering Faculty, Istanbul, Turkiye

Abstract

In this study, the forming forces acting on the dies during the rotary swaging process of steel parts were investigated using both experimental measurements and finite element analysis (FEA). Experimental data were collected from AC and servo motors including current, torque, and speed throughout a full cycle, while forming forces were measured in real-time using a load cell. The same process was modeled in Simufact Forming software, and the calculated die force range was 45–52 kN, with equivalent stress in the dies reaching 420–780 MPa. When comparing the simulation results with the experimental force-time curves, a deviation of 10–15% in peak forces was observed. Additionally, relationships between forming force and hardness distribution, as well as surface roughness values measured on the inner and outer surfaces of the workpieces, were evaluated. This study provides a comprehensive validation framework for simulation tools like Simufact and offers valuable insights into the physical interactions during rotary swaging.

Keyword: Rotary Swaging,Die Force,Finite Element Analysis,Experimental Validation,Simufact Forming

CUVAL KUMASLARINDA GORSEL HATA TURLERININ DERIN OGRENME ILE SINIFLANDIRILMASI CNN TABANLI BIR YAKLASIM

NECİP FAZIL YILMAZ [*1,2], MAHMUT FURKAN KALKAN [1], SEBAHATTİN ÇÜRÜK[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gaziantep University, 27310, Gaziantep, Türkiye
[2]Board of Trustees, Hasan Kalyoncu University, 27010, Gaziantep, Türkiye

Özet

Tekstil sektöründe kalite kontrol süreçleri, üretim çıktılarının belirli standartlara uygunluğunu sağlayarak müşteri memnuniyetini garanti altına almayı amaçlamaktadır. Ancak, özellikle çuval üretimi gibi yüksek hacimli üretim hatlarında, kalite kontrol işlemlerinin manuel olarak personel tarafından gerçekleştirilmesi; süreçte subjektifliğe, operatör yorgunluğuna ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bu durum, hem hatalı ürünlerin son kullanıcıya ulaşma riskini artırmakta hem de üretim hattında verimliliği düşürmektedir.Görüntü sınıflandırma (image classification), yapay zekâ ve bilgisayarla görme alanlarında geliştirilen etkili bir yöntem olarak, üretim hatlarında otomatik kalite kontrolün gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışma kapsamında, çuval sektöründe karşılaşılan yüzey hatalarının otomatik olarak tespiti ve sınıflandırılması amacıyla Derin Evrişimsel Sinir Ağı (DCNN) tabanlı bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, hatalı ve hatasız kumaş görselleri arasında ayrım yapabilecek şekilde eğitilmiş ve sınıflandırma yeteneği test edilmiştir.Modelin eğitimi için çuval üretim hattından elde edilen görüntülerden oluşan beş ayrı veri seti hazırlanmıştır: eğitim, doğrulama ve test. Görseller, farklı hata türlerini (örneğin kırışıklık, atkı kopuğu, çözgü hatası vb.) temsil edecek şekilde etiketlenmiş ve derin öğrenme modeline uygun biçimde işlenmiştir. Modelin başarımı, test veri seti kullanılarak doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skor gibi yaygın görüntü sınıflandırma metrikleri ile değerlendirilmiştir.Yapılan testler sonucunda, geliştirilen DCNN modelinin sınıflandırma performansının yüksek olduğu gözlemlenmiş ve bu modelin, çuval kumaşlarında gerçek zamanlı kalite kontrol süreçlerinde kullanılabilecek güvenilir bir otomasyon aracı olabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelime: Derin Öğrenme, Evrişimsel Sinir Ağları, Kalite Kontrol, Hatalı Kumaş Tespiti, Görüntü Sınıflandırma, Yapay Zeka Tabanlı Görüntü İşleme

PRODUCTION CHARACTERIZATION AND APPLICATION POTENTIAL OF FUNCTIONAL HYDROXYAPATITE FROM NATURAL CALCIUM SOURCES

BUKET ALP [*1,2], SENA TEK [1], BURAK ÇEPER[1], SEFA EMRE SÜNBÜL[1]

[1]Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Gaziantep University, 27310, Gaziantep, Türkiye

Özet

In this project study, the aim was to evaluate waste materials and use them as a biocompatible material, taking into account an environmentally friendly approach. The starting point of our project was the recycling of eggshells, which are commonly found as waste in nature, for use in hydroxyapatite (HAp) production. Eggshells were selected because they contain high levels of calcium, which can be used as a suitable source for producing biocompatible ceramics. Within the scope of the project, pure hydroxyapatite synthesis was first carried out. Subsequently, to enhance the mechanical strength of this structure and to enable the material to be more controlled and durable in biomedical applications, strontium (Sr), copper (Cu), and magnesium (Mg) elements were added separately. Nine different doped samples were prepared by adding 2%, 4% and 6% of each element. Thus, a total of ten different HAp structures were obtained, one pure and nine doped. The main reason for selecting these elements is their potential to improve the structural and physical properties of hydroxyapatite. It was thought that adding elements such as strontium (Sr), magnesium (Mg), and copper (Cu) in appropriate ratios could bring about positive changes in the grain structure and crystal structure development of the material. Various analyses were performed to examine the structural and morphological properties of the prepared hydroxyapatite samples. We determined the surface morphology and particle distribution using SEM, the crystal structure and phase analyses using XRD , and the chemical bonds and the presence of additives in the structure using FTIR.

Anahtar Kelime: Hydroxyapatite; Eggshell; Doping; Biomaterials; Material Characterization.

IMPACT BEHAVIOR OF UNIDIRECTIONAL AND PLAIN WEAVE COMPOSITE STRUCTURES IN DIFFERENT CONFIGURATIONS

BURHAN ÖZDEMİR[1], ÖMER USTA[1], DURSUN MERİÇ[1], HASAN GEDİKLİ[1], UMUT CAN[1], ÖMER NECATİ CORA[1]

[1]Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Trabzon, Türkiye
[2]TUSAŞ, Ankara, Türkiye

Abstract

This study aims to determine the behavior of composite plates with different configurations (symmetric-balanced, asymmetric-balanced, asymmetric-unbalanced, symmetric-unbalanced, asymmetric-unbalanced) made of carbon fiber reinforced composite material (carbon fiber prepreg) with polymer matrix under impact loading and to determine the configuration that increases the energy absorbed under impact loading at low and high speeds. The composite plates produced within the scope of the study were designed with different configurations, as well as different weave types (co-oriented and uniform weave) and thicknesses (4 mm and 7 mm). Low velocity (<10m/s) impact tests were carried out per ASTM D7136 standard with a free weight drop tower test rig in the Solid Mechanics Laboratory of KTU Department of Mechanical Engineering. Standard specimen dimensions (100 mm x 150 mm) were used according to the ASTM D7136 standard. Force and acceleration values were acquired from the force and acceleration sensors with a 16-channel DEWE43A data acquisition card at a sampling rate of 20 kHz, and force-time graphs were obtained. In addition, force-displacement, velocity-time, and energy-time graphs were obtained from DEWESOFT software. The experiments were carried out with two repetitions at three different energy levels of 22, 65, and 320 J.The high-velocity impact tests, on the other hand, were conducted using a gas gun test rig that operates with pressurized gas. During test firings at different pressures, a pressure-velocity calibration curve was created using data acquired from a PCO high-speed camera. The entry velocity of the projectile is known using the calibration curve, and the exit velocity is determined using a ballistic measuring device called a Caldwell Precision Chronograph. As a result of low-velocity impact tests, it was observed that the most energy-absorbing plate was the asymmetric-balanced plate made of 7 mm-thick asymmetric fabric. High-velocity impact tests, on the other hand, revealed that the entire impact energy could be absorbed since the 7-mm-thick plates were not perforated. In contrast, the 4 mm plates with a symmetrical, balanced configuration made of co-oriented fabric absorbed the most energy. The relevant plate had an entrance velocity of 94 m/s and an exit velocity of 21 m/s. In this case, approximately 95% of the impact energy was absorbed.

Keyword: Composite laminate, Impact behavior,low-velocity impact,High-velocity impact

VISCOSITY CHARACTERIZATION OF NON NEWTONIAN FLUIDS USING RECTANGULAR CHANNELS

MEHMET AYAS[1], JAN SKOCILAS[2], JAN STIPEK[2],RUDOLF ZITNY[2],TOMAS JIROUT[2]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hasan Kalyoncu University, 27410 Gaziantep, Türkiye
[2]Department of Process Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic

Abstract

n this work, a method for determination of shear viscosity of the purely-viscous non-Newtonian fluid trough rectangular ducts is presented. Shear viscosity is one of the most essential design and process parameters for polymeric fluids in the industry. Shear viscosity is measured using rotational viscometers at low shear rates and pressure-driven viscometers at high shear rates. The conventionally utilized pressure driven viscometers and capillary and slit viscometers in which flow can be considered one dimensional, hence desired shear viscosity can be obtained directly. However, in some cases, the determination of shear viscosity may be required for geometries other than circular and slit geometries. In this study, a method is suggested for the determination of shear viscosity by means of rectangular ducts. For shear viscosity, the power-law, Herschel-Bulkley, Casson and Robertson-Stiff rheological models are utilized and approximate methods are proposed to express the relationship between shear stress and average wall shear rate. Suggested methods are tested using experimental data of a slit viscometer and rectangular channel of aspect ratio 0.2. Then, obtained rheological parameters are validated by means of CFD simulations.

Keyword: Viscous non-Newtonian fluids, shear viscosity, pressure-driven viscometer, rectangular ducts, viscous rheological models

INVESTIGATION OF ENERGY ABSORPTION AND DAMAGE BEHAVIOR CHARACTERISTICS OF BIO INSPIRED SANDWICH PANELS

ALİHAN ACUNER[1], TARIK DURSUN VİRDİL[1], RECEP TUNAHAN TURKER[1], İSMAİL ÖZEN[1], ÖMER NECATİ CORA[1]

[1] Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Trabzon, Türkiye

Abstract

This study aims to design and manufacture biomimetic-based sandwich panel structures and determine their energy-absorbing and damage behaviour against crushing and impact loads through experimental and numerical analysis. Examining studies in the literature has revealed that sandwich panel designs with a honeycomb geometry core structure are especially prominent for engineering applications in industrial fields such as automotive, defense, and aerospace, where the energy-absorbing behaviour of these structures against crushing and impact loads is important. This study plans to design sandwich panels with square, octagonal, and circular core structures, inspired by the Bouligand geometry found in mantis shrimp. The panels were fabricated using an additive manufacturing method, and their energy-absorbing behaviour was investigated under static and dynamic loads through experimental and numerical analysis. A 3D printer was used to produce sandwich panels with polylactic acid (PLA) filament material to mimic the complex, multilayered geometry of the mantis shrimp's attack limb. Solid models of the sandwich panels were designed with a computer-aided design (CAD) program, and their energy-absorbing and damage behaviour were analyzed using commercial finite element software. Sandwich core structures with different layer sequences, such as 0°-10° and 0°-90°, were subjected to crushing tests and impact tests. The results demonstrate that increasing the number of cells in sandwich core structures, while keeping the relative density constant, increases the energy-absorbing capacity, as stated in previous studies. Additionally, it was found that the sandwich core structures with circular cell sections exhibited the best energy-absorbing behaviour, followed by those with octagonal and square cell cross-sections. During crushing tests, the sandwich core structure with a square cell cross-section at a 90° rotation angle failed by shear. The impact tests revealed that sandwich core structures with octagonal and circular cell cross-sections exhibited superior energy absorption performance when compared to those with square cell cross-sections.

Keyword: Energy absorption, Sandwich panels, Bouligand geometry

COMPARISON OF MODULATION TECHNIQUES IN THREE-PHASE TWO-LEVEL BOOST RECTIFIERS FOR HIGH-POWER APPLICATIONS

MERVE MOLLAHASANOGLU*1, HAKKI MOLLAHASANOGLU 2

[1]Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Electrical and Electronic Engineering Department, Trabzon, TURKEY.
[2]Recep Tayyip University, Engineering and Architecture Faculty, Electrical and Electronic Engineering Department, Rize, TURKEY

Abstract

In this study, the evaluation of a three-phase two-level boost AC/DC rectifier for high-power applications is conducted by investigating different modulation techniques. The rectifier performance is analyzed through a comparison between various modified carrier-based pulse width modulation (PWM) methods and the classical sinusoidal PWM technique. The two-level boost converter employing the conventional carrier-based PWM provides desirable performance for high-power applications, including low output voltage ripple, reduced total harmonic distortion (THD) of the input current, unity input power factor, and a well-regulated DC bus voltage. The classical PWM method has proven to be highly effective for two-level rectifiers rated within the range of 10 to 100 kW. Simulation results demonstrate that the conventional carrier-based phase-shifted PWM technique offers greater validity and flexibility for high-power applications of the three-phase two-level boost rectifier.

Keyword: Modulation technique, Carrier signal, Pulse width modulation (PWM), Multilevel rectifier

DETECTION OF FATIGUE CRACK FORMATION IN GLASS FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITE WITH DEEP LEARNING

METE KAYIHAN[1], AMMAR TARIK DİNÇER[1], MUSTAFA BAKKAL[1]

[1]Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Türkiye

Abstract

Fatigue failure and maintenance to prevent its damage cause waste of significant amount of energy, money and workforce especially in areas where mechanical loads occur in high cycles like aviation and automotive industry. In particular, discarding high-cost materials like composites results in enormous carbon production and energy waste which are undesirable outcomes in terms of environmental sensitivity. Elium thermoplastic composite is an eco-friendly and recyclable material, low-cost and high strength. Also, its production process decreases the carbon footprint compared to traditional epoxy-based composites. The aim of this project is to predict when the fatigue failure will occur. For this purpose, three different orientations of Elium thermoplastic composite (0/90, 0/90/45, 45/45) were subjected to fatigue tests at three different tensile strength values (45%, 60%, 75%). During the fatigue tests thermal images were captured using an infrared (IR) camera. It is aimed to predict the location and timing of potential failures using various machine learning (ML) algorithms. Results demonstrated that the predictions achieved a reasonable level of accuracy.

Keyword: Elium Thermoplastic Resin, Fatigue Fracture, Machine Learning, Convolutional Neural Networks, Infrared Thermography

1. Introduction

Composite materials have been widely used in many different fields depending on various advantages like design flexibility and superior mechanical properties (e.g. high specific strength). Utilizing these advantages, original structure of composite materials brings up some complexities. As they consist of matrix and reinforcement materials, they have non-uniform structure. Due to its non-homogeneous structure, various physical phenomena arise, and numerous distinctions about mechanical properties and performance of material emerge compared to conventional materials.

In composite manufacturing, there are a lot of parameters such as matrix-reinforcement materials, orientation of fibers, matrix-to-fiber ratio, curing temperature etc. This variation makes it difficult to determine the product properties in advance. In terms of dynamic structures, one of the most important mechanical properties is fatigue strength. Fatigue strength or endurance limit for conventional materials can be determined by executing the required type of fatigue (HCF: high cycle fatigue, or LCF: low cycle fatigue) test. There are analytic models for fatigue behaviour of conventional materials such as stress-life, strain-life, fracture mechanics and energy-based models [1]. However, many composite materials have unique dynamic properties. Therefore, novel composite materials are investigated separately for determining their characteristics.

Elium® is a commercial thermoplastic resin material utilized as matrix in composites. Although thermoplastics are less preferred than thermoset materials for structural purposes depending on their relatively weak mechanical properties, Elium promises superior properties compared to the other thermoplastic resin materials [2]. Similar to the other thermoplastics, Elium can be recycled which results in reduced carbon emission, reduced fuel consumption in automotive & aerospace industries, and compliance with European recycling & carbon emission regulations [3][4]. Moreover, its low viscosity makes it possible to produce by injection at the room temperature. Combining mechanical properties competitive with thermosets, ease of production and environmental advantages, Elium stands out as a promising composite matrix material.

Infrared Thermography (IRT), also referred to as thermal imaging, is a branch of non-destructive testing (NDT) that utilizes IR radiation to capture dynamic temperature distributions of materials and structures. Since all objects above absolute zero emit thermal radiation, IR cameras can detect and transform this radiation into electronic signals, which are then processed into thermal images. The growing use of IRT in diagnostics and monitoring stems from advancements in sensitivity, resolution, and affordability of IR cameras, making them increasingly applicable in fields such as aviation, construction, biomedical sciences, and cultural heritage conservation.

Two primary approaches define thermographic methods: passive thermography, which relies on natural temperature contrasts between the target and its environment, and active thermography, which employs external energy sources to create artificial contrasts. Passive thermography is frequently used in qualitative assessments. Active thermography, by contrast, is essential for NDT and defect detection, using energy sources such as lamps, lasers, or fluid heating to induce measurable contrasts [5]. Experimental configurations vary depending on whether the energy source is applied in reflection (same side as the camera) or transmission (opposite side), with reflection setups being more suitable for near-surface defects and transmission setups for deeper flaws.

This study investigates the dynamic behaviour of Elium thermoplastic composite for various fiber orientations with a distinctive method. During the fatigue tests of Elium composite, it was noticed that the temperature on the specimen surface was increasing with the loading cycle. Depending on this finding, it was assumed that there is a predictable correlation between the loading cycle and the surface temperature at that cycle. To state and solve this corelation IRT principles are applied via IR thermal camera. Various specimen configurations are tested in HCF tests. Surface temperature gradients are recorded via IR camera. Ultimate test results and acquired data is fed into the generated ML model to predict the timing of failure.

2. Materials and Methods

2.1. Material and Specimen Preparation

The material investigated in this study was Elium® thermoplastic resin (Arkema, France), selected as the polymer matrix due to its low viscosity, recyclability, and favorable mechanical properties compared with conventional thermoplastics. Glass fiber reinforcements were used to produce laminates with three different stacking orientations: 0°/90°, 0°/90°/±45°, and ±45°. The laminates were manufactured by resin transfer molding under ambient conditions. Owing to the resin's viscosity range of 100–500 cps at 25 °C, the infusion process was readily performed at room temperature without elevated curing requirements. After molding, the specimens were cut into standardized tensile and fatigue test geometries.

Before the fatigue tests tensile tests were conducted and results were represented in the former paper from this project [6]. The tensile properties of the laminates were first characterized to determine baseline mechanical behavior. The results showed that the 0°/90° orientation exhibited the highest tensile strength (550 MPa), followed by the 0°/90°/±45° (400 MPa) and ±45° (120 MPa) orientations, with corresponding moduli of 8.4, 7.0, and 2.85 GPa, respectively. These values were used as reference inputs for fatigue loading parameters. Results are given in the Table-1.

Table 1. Tensile properties of 3 different Elium composite configurations.

Fiber Orientation	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
0º/90º/ ±45º	400	7	6
0º/90º	550	8.4	6
±45º	120	2.85	21

2.2. Fatigue Testing

In conventional fatigue testing, the fatigue life of a material is determined under a specified cyclic stress level, typically expressed as a percentage of the material's ultimate tensile strength (UTS). However, in the present study, the primary objective was not to establish the fatigue life of the Elium composite specimens. Instead, the aim was to identify the location and onset of failure during cyclic loading. For this purpose, different crack detection methods were investigated.

Previous studies on metallic materials have employed thermal imaging to detect internal cracks, where localized heating or cooling fluctuations indicate the presence of damage [7]. However, since Elium is a polymer-based insulating material, the heating method did not yield meaningful results. Therefore, an alternative experimental setup was designed.

Rectangular specimens with dimensions of 5 × 15 × 200 mm were cut from Elium plates using a table saw. The specimens were then mounted on a 100 kN Dartec hydraulic fatigue testing machine. Mounting proved to be a critical step in the procedure, as the gripping stress had to be adjusted depending on the applied cyclic load. Because the applied stress varies with orientation, many specimens oriented at 0–90° failed prematurely at the beginning of testing due to gripping issues. Mounted specimen and experimental setup is represented in Fig. 2.

Figure 1. Experimental setup.

To monitor crack initiation and propagation, a FLIR T540 IR thermal camera was used to continuously observe the specimens during testing. Camera has 30 Hz frequency and an IR resolution of 464 × 348 pixels. The device has an operational temperature range of 0–650 °C, making it suitable for capturing thermal variations associated with mechanical damage in composites. The thermographic data were analyzed using FLIR Tools+ software, which allows detailed inspection of thermographic sequences.

Fatigue tests were conducted on specimens in multiple orientations, including 45–45°, 0–90°, and 0–90–45°, with three replicate tests performed for each orientation. The applied cyclic stresses were selected according to the tensile strength of specimens in each orientation.

2.3. Thermography and Data Acquisition

In the scope of this study, active thermography was used. The thermographic data acquired from the FLIR camera were first stored using its proprietary software. For the purposes of this study, the data acquisition system was designed to convert video recordings into individual frames suitable for processing in ML–based neural networks.

Before data processing, temperature standardization was performed to ensure clear thermal contrast between classes. This step is essential for enabling image processing algorithms to reliably distinguish between different output categories. Based on the known heat resistance of Elium composites, a temperature interval of 40–80 °C was selected for the 0/90 and 0/90/45 orientations, while a wider range of 40–100 °C was applied to the 45/45 orientation due to its distinct strength and yielding behavior.

The primary objective at this stage was to divide the thermographic video content into individual frames. Third-party video processing software was employed to extract and convert the data from FLIR Tools+. This conversion step was critical in generating a large dataset, which subsequently allowed for meaningful data structuring. Forming an organized dataset from the raw thermal recordings plays a crucial role in ensuring the efficiency of the ML algorithm.

The processed dataset was then split into three subsets: training, validation, and testing. This division is standard practice in many ML models including convolutional neural network (CNN) implementations, as it ensures that the model is trained on one subset, validated on unseen data to evaluate generalization, and finally tested on a distinct dataset to measure performance accuracy. In this study, the dataset was divided following the distribution of 75% training, 20% validation, and 5% testing data. This approach ensures standardized learning, validation, and final model evaluation.

2.4. Machine Learning Algorithm

The thermographic data obtained during fatigue testing were analyzed using a deep learning (DL) approach to enable automatic and reliable detection of fatigue-induced anomalies. Since the objective of this study was to capture localized temperature variations preceding crack initiation, CNN were selected as the primary framework due to their superior capability in extracting spatial features directly from raw image data.

The CNN architecture developed for this study consisted of five convolutional layers (kernel size 3×3, stride 1), each followed by a max-pooling layer (2×2 window) to reduce dimensionality while retaining essential features. Convolutional layers applied multiple filters to learn low- to high-level thermal patterns, such as edge gradients, localized hot spots, and larger crack-propagation signatures. Pooling layers prevented overfitting by downsampling and improved computational efficiency. The convolutional backbone was followed by a flatten layer, which transformed the extracted feature maps into a one-dimensional vector. This was then passed through two fully connected (dense) layers, responsible for integrating features and performing classification. CNN model is represented layer-by-layer in Table-2.

For activation functions, the Rectified Linear Unit (ReLU) was used in hidden layers to introduce non-linearity and accelerate convergence. At the output layer, a sigmoid activation function was selected, given the binary classification problem of distinguishing "healthy" versus "defective" states in the composite. Model optimization employed the binary cross-entropy loss function, with training conducted using the Adam optimizer due to its robustness and adaptive learning rate properties.

Regularization strategies were incorporated to avoid overfitting, including dropout layers between dense layers (dropout rate: 0.5) and early stopping during training when validation accuracy plateaued. The dataset was partitioned into training (75%), validation (20%), and test (5%) subsets, ensuring that the model generalized beyond the training set. Each orientation dataset (0°/90°, 0°/90°/±45°, ±45°) was modeled independently to account for orientation-specific thermal signatures. Training was conducted for up to 100 epochs, with mini-batch sizes of 32 images, but was halted earlier if convergence was reached.

Table 2. CNN model layer structure.

	Layer (type)
1	Convolution Layer (2D)
2	Pooling Layer
3	Convolution Layer (2D)
4	Pooling Layer
5	Convolution Layer (2D)
6	Pooling Layer
7	Convolution Layer (2D)
8	Pooling Layer
9	Convolution Layer (2D)
10	Pooling Layer
11	Flatten
12	Fully-connected layer
13	Fully-connected layer

3. Results and Discussion

Fatigue tests were conducted at three loading levels (45%, 60%, and 75% of UTS) for three fiber orientations (0°/90°, 0°/90°/±45°, and ±45°). The results demonstrated a strong dependence of fatigue life on both fiber orientation and applied stress level. While the ±45° laminates exhibited significantly reduced fatigue life compared to the other configurations, the 0°/90° orientation provided the highest strength retention. Importantly, thermographic monitoring revealed that localized heating consistently developed in the region of impending failure several minutes before final fracture, highlighting the sensitivity of IRT for early anomaly detection.

However, the 0°/90° orientation posed a particular limitation. Thermographic data indicated a nearly constant surface temperature (~39–42 °C) throughout cycling, with negligible thermal contrast until catastrophic fracture. Although the internal temperature increased up to ~65 °C at failure, the lack of measurable surface variation rendered this orientation unsuitable for visual-based processing. This finding underlines the importance of orientation-specific thermal behavior in composite diagnostics.

Thermographic datasets derived from fatigue experiments were processed using CNN architectures, with independent models trained for each orientation. High predictive performance was achieved for both the 0°/90°/±45° and ±45° laminates. For the ±45° orientation, training and validation accuracies reached 99% and 93%, respectively, while the 0°/90°/±45° orientation achieved 90% training and 89% validation accuracy. These results indicate that CNNs were able to effectively capture thermal gradients associated with defect evolution, despite the complexity

of the thermal data. CNN model performances for both these orientations and their training/validation sets are given below in Figure-2.

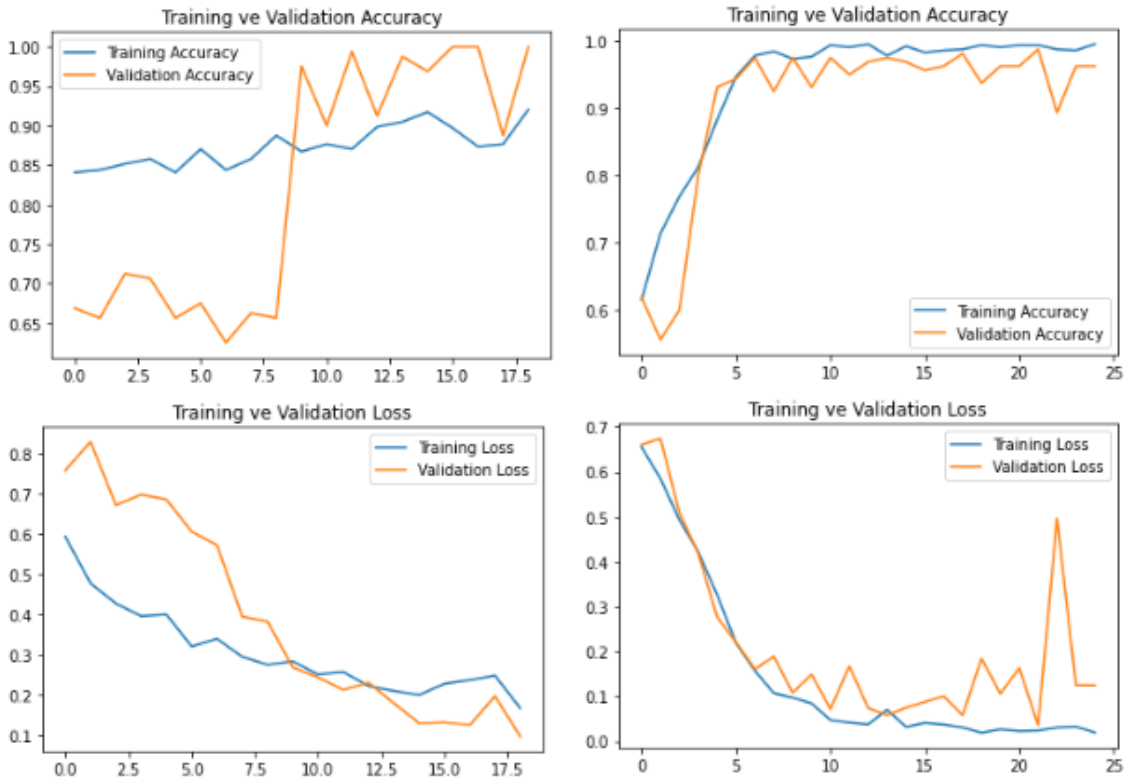


Figure 2. Prediction model performances for both ±45º and 0º/90º/45º orientations.

During training, care was taken to avoid overfitting, with early stopping applied when validation accuracy approached saturation. Notably, validation precision frequently approached 1.00 in the 0°/90°/±45° dataset, but the model was constrained to maintain generalizability. Loss function monitoring confirmed convergence within stable error margins, supporting the robustness of the training procedure.

Model performance was further validated using independent test datasets, comprising ~100 thermal frames per orientation. The CNN framework successfully predicted fatigue crack initiation 1–2 minutes prior to catastrophic failure with an accuracy exceeding 90%. Incorrect predictions did not exceed 10% of test cases, and in several instances, the model was able to identify critical zones more precisely than manual human observation.

The results confirm that integrating active IRT with CNN analysis provides a powerful predictive maintenance tool. By detecting early-stage fatigue damage, this approach has the potential to significantly reduce material waste, operational costs, and safety risks in industries where composite materials are employed under cyclic loading conditions.

4. Conclusion

This study investigated the fatigue behavior of Elium® thermoplastic composites using active IRT combined with DL–based image analysis. Fatigue experiments demonstrated a strong correlation between fiber orientation, applied stress level, and fatigue life. Thermographic monitoring revealed that localized heating consistently preceded fracture events, providing a reliable precursor

for damage detection. However, the 0°/90° orientation exhibited minimal surface thermal contrast, limiting the applicability of image-based processing for this configuration.

The ML framework, based on CNNs successfully processed orientation-specific thermographic datasets, achieving validation accuracies exceeding 90% for 0°/90°/±45° and ±45° laminates. The trained models were capable of predicting crack initiation 1–2 minutes before catastrophic failure, confirming the feasibility of combining IRT with CNN analysis for predictive maintenance. This approach not only enhances early fault detection but also offers the potential to extend component lifetimes, reduce maintenance costs, and improve operational safety in applications where composite structures are subjected to cyclic loading.

While the results are promising, limitations such as orientation-dependent thermal behavior and relatively small sample sizes should be addressed in future research. Further studies with larger datasets, diverse loading conditions, and advanced hybrid models may enable broader applicability across different composite architectures. Integration of real-time thermography with embedded sensing systems could also advance industrial implementation, supporting more sustainable and cost-effective use of composites in aerospace, automotive, and energy sectors.

References:

1. L. Zhang *et al.*, "Methods for fatigue-life estimation: A review of the current status and future trends," *Nanotechnology and Precision Engineering*, vol. 6, no. 2, p. 025001, Jun. 2023, doi: 10.1063/10.0017255.
2. H. B. Kaybal and H. Ulus, "Comparative analysis of thermoplastic and thermoset adhesives performance and the influence on failure analysis in jointed <scp>elium</scp> -based composite structures," *Polym Compos*, vol. 45, no. 4, pp. 3474–3492, Mar. 2024, doi: 10.1002/pc.28003.
3. The Council of the European Union, *Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on End-of Life Vehicles*. 2000, pp. 34–43.
4. The Council of the European Union, *Directive 2005/64/EC of the European Parliament and of the Council of 26 October 2005 on the Type-Approval of Motor Vehicles with Regard to Their Reusability, Recyclability and Recoverability and Amending Council Directive 70/156/EEC.* 2005, pp. 10–27.
5. S. Deane *et al.*, "Application of NDT thermographic imaging of aerospace structures," *Infrared Phys Technol*, vol. 97, pp. 456–466, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.infrared.2019.02.002.
6. M. Bakkal *et al.*, "Fatigue behavior and self-heating mechanism of novel glass fiber reinforced thermoplastic composite," *Advanced Composite Materials*, vol. 32, no. 6, pp. 899–915, Nov. 2023, doi: 10.1080/09243046.2023.2175764.
7. Z. Shi, X. Xu, J. Ma, D. Zhen, and H. Zhang, "Quantitative Detection of Cracks in Steel Using Eddy Current Pulsed Thermography," *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1070, Apr. 2018, doi: 10.3390/s18041070.

COKLU SENSOR FUZYONU ILE ENDUSTRIYEL ROBOT KALIBRASYONU

UĞUR ULU *[1], KEMAL FİDANBOYLU [1]

[1]Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE

Özet

Bu çalışma, bir robot sensörü ve bağımsız bir harici sensörden elde edilen konum verilerini birleştirerek statik bir köşe pozisyonunu yüksek doğrulukla tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Gürültülü ve belirsiz sensör ölçümlerinden daha güvenilir bir tahmin elde etmek için çoklu sensör füzyonu teknikleri uygulanmıştır. Çalışmada, her iki sensörden gelen 3 boyutlu (x, y, z) pozisyon verileri kullanılmıştır. Veriler öncelikle yüklenmiş, başlıkları düzeltilmiş ve sayısal formata dönüştürülmüştür. Farklı örnekleme hızlarına sahip olabilecek sensör verilerini uyumlu hale getirmek için her iki veri seti de ortak bir örnek sayısına yeniden örneklenmiştir.
Füzyon işlemi için bir Kalman filtresi kullanılmıştır. Kalman filtresi, yeniden örneklenmiş robot sensör verileri ve harici sensör verilerinin ortalaması alınarak oluşturulan birleştirilmiş ölçüm vektörlerini girdi olarak almıştır. Filtre, tahmin ve güncelleme adımları aracılığıyla yinelemeli olarak köşe pozisyonunun en iyi tahminini hesaplamıştır. Statik bir köşe pozisyonu varsayımıyla, durum geçiş modeli ve gözlem modeli basit birim matrisler olarak tanımlanmıştır. Proses ve ölçüm gürültüsü kovaryans matrisleri, filtrenin gürültüye karşı duyarlılığını ayarlamak için kullanılmıştır.Elde edilen sonuçlar, Kalman filtresi tarafından tahmin edilen köşe pozisyonlarının, bireysel sensörlerden gelen ham verilere kıyasla önemli ölçüde daha az saçılımlı olduğunu göstermiştir. 3 boyutlu görselleştirmeler, füzyon sonucunun ham sensör verilerine göre daha yoğun bir kümelenme sergilediğini açıkça ortaya koymuştur. Tanımlanan bir referans noktasına göre hesaplanan ortalama mutlak uzaklıklar, füzyon tahminlerinin hedeflenen köşe pozisyonuna yakınlığını nicel olarak doğrulamıştır.Bu çalışma, Kalman filtresi tabanlı çoklu sensör füzyonunun, robotik ve konumlandırma uygulamalarında sensör verilerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Elde edilen daha kararlı ve doğru pozisyon tahminleri, otonom sistemler ve hassas konumlandırma gerektiren diğer alanlar için önemli faydalar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çoklu Sensör Füzyonu, Kalman Filtresi, Köşe Pozisyon Tahmini, Robot Sensörü, Harici Sensör, Veri Füzyonu

THE EFFECT OF PROPOLIS IN BURN WOUND INFECTION MODEL INDUCED IN GALLERIA MELLONELLA LARVAE

MERVE CORA *[1], MİNE ENGİN [1]

[1]Karadeniz Technical University, Medicine Faculty, Trabzon, TÜRKİYE

Abstract

Propolis, mainly used by bees as a filler and disinfectant, has been utilized since ancient times to treat various diseases (1). In recent years, Galleria mellonella larvae have been increasingly employed to study bacterial infections and assess antimicrobial drug efficacy prior to mammalian preclinical studies (2). This study aimed to investigate the in vivo effect of propolis in G. mellonella burn wound and burn wound infection models. Ethanol extract of Ardahan propolis, previously shown to be effective against Staphylococcus aureus, was used. Burn wounds were created as described by Maslova et al (3). A 2 mm² steel nail was heated until red and applied to the larval dorsum for 4 seconds. Immediately after burning, 10 µL of bacterial suspension (0.5 McFarland) was applied. Ten minutes later, 10 µL of the extract was dripped onto the wound. Larvae were kept under appropriate conditions and monitored; immobile, pigmented (blackened) larvae were considered dead. Seven groups (10 larvae per group, 70 total) were used: (1) burn only, (2) burn with infection, (3) infection plus extract, (4) infection plus DMSO (control), (5) infection plus ampicillin (positive control), (6) extract on burn only (to assess wound healing), and (7) extract applied before bacterial inoculation (to assess protection). The study observed that larvae lived longer when propolis was applied after burns. Notably, when propolis was administered before and after infection, survival increased in some larvae. These results suggest that propolis with proven antibacterial properties is a promising natural agent for both prevention and treatment of burn wound infections.

Keywords: Propolis,Galleria mellonella, Wound Infection

References :

1. Kebede, I. A., Gebremeskel, H. F., & Ahmed, A. D. (2024). Bee products and their processing: a review. Pharm Pharmacol Int J, 12(1), 5-12.
2. Serrano, I.; Verdial, C.; Tavares, L.; Oliveira, M. The Virtuous Galleria mellonella Model for Scientific Experimentation. Antibiotics 2023, 12, 505.
3. Maslova E, Osman S, McCarthy RR. Using the Galleria mellonella burn wound and infection model to identify and characterize potential wound probiotics. Microbiology (Reading). 2023 Jun;169(6):001350. doi: 10.1099/mic.0.001350.

SYNTHETIC BRAIN VESSEL DATASET GENERATION FOR SINGLE MODALITY MRI AND 3D SEGMENTATION PERFORMANCE

MUHAMMED FATIH TALU[1] , MUSTAFA SAHIN[2] , ASLI GURSOY[3]

[1] Inonu University, Engineering Faculty, Computer Engineering, Malatya, Türkiye
[2] Hasan Kalyoncu University, Engineering Faculty, Computer Engineering, Gaziantep, Türkiye ;
[3] Hasan Kalyoncu University, Engineering Faculty, Software Engineering, Gaziantep, Türkiye

Abstract

Objective: T1-contrast MRI data seldom include voxel-level cerebrovascular labels, limiting supervised deep-learning approaches. This study proposes a fully synthetic brain-plus-vessel dataset and evaluates whether models trained only on such data can transfer to real images.Methods: (i) Vessel Shape Modelling – A VTK routine grows random yet anatomically plausible 3-D vessel trees. (ii) Vessel Volume Synthesis – 3 × 3 × 3 vessel patches extracted from clinical datasets are fused with Gaussian weighting and 2-D smearing to fill a 240^3 grid. (iii) Brain Tissue Synthesis – Analogous patch blending on healthy brain tissue yields a full T1ce volume. (iv) Merging – The vessel grid is rigidly aligned and intensity-matched to the brain volume, generating paired image-label cubes. (v) Model Training – A MONAI 3-D U-Net (Dice loss, AdamW, lr = 1e-4) was trained for 600 epochs on eight of ten synthetic volumes; two volumes formed a held-out test set.Results: On synthetic test data the network achieved Dice = 0.9966 and Hausdorff95 = 0.34 vox. When directly evaluated on real T1ce–MRA pairs the model retained Dice = 0.8011 and SSIM = 0.979, demonstrating promising zero-shot transfer given that no real labels were used during training.Conclusion: The proposed workflow delivers shareable, fully labelled brain–vessel volumes that bootstrap 3-D segmentation models without private annotations. Scaling the synthetic corpus and combining it with a small fraction of real data could further narrow the performance gap in future studies.

Keywords: Brain Vasculature, Synthetic Medical Data,deep learning

RF-MAGNETRON SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE KALAY OKSİT ve KALAY SÜLFÜR TABANLI İNCE FİLM GAZ SENSÖRLERİNİN ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU

MÜCAHİT OFLAZ*[1], SOHEİL MOBTAKERİ[2], MEHMET ERTUĞRUL[3], SAMAN HABASHYANİ[4], SEDANUR KELEŞ[5]

[1]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Trabzon, Türkiye
[2]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Trabzon, Türkiye
[3] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Trabzon, Türkiye
[4] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Trabzon, Türkiye
[5] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Trabzon, Türkiye

Özet

Günümüzde çevresel izleme, endüstriyel güvenlik, otomotiv emisyon kontrolü ve sağlık uygulamaları gibi birçok alanda gaz sensörlerine duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır. Bu bağlamda, metal oksit yarıiletkenlere dayalı gaz sensörleri, düşük maliyet, hızlı yanıt süresi, yüksek hassasiyet ve geniş algılama yelpazesi gibi avantajları sayesinde büyük ilgi görmektedir. Yarıiletken tabanlı gaz algılayıcı ince filmlerin üretilmesinde birçok yöntem ve teknik bulunmaktadır.

Bu çalışmada ise kalay oksit (SnO_2) ve kalay sülfür (SnS_2) ince filmlerin elde edilmesi amacıyla fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniklerinden biri olan RF-magnetron saçtırma yöntemi uygulanmıştır. 2 inçlik hedef malzemeler kullanılarak 10 mtorr çalışma basıncında ve 5,92 W/cm²'yi geçmeyecek elektriksel güçte alttaş yüzeye büyütmeler yapılmıştır.

Sonuç olarak gaz sensörleri için algılayıcı malzeme olarak üretilen SnO_2 ve SnS_2 ince filmler 200 nm kalınlığı geçmeyecek şekilde büyütülmüştür. Büyütülen SnO_2 ve SnS_2 ince filmler X ışını spektroskopisi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karaterize edilmiştir. Büyütülen filmlerin gaz hassasiyetini ve duyarlılığını öğrenmek amacıyla 'gaz sensör ölçüm sistemi' kullanılarak sensör testleri gerçekleştirilmiştir. Test edilen ince film yüzeye hidrojen (H_2) ve metan (CH_4) gazları gönderilerek sensör tepkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnce Film, Kalay Oksit, Kalay Sülfür, Gaz Sensörü, Magnetron Saçtırma

1. Giriş

Son yıllarda fosil yakıtların yerini alabilecek yeşil ve sürdürülebilir alternatif kaynaklar popüler hale gelmiştir.[1] 120MJ/kg enerji yoğunluğuyla hidrojen (H_2), benzin ve dizele göre yaklaşık üç katı enerjiye sahiptir. Bu yüzden hava kirliliğinin oluşması, fosil yakıtların tükenmesi, yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarının gelişmesi gibi sebeplerden dolayı H_2 alternatif enerji kaynağı olarak görülmektedir[2,3]. Ancak H_2'nin patlama sınırının hacimce yaklaşık %4-75 olması, tutuşma enerjisinin yaklaşık 0,02 mJ olması, difüzyon katsayısının yaklaşık 0,61 cm²/s olması gibi sebeplerden dolayı güvenlik konusunda sorunlar ortaya çıkarmaktadır[4-5]. Patlama

alt sınırının yaklaşık olarak hacimce %4 olması dolayısıyla H_2 gazının düşük konsantrasyonlarda tespit edilmesi kritik önem taşımaktadır[6,7].

Metan gazı (CH_4) ise kokusuz ve oksijen varlığında yanıcı bir gazdır [8]. Metan gazının havada hacimce %4-%15 arasında olması durumunda oksijen varlığında alev veya bir tutuşturucu ile karşılaştığında patlamalar meydana gelmektedir[9]. Özellikle hacimce %9,5-10 oranlarında en güçlü patlamaların gerçekleştiği söylenebilir[10]. CH_4'ün havaya göre yaklaşık iki kat daha hafif olmasından dolayı gaz sızıntıları veya kaçakları oluştuğunda CH_4 gazı yukarı hareket etme yönelimindedir. Bu durumda maden işletmelerinde, atık su arıtım tesislerinde, petrol ve gaz üretim endüstrilerinde ve geri dönüşüm tesisleri gibi kapalı bölgelerde yapılan çalışmalarda olası kazaları önlemek ve güvenliği sağlamak amacıyla CH_4 gaz yoğunluğunun izlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden H_2 gazı gibi CH_4 gazının da düşük konsantrasyonlarda tespit edilmesi kritik önem taşımaktadır[11].

Düşük konsantrasyonlarda H_2, CH_4 gibi kritik öneme sahip gazları tespit edebilmek için gaz sensörlerinin üretimi ve geliştirilmesi ciddi önem taşımaktadır. Metal oksit yarı iletken malzemelerin Tablo 1.'de gösterildiği üzere düşük maliyeti, uygulanabilirliği, küçük boyutu, gazlara karşı yüksek hassasiyeti ve kolay üretilebilir olması dolayısıyla gaz sensörü uygulamalarında kullanımı oldukça yaygındır [12,13,14]. Son zamanlarda 1nm-200nm arası film kalınlığına sahip MOS'lar, düşük kalınlık ve düşük boyutları nedeniyle giderek daha fazla kullanılmaktadır. Oluşturulan MOS nano filmlerin birim hacim başına yüksek yüzey alanına sahip olması sebebiyle nano boyuttaki parçacıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri gelişir. Bunun sonucunda malzemenin büyüme yönelimleri, büyüme geometrisi ve gaz algılama mekanizması geliştirilebilir(15).

Tablo 1. Çeşitli gaz sensörü türlerinin sensör parametreleri ile karşılaştırılması

	MOS Gaz Sensörleri	**Katalitik Yanma Gazı Sensörleri**	**Elektrokimyasal Gaz Sensörleri**	**Termal İletkenlik Gaz Sensörleri**	**Kızılötesi Emilim Gaz Sensörleri**
Hassasiyet ve Duyarlılık	A	B	B	D	A
Doğruluk	B	B	B	B	A
Seçicilik	C	D	B	D	A
Tepki Süresi	A	B	C	B	C
İstikrar	B	B	D	B	B
Dayanıklılık	B	B	C	B	A
Bakım	A	A	B	B	C
Maliyet	A	A	B	B	C
Taşınabilirlik ve Uygulanabilirlik	A	B	D	B	D

A:Mükemmel B: İyi C: Orta D:Zayıf

MOS gaz sensörlerinin performansını belirlemede birçok parametreler mevcuttur. Bu parametreler; duyarlılık, tepki, tepki süresi, geri dönüş süresi, kararlılık, hassasiyet, tekrarlanabilirlik, doğruluk, algılama sınırı olarak sıralanabilir[16,17,18]. Bir gaz sensörü için

mevcut parametreler arasında incelenmesi gereken ilk parametreler arasında duyarlılık gelmektedir. Burada duyarlılık, gaz sensörünün belirli bir konsantrasyonda gösterdiği tepkinin büyüklüğüdür. Bir MOS gaz sensörünün indirgeyici gaz ortamında duyarlılığını belirlemek için Ra/Rg, oksitleyici gaz ortamında duyarlılığı belirlemek için ise Rg/Ra oranından yararlanılmaktadır. Burada Ra gaz sensörünün maruz kaldığı referans gazın (genellikle kuru hava) direncini temsil eder, Rg ise hedef gazın direncini temsil etmektedir. Yüzdesel olarak ise [(Ra-Rg)/Ra]*100 bağıntısı kullanılarak ifade edilir(19).

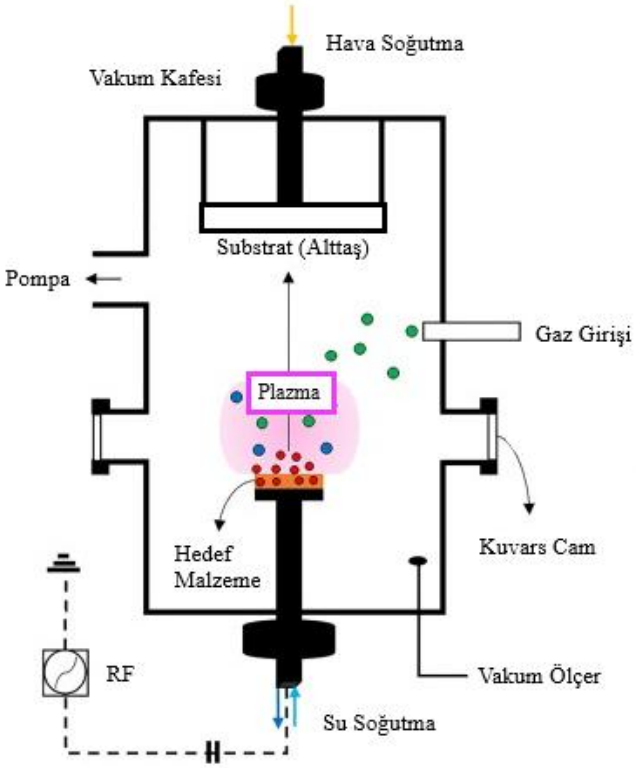
Metal oksit gaz sensörleri arasında en popüler olan malzemelerden birisi kalay oksittir[20]. Kalay oksit (SnO_2) n tipi yarı iletkendir ve 3,57eV gibi geniş bant aralığına sahiptir [21]. SnO_2 aynı zamanda 130 meV 'ye kadar eksiton bağlanma enerjisine[22], yüksek kimyasal kararlılığa, güçlü asitlerde ve alkelilerde çözünmezliğe, termal kararlılığa, üstün optik şeffaflık vb. birçok avantaja sahiptir[23,24]. Çoğu metal oksitler gibi SnO_2'de indirgeyici bir gaz ortamına maruz bırakıldığında malzeme yüzeyi ile hedef gaz arasındaki etkileşim sonucu direnç farklılıkları oluşur. Bu yüzden gaz tespitleri direnç farklılıklarına bağlı olarak ölçülür. Gaz algılama mekanizması ortamda bulunan oksijen moleküllerinin malzeme yüzeyine tutunmasıyla başlar. Bu süreçte, yüzeydeki elektronlar değerlik bandından ayrılarak bir elektron tükenme tabakası oluşturur ve bu durum malzemenin elektriksel direncini yükseltir. Ancak SnO_2 gibi malzemeler CH_4 gibi indirgen gazlarla temas ettiğinde, hedef gaz yüzeyde bağlı bulunan oksijen iyonlarıyla reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda elektronlar tekrar serbest kalır ve böylece malzemenin direnci azalır. Sonuç olarak gaza duyarlılık direnç farklılıkları ile belirlenir [25,26,27].

Bu çalışmada RF- magnetron saçtırma yöntemi ile Al_2O_3 alttaş üzerine SnS_2 ince filmler büyütülmüştür. Büyütülen ince filmlerden bir tanesi oksitlenerek SnO_2 ve SnS_2 yapıları oluşturulmuş ve karakterize edilmiştir. Üretilen ince filmler H_2 ve CH_4 gazına karşı gaz ölçümleri yapılarak gaz hassasiyeti belirlenmiştir. SnO_2 ince film H_2 ve CH_4 gazına karşı tepki gösterirken, SnS_2 ince film her iki gaz ortamında da tepki göstermediği görülmüştür. Bu yüzden SnO_2 tabanlı gaz sensörü üzerinde H_2 ve CH_4 gazlarının farklı konsantrasyonda ve farklı sıcaklıklarda; tepkileri, tepki süreleri, geri dönüş süreleri belirlenerek çalışma sonuçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

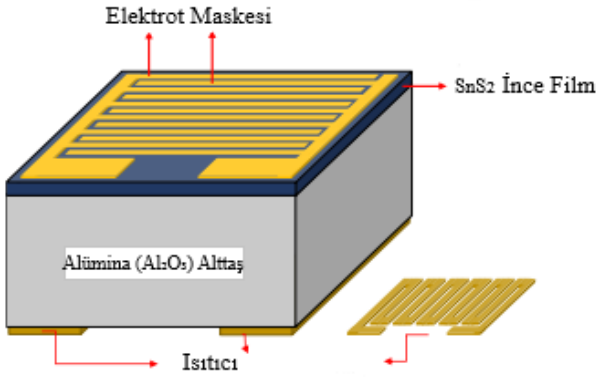
2.1. İnce Film Büyütülmesi

Kalay sülfür (SnS_2) ince filmler, belirli parametreler içerisinde alüminyum oksit (Al_2O_3) alttaş üzerinde ve n-Si alttaş üzerinde büyütüldü. Al_2O_3 ve n-Si alttaşlar büyütme işlemi öncesinde saf su ve kimyasal yöntemler ile ultrasonik temizleyici kullanılarak büyütme işlemine hazır hale geldi. Büyüme işlemi Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi radyo frekans püskürtme (sputtering) tekniği ile tamamlandı. Kaplamalarda %99,98 saflığa sahip 2 inç çapında SnS_2 hedef malzeme kullanıldı. İnce film büyütmeleri argon gazı ortamında 10mTorr çalışma basıncı, 80W elektriksel güç, 150 ºC alttaş sıcaklığı uygulanarak 20 dakika sürede gerçekleşmiştir.



Şekil 2.1. RF-Magnetron sputtering tekniği şematik görüntüsü

Al_2O_3 ve n-Si alttaş kullanılarak ikişer SnS_2 ince film üretildi. Bu numunelerden birer adet alınarak 380ºC sıcaklık ve 1 saat sürede SnS_2 filmler oksitlenme işlemi gerçekleşti. Burada n-Si alttaş üzerinde olanlar için karakterizasyon ölçümleri, Al_2O_3 alttaş üzerinde olanlar için ise gaz ölçümleri alındı. Gaz ölçümleri alınmadan önce ince film üzerine platin (Pt) kontaklar atıldı. Pt kontaktların oluşturulabilmesi için Magnetron Sputtering cihazı içerisine elektrot maskesi ile yerleştirilen numunenin şematik görüntüsü Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. İnce film üzerine kontakt atmak amacıyla yapılan maskeleme işlemi

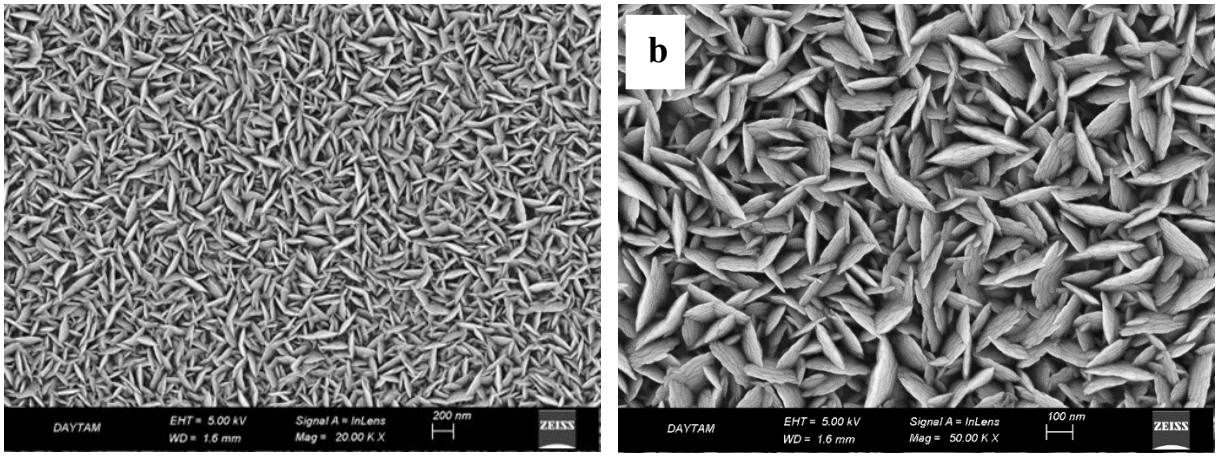
2.2. İnce Filmlerin Gaz Hassasiyetinin Belirlenmesi

Al_2O_3 üzerine büyütülen ince filmler gaz sensörü ölçüm sistemi üzerine yerleştirilmiş olup kuru hava (O_2) ortamında hidrojen (H_2) ve metan (CH_4) gazlarına maruz bırakılarak üretilen sensör malzemesinin tepkisi incelenmiştir. Gaz ölçümleri için farklı sıcaklıklarda gaz algılama ölçümleri yapılmış olup optimum sıcaklık derecesi belirlenmiştir. Numuneye belirlenen optimum sıcaklık uygulanarak kuru hava atmosferinde ve farklı konsantrasyonlarda H_2 ve CH_4 gazlarına maruz bırakılarak gaz ölçümleri yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

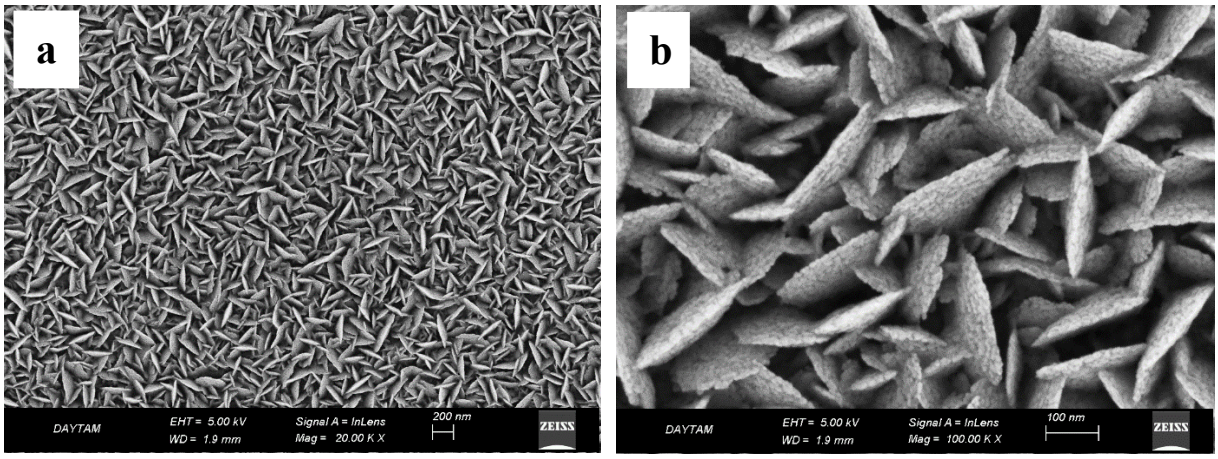
3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları

Silisyum alttaş üzerine büyütülen SnS_2 ve SnO_2 büyütmeleri için farklı büyütme oranlarında SEM görüntüleri alınmıştır. İnce film yüzeyinden alınan SEM görüntüleri Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 SnS_2 İnce filmlern SEM görüntüsü **a)**20000X büyütme oranı **b)** 50000X büyütme oranı

Şekil 3.1.'de Silisyum alttaş üzerine büyütülen SnS_2 ince film yapısının 20000X ve 50000X büyütme oranında SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde SnS_2 yapısının tüm alttaş üzerini kapladığı açıkça görülmüştür. Burada ince film, düzenli bir şekilde sıralanmış yaprak veya plak şeklindeki kristallerden oluştuğu söylenebilir. Oluşan bu yapıların kalay sülfürün kristalin yapısı ve büyüme yönelimleri hakkında bilgi vermektedir. Görüntüde plak veya yaprak şeklindeki yapıların düzenli olarak sıralanması filmin kaliteli ve düzgün bir şekilde büyüğünü göstermektedir.

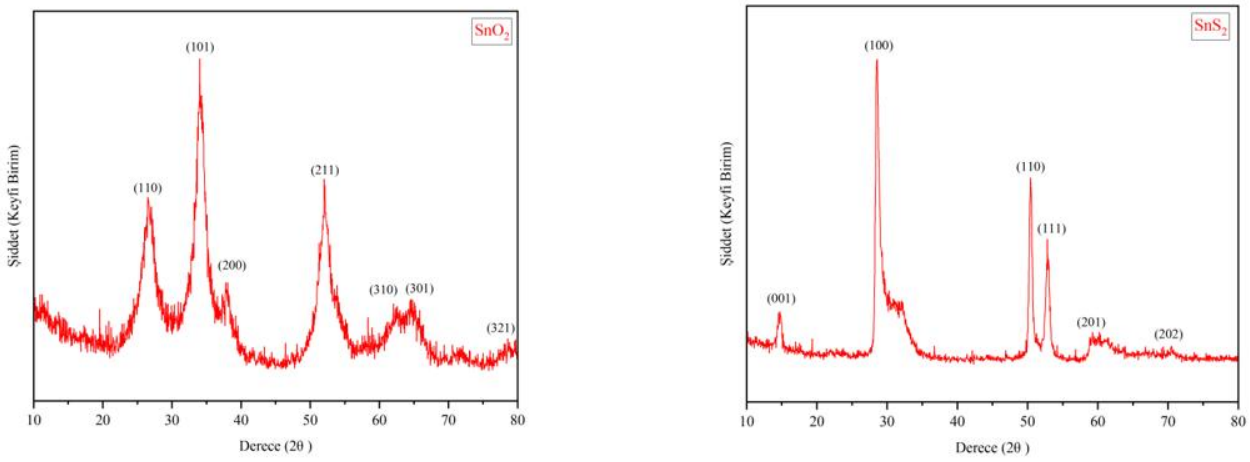


Şekil 3.2. SnO_2 İnce filmlern SEM görüntüsü a)20000X büyütme oranı b) 100000X büyütme oranı

Şekil 3.2.'de ise Silisyum alttaş üzerine büyütülen SnS_2 ince filmin oksitlenmesinden sonra oluşan SnO_2 ince filmin 20000X ve 100000X büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntü incelendiğinde Şekil 3'e benzer bir büyüme yapısı gözlemlendiği söylenebilir. Plak veya yaprak şeklindeki kristaller tüm alttaş üzerini örttüğünden dolayı kaliteli bir film yapısı oluştuğu söylenebilir. Şekil 3.2.b'de 100000x büyütme oranında yaprak şeklindeki yapıların içerisinde nano kümelerin oluştuğu söylenebilir. Nano boyuttaki bu küme yapılar SnS_2 ince filminin oksitlenmesi sonrası oluşan SnO_2 yapısının nano kümeler halinde oluşarak tüm yaprak şeklinde yapıyı sardığı, yaprak şeklindeki SnO_2 yapıların ise tüm alttaş üzerini kapladığı açıkça söylenebilir. Filmin mikroskobik detayları incelendiğinde ise pürüzlü bir yapının oluştuğu ve bundan kaynaklı pürüzlenmenin yüzey alanını arttırdığı da söylenebilir.

3.2. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizi

SnO_2 ve SnS_2 ince filmler için XRD analizleri yapılıp sonuçlar şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. SnS_2 ve SnO_2 filmlerin XRD ölçümü sonuçları

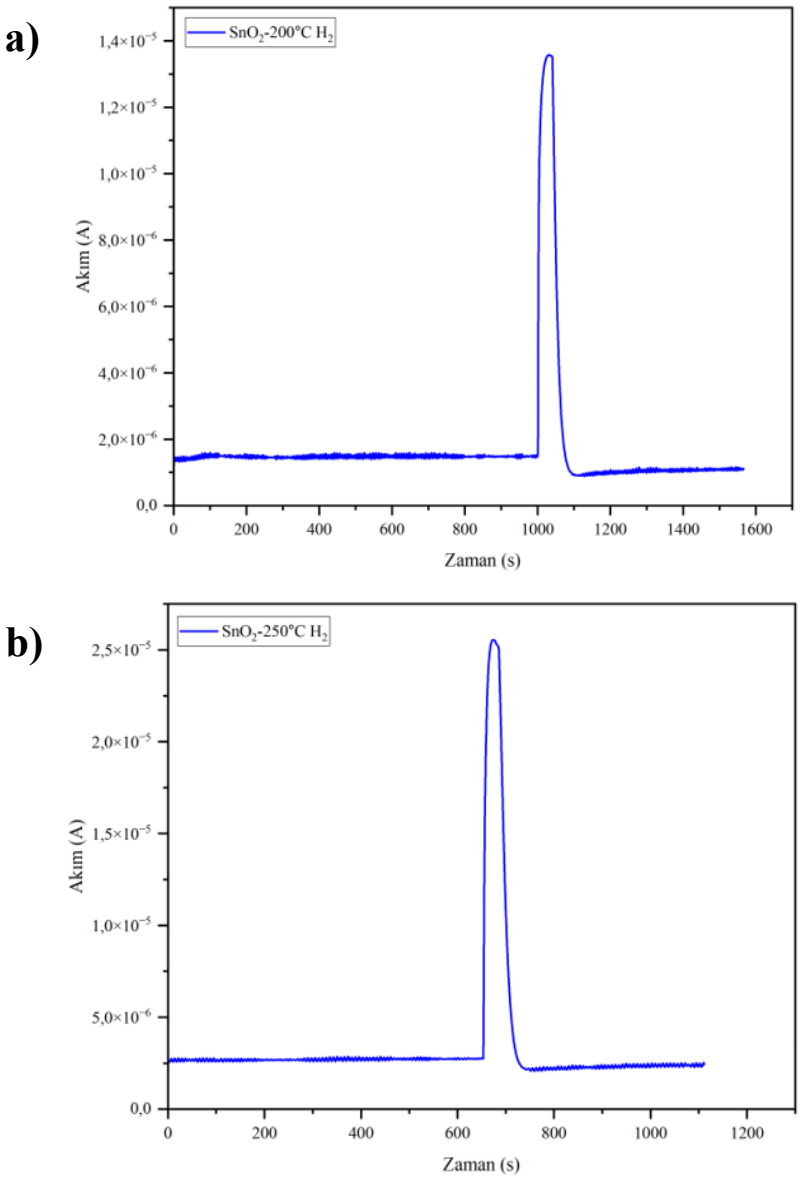
Şekil 3.3.'te görüldüğü üzere SnO_2 ve SnS_2 ince film büyütmeleri için difraktogramda herhangi bir ek pik tespit edilememiş olması, filmin yüksek saflıkta ve tek fazlı olduğunu

göstermektedir. SnO_2 difraktogramında kırınım pikleri incelendiğinde 2θ=26.6°, 33.9°, 37.9°, 51.7°, 61.9° ve 65.9° civarında SnO_2 film yapısının tetragonal rutil fazı ile birebir uyumlu olduğunu ve polikristin yapı sergilediğini gösterir [28,29]. SnO_2'nin (110), (101), (200), (211), (310/301) ve (321) düzlemleriyle uyumlu olup, filmde yalnızca SnO_2 fazının bulunduğunu göstermektedir. Özellikle 2θ=33.90º'da (101) düzlemindeki pikin yüksek şiddete sahip olması, filmin genel olarak bu yönelimde kristallenme gösterdiğini kanıtlar niteliktedir [30]. SnS_2 difraktogramında farklı derecelerdeki kırınım pikleri SnS_2'nin hekzagonal yapıda olduğu literatür tarafından destekler niteliktedir[30]. Özellikle 2θ=29º'de (100) düzleminde pikin yüksek şiddete sahip olduğu görülmektedir. SnS_2 difraktogramında (100) düzleminde SnS_2 filmin baskın olarak bu yönde kristallenme gösterdiği ve tercihli yönelimli büyümenin bu düzlem üzerinde gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Burada piklerin belirgin ve keskin olması, SnS_2 ince filminin yüksek derecede kristallenmiş yapıda olduğunu dolayısıyla kristal kalitesinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

3.3. SnO_2 İnce Filmin H_2 ve CH_4 Gaz Ölçümü Sonuçları

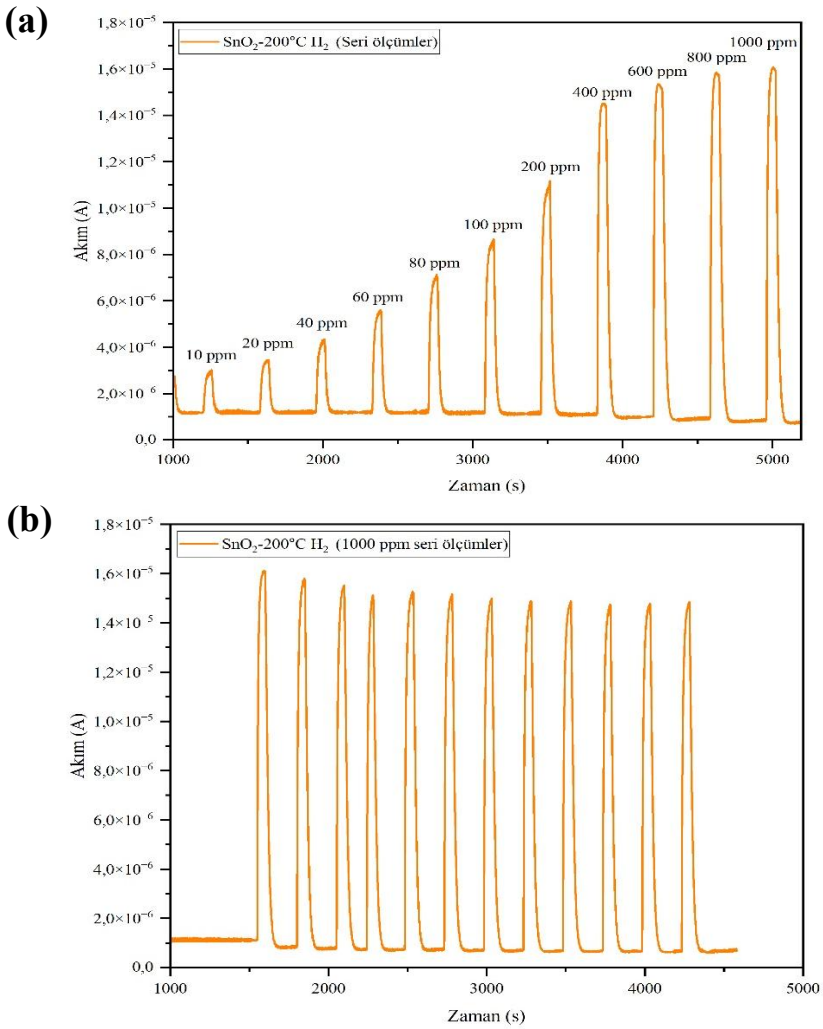
Büyütülen SnO_2 ve SnS_2 ince filmlerin H_2 ve CH_4 gazına karşı duyarlılıkları incelenmiştir. SnS_2 ince filminin oksitlenmesiyle elde edilen SnO_2 filmin farklı sıcaklık ve farklı konsantrasyonlarda H_2 ve CH_4 gazına karşı tepkisinin olduğu gözlemlenmiştir. SnS_2 filminde ise H_2 ve CH_4 gazına karşı herhangi bir tepki görülememiştir. Bunun sebebi metal oksit gaz sensörlerinin oksijen adsorpsiyonuna bağlı bir algılama mekanizmasının olmasıdır. Dolayısıyla metal oksitler özellikler indirgeyici gazlara karşı yüksek duyarlılık gösterir. Metal sülfürler ise oksijen adsorpsiyonuna dayalı (indirgeyici gazlar) algılama mekanizmalarında yüzey-gaz etkileşimi zayıf olduğu için duyarlılık oluşamaz. Yüzey-gaz etkileşiminin zayıf olmasının temel sebebi ise yüzeydeki oksijen adsorpsiyonunun metal oksitlere kıyasla zayıf olmasıdır.

SnO_2 tabanlı gaz sensörü ilk olarak H_2 gazına maruz bırakılmıştır. Kuru hava (oksijen) atmosferinde ve 1000ppm H_2 konsantrasyonunda farklı sıcaklıklarda (100ºC, 150ºC, 200ºC, 250ºC ve 300ºC) ölçümler alınmıştır. Herbir sıcaklık için sensör tepkileri, tepki süreleri, geri dönüş süreleri hesaplanmıştır. Buna göre 200ºC ve 250ºC'deki H_2 gaz ölçüm sonuçları diğer sıcaklıklara kıyasla iyi sonuç sergilemiştir.



Şekil 3.4. SnO_2 tabanlı gaz sensörünün H_2 gazı ölçüm sonuçları a) 200ºC sıcaklığında b) 250ºC sıcaklığında

Şekil 3.4.'de 200ºC ve 250ºC'de SnO_2 ince film gaz sensörünün H_2 gazına karşı gösterdiği tepkiler verilmiştir. SnO_2 tabanlı gaz sensörü 200ºC'de yapılan ölçümler sonucunda 1000 ppm H_2 konsantrasyonunda 8 kat tepki, 10s tepki süresi, 24s ise geri dönüş süresi vermiştir. 250ºC'de aynı koşullarda yapılan ölçümler sonucunda ise H_2 gazına karşı 8,34 kat tepki, 12s tepki süresi, 26s geri dönüş süresi vermiştir. Her iki sıcaklıklarda da yapılan ölçüm sonuçları birbirine yakındır. Ancak 200ºC'de yapılan ölçümlerde tepki süresi ve geri dönüş süresinin 250ºC'de yapılan ölçümlere kıyasla düşük olması, aynı zamanda sensörün fazla enerji harcamadan 250ºC sıcaklığıyla hemen hemen aynı sonuçları vermesi dikkat çekmiştir. Bu yüzden 200ºC çalışma sıcaklığında H_2 gazı için farklı konsantrasyonlarda seri ölçüm ve belirli konsantrasyonda tekrarlanabilirlik ölçümleri yapılmıştır.

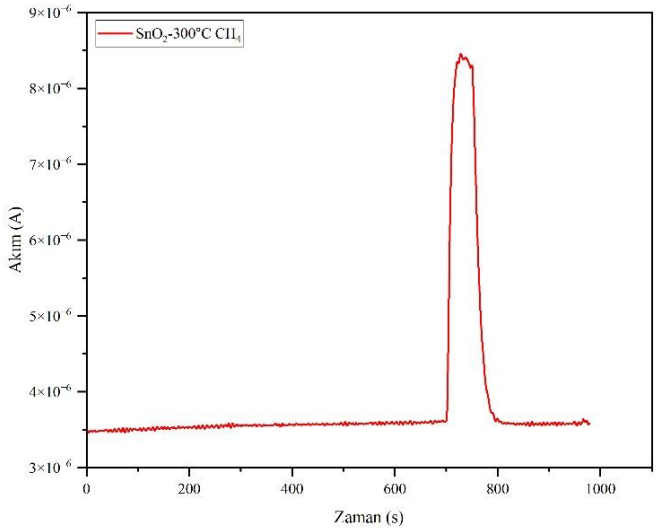


Şekil 3.5. SnO_2 gaz sensörü H_2 gazı seri ölçümleri a) farklı konsantrasyonlarda b) 1000 ppm konsantrasyonunda

Şekil 3.5a.'da SnO_2 tabanlı gaz sensörüne 10 ppm ile 1000 ppm konsantrasyonları arasında H_2 gazı verilmiştir. Grafikten de açıkça görüldüğü üzere H_2 gazı konsantrasyonu arttıkça sensör tepkisinin de arttığı görülmektedir. Burada 100 ppm, 200 ppm ve 400 ppm dolaylarında belirgin tepki artışları olduğu görülmektedir. Buna karşın 800 ppm ve 1000 ppm konsantrasyonlarında ise tepki artışlarının daha az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi SnO_2 ince filminin belirli konsantrasyondan sonra artık doyum noktasında ulaştığı ve doyum noktasına ulaştıktan sonraki konsantrasyonlarda tepki artış oranlarının daha az olduğu şeklinde açıklanabilir. Şekil 3.5b.'de ise SnO_2 tabanlı gaz sensörünün 1000 ppm H_2 konsantrasyonunda tekrarlanabilirlik/kesinlik seri ölçümleri yapılmıştır. Test süresince 12 adet ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde pikler arası büyük ölçekte bir farkın olmadığı ve stabilite sağlandıktan sonra tepkilerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

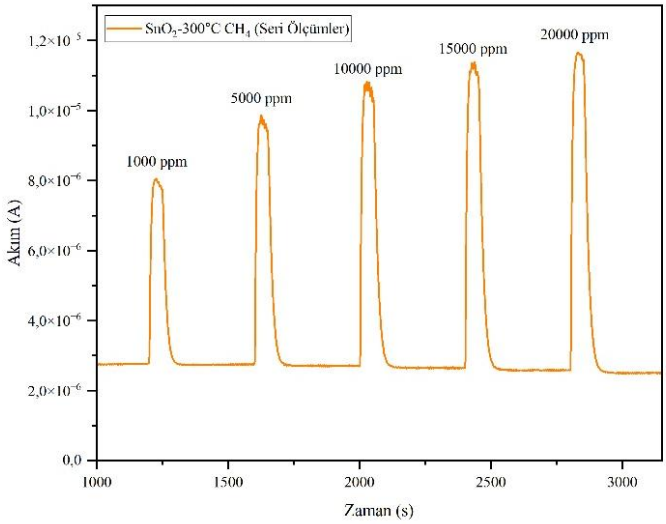
SnO_2 tabanlı gaz sensörünün H_2 gazı ölçümlerinin ardından 150ºC, 200ºC, 250ºC ve 300ºC sıcaklık değerlerinde CH_4 gazına karşı gaz ölçümleri alınmıştır. Her bir sıcaklık değerleri için

tepkileri, tepki süreleri ve geri dönüş süreleri belirlenmiş olup en iyi sonucu 300ºC çalışma sıcaklığında vermiştir.



Şekil 3.6. SnO_2 tabanlı gaz sensörünün 300 ºC sıcaklığındaki CH_4 gazı ölçüm sonuçları

Şekil 3.6.'da SnO_2 tabanlı gaz sensörünün 300ºC'de ve 1000 ppm CH_4 konsantrasyonundaki ölçüm sonuçları verilmiştir. Buna göre sensör CH_4 gazına karşı 1,34 kat tepki, 14s tepki süresi ve 26s geri dönüş süresi göstermiştir. Literatürde yapılan bir çalışmada ise 375ºC çalışma sıcaklığında ve 1500 ppm CH_4 konsantrasyonunda 15-18s arası tepki süresi, 23-27s arası ise geri dönüş süresi elde edilmiştir [31]. Bu nedenle yapılan çalışma literatüre kıyasla, daha düşük çalışma sıcaklığında benzer geri dönüş süresinin elde edilmesi ve aynı zamanda daha iyi tepki süresine sahip olması dolayısıyla önemlidir.



Şekil 3.7. SnO_2 tabanlı gaz sensörünün farklı CH_4 gazı konsantrasyonlarındaki seri ölçümleri

Şekil 3.7.'de ise yaklaşık 40000 ppm konsantrasyonlarında patlayıcı olan CH_4 gazı için SnO_2 tabanlı gaz sensöründe 1000 ppm, 5000 ppm, 10000 ppm, 15000 ppm ve 20000 ppm

konsantrasyonlarında alınan seri ölçümler gösterilmiştir. Burada da H_2 gazında olduğu gibi konsantrasyon arttıkça sensör tepkisinin arttığı görülmektedir. Sensör tepki artış oranları 1000 ppm, 5000 ppm ve 10000 ppm konsantrasyonlarında yüksek, 15000 ppm ve 20000 ppm konsantrasyonlarında ise düşük olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar

Sonuç olarak RF-magnetron saçtırma tekniği ile Al_2O_3 ve n-Si alttaş üzerine biriktirilen SnS_2 ince filmleri büyütüldü. Filmlerin morfolojisi değiştirilmeden termal oksidasyon ile SnO_2'ye dönüştürülmüştür. Silisyum alttaş üzerinde oluşturulan SnS_2 ve SnO_2 ince filmlerin farklı büyütme oranlarında SEM ölçümleri alınmıştır. SEM görüntülerine göre SnS_2 ve SnO_2 filmlerinde plak veya yaprak şeklinde büyümelerin olduğu ve tüm alttaş yüzeyini kapladığı anlaşılmıştır. XRD ölçüm sonuçlarına göre kırınım piklerinin literatür ile örtüştüğü ve yabancı bir kırınım pikinin mevcut olmadığı belirlenmiştir. SnO_2 ince filminin tetragonal rutil fazına sahip olduğu, SnS_2 filminin ise hekzagonal yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. SnO_2 ve SnS_2 ince filmlerinin SEM ve XRD karakterizasyonu n-Si alttaş üzerinde yapılmıştır. Al_2O_3 üzerinde yapılan büyütmelerde ise gaz ölçümleri alınmıştır. Gaz ölçüm deneme sürecinde SnS_2 tabanlı sensör gazlara karşı herhangi bir tepki vermemiştir. SnS_2 filminin termal oksitlenmesiyle elde edilen SnO_2 tabanlı sensör ise her iki gaz için de tepki vermiştir. Bu yüzden gaz ölçümleri SnO_2 tabanlı gaz sensörü için kuru hava (O_2) atmosferi içerisinde, 1000 ppm konsantrasyonunda ve farklı sıcaklıklarda H_2 ve CH_4 gazı ölçümleri alınmıştır. Buna göre SnO_2 tabanlı gaz sensörü H_2 için 200 ºC'de, CH_4 gazı için ise 300 ºC' en iyi sonuçlarını vermiştir. H_2 gazı için 200 ºC sıcaklığında ve 1000 ppm konsantrasyonunda 8 kat tepki, 10 s tepki süresi, 24 s ise geri dönüş süresi vermiştir. CH_4 gazı için yapılan ölçümde 300 ºC sıcaklığında ve 1000 ppm konsantrasyonunda 1,34 kat tepki, 14 s tepki süresi, 26 s ise geri dönüş süresi vermiştir. Elde edilen verilere göre H_2 gazı için 200 ºC'de, CH_4 gazı için 300 ºC'de farklı konsantrasyon aralıklarında seri ölçümler alınmıştır. Çalışma ile ilgili tüm ölçüm sonuçları ilgili yerlerde paylaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124N435 numaralı hibe kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, finansal destekleri için TÜBİTAK'a minnettardır.

KAYNAKÇA

1- Nogales-Delgado, S., Álvez-Medina, C. M., Montes, V., & González, J. F. (2023). A Review on the Use of Catalysis for Biogas Steam Reforming.Multidisciplinary Digital Publishing Institute.2023, (Vol. 13, Issue 12).
2- Kim, N., Cho, H. H., Kim, Y., Hwang, J., Choi, J. Y., & Yu, H. K. Formation of palladium nano-gap on self-cracked WO3 for hydrogen gas sensors. International Journal of Hydrogen Energy. 2023, 48(3), 1234–1239.
3- Wu, C. M., Shrisha, Motora, K. G., Chen, G. Y., Kuo, D. H., & Gultom, N. S. Highly Efficient MoS2/CsxWO3 Nanocomposite Hydrogen Gas Sensors. Frontiers in Materials, 2022, 9, 831725.

4- Sazali, N. Emerging technologies by hydrogen: A review. International Journal of Hydrogen Energy. 2020, 45(38), 18753–18771.
5- Fang, J., Yang, M., Dong, X., Luo, T., Pan, C., Liu, Z., Zhang, C., & Wang, H. Electrochemical-thermochemical complementary hydrogen production system for efficient full-spectrum solar energy storage. Thermal Science and Engineering Progress. 2024, 49, 102501.
6- Zhu, H., Guo, Y., Zheng, F., Li, C., Wu, J., Wang, T., Fu, Y., & Zhang, X. Introducing oxygen vacancies on sodium titanate via NaBH4 treatment for conductometric hydrogen gas sensors. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 375, 132916.
7- Shrisha, Wu, C. M., Motora, K. G., Kuo, D. H., Lai, C. C., Huang, B. R., & Saravanan, A. Cesium tungsten bronze nanostructures and their highly enhanced hydrogen gas sensing properties at room temperature. International Journal of Hydrogen Energy. 2021, 46(50), 25752–25762.
8- Sun, X., Tang, M., Yu, M., Fan, Y., Qin, C., Cao, J., & Wang, Y. UV-activated CH_4 gas sensor based on Pd@Ni/ZnO microspheres. Materials Today Communications. 2024, 40, 109551.
9- Şenel, O., & Samtaş, G. Kritik Metan Yoğunluğu Tespit Robotu Prototip Tasarımı ve Üretimi. İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları. 2022, 3(1), 33–46.
10- Solak, O. Türliye'deki Katı Atık Deponi Alanlarında Oluşan Gazın Çevresel ve Ekonomik Açıdan İncelenmesi. Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2015, 1-64.
11- Lambert,K.,Gürer, L.D. Yanıcılık Sınırları, http://www.cfbtbe.com/images/artikelen/artikel_34_TR.pdf, 2016.
12- Xue, S., Cao, S., Huang, Z., Yang, D., & Zhang, G. Improving Gas-Sensing Performance Based on MOS Nanomaterials: A Review. Materials. 2021, Vol. 14, Page 4263, 14(15), 4263.
13- Liu, Y., Zhu, L. Y., Feng, P., Dang, C., Li, M., Lu, H. L., & Gao, L. Bimetallic AuPt alloy nanoparticles decorated on ZnO nanowires towards efficient and selective H2S gas sensing. Sensors and Actuators B: Chemical. 2022, 367, 132024.
14- Liu, H., Wang, Z., Cao, G., Pan, G., Yang, X., Qiu, M., Sun, C., Shao, J., Li, Z., & Zhang, H. Construction of hollow NiO/ZnO p-n heterostructure for ultrahigh performance toluene gas sensor. Materials Science in Semiconductor Processing. 2022, 141, 106435.
15- Chen, X., & Mao, S. S. Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications and applications. Chemical Reviews. 2007, 107(7), 2891–2959.
16- Korotcenkov, G. Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? Materials Science and Engineering. 2007, 139(1), 1–23.
17- Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., & Ning, H. A Survey on Gas Sensing Technology Sensors. 2012, Vol. 12, Pages 9635-9665, 12(7), 9635–9665.
18- Huang, J., & Wan, Q. Gas Sensors Based on Semiconducting Metal Oxide One-Dimensional Nanostructures. Sensors. 2009, Vol. 9, Pages 9903-9924, 9(12), 9903–9924.
19- Patil, S. J., Patil, A. V., Dighavkar, C. G., Thakare, K. S., Borase, R. Y., Nandre, S. J., Deshpande, N. G., & Ahire, R. R. Semiconductor metal oxide compounds based gas sensors: A literature review. Frontiers of Materials Science. 2015, 9(1), 14–37.
20- Zhang, X., Sun, J., Tang, K., Wang, H., Chen, T., Jiang, K., Zhou, T., Quan, H., & Guo, R. Ultralow detection limit and ultrafast response/recovery of the H2 gas sensor based on Pd-doped rGO/ZnO-SnO2 from hydrothermal synthesis. Microsystems and Nanoengineering. 2022, 8(1), 1–12.

21- Lou, C., Yang, C., Zheng, W., Liu, X., & Zhang, J. Atomic layer deposition of ZnO on SnO2 nanospheres for enhanced formaldehyde detection. Sensors and Actuators B: Chemical. 2021, 329, 129218.
22- Park, K. R., Cho, H. B., Lee, J., Song, Y., Kim, W. B., & Choa, Y. H. Design of highly porous SnO2-CuO nanotubes for enhancing H2S gas sensor performance. Sensors and Actuators B: Chemical. 2020, 302, 127179.
23- Ojha, N., Bajpai, A., & Kumar, S. Enriched oxygen vacancies of Cu2O/SnS2/SnO2 heterostructure for enhanced photocatalytic reduction of CO2 by water and nitrogen fixation. Journal of Colloid and Interface Science. 2021, 585, 764–777.
24- Gao, S., Wang, N., Li, S., Li, D., Cui, Z., Yue, G., Liu, J., Zhao, X., Jiang, L., & Zhao, Y. A Multi-Wall Sn/SnO2@Carbon Hollow Nanofiber Anode Material for High-Rate and Long-Life Lithium-Ion Batteries. Angewandte Chemie - International Edition. 2020, 59(6), 2465–2472.
25- Sharma, A., Ahmed, A., Singh, A., Oruganti, S. K., Khosla, A., & Arya, S. Review—Recent Advances in Tin Oxide Nanomaterials as Electrochemical/Chemiresistive Sensors. Journal of The Electrochemical Society. 2021, 168(2), 027505.
26- Qiu, H., Zhao, L., Asif, M., Huang, X., Tang, T., Li, W., Zhang, T., Shen, T., & Hou, Y. SnO2 nanoparticles anchored on carbon foam as a freestanding anode for high performance potassium-ion batteries. Energy & Environmental Science. 2020, 13(2), 571–578.
27- Zhao, J., Zhang, J., Wang, L., Li, J., Feng, T., Fan, J., Chen, L., & Gu, J. Superior wave-absorbing performances of silicone rubber composites via introducing covalently bonded SnO2@MWCNT absorbent with encapsulation structure. Composites Communications. 2020, 22, 100486.
28- Chen, Z., Lai, J. K. L., Shek, C. H., & Chen, H. Synthesis and structural characterization of rutile SnO2 nanocrystals. Journal of Materials Research. 2003, 18(6), 1289–1292.
29- Elangovan, E., Singh, M. P., & Ramamurthi, K. Studies on structural and electrical properties of spray deposited SnO2:F thin films as a function of film thickness. Materials Science and Engineering. 2004, 113(2), 143–148.
30- Kiruthigaa, G., Manoharan, C., Raju, C., Jayabharathi, J., & Dhanapandian, S. (2014). Solid state synthesis and spectral investigations of nanostructure SnS2. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 129, 415–420.
31- Djuraklovna, N.K., and Ergashboyevna M.V. Response Time and Recovery Time of Semiconductor Sensor for Detecting Methane and Natural Gas. Index Copernicus. 2025, 4, 46-50.

INTEGRATED DESIGN AND FAULT SIMULATION OF A WIND ENERGY PMSG UNDER DEMAGNETIZATION CONDITIONS

LINA BOUHAFS[*1], MUSTAFA ERGIN SAHIN[2], AHCEN BOUZIDA[3], SALAH TAMALOUZT[1]

[1] Universite Abderrahmane Mira Bejaia, Algeria.
[2] Recep Tayyip Erdogan University, Turkey.
[3] University Ali Mohand Oulhadj, Algeria.

Abstract

The robust rotor architecture of permanent magnet synchronous generator (PMSG) makes them lightweight, dependable, and efficient, which is particularly beneficial in renewable energy applications like offshore wind turbines. However, several operational limitations can affect PMSG, potentially resulting in malfunctions that, if overlooked, may lead to the gradual deterioration of the machine. Made of neodymium, iron, and boron, permanent magnets known for their high energy density are commonly used in PMSG. Unfortunately, these magnets are sensitive to temperature and other operating conditions, which can lead to irreversible demagnetization. This paper introduces a 2D finite element method (FEM) approach for characterizing demagnetization. We present a co-simulation method that integrates Ansys software (Maxwell and Twin Builder) with MATLAB/Simulink to model a wind turbine-driven Permanent Magnet Synchronous Generator (WT-PMSG) controlled via direct current vector control MPPT. To address challenges in this area, a Finite Element Analysis (FEA) of the PMSG was developed. A novel co-simulation platform was established to analyze the mechanical and electrical components of the WT-PMSG. The conducted case studies demonstrate the electromagnetic coupling among system components by simulating various demagnetization fault scenarios and examining their effects on the stator current, voltages, and electromagnetic torque. The results underscore the sensitivity of PMSG performance to magnet degradation and the critical importance of early fault detection. The proposed approach provides a robust tool for design optimization and condition monitoring of offshore wind-driven PMSG, offering improved maintenance strategies and enhanced long-term machine resilience.

Keywords: Wind energy system; Permanent magnet synchronous generator; Finite element method; Demagnetization fault.

COMPARATIVE STUDY OF WINGLET AND WINGTIP DESIGNS ON GLIDER EFFICIENCY

ONUR ACAR*[1], MEHMET HANIFI DOGRU[1], IBRAHIM GOV[1]

[1]Gaziantep University, Turkey.

Abstract

This study examines the aerodynamic performance of different wingtip designs, including winglets, sharklets, and wingtip curves. Numerical simulations were carried out using ANSYS software to compare four configurations: a clean wing without extensions, a sharklet-equipped wing, a traditional winglet, and a curved wingtip. The results show that the wingtip curve achieved the highest lift and lowest drag among all tested configurations. The analysis showed that both winglets and sharklets decrease turbulent airflow—mainly because of increased surface area on the lower side of the wing—thereby boosting lift performance. Static pressure distribution studies indicated controlled airflow separation at the wingtips, which helps minimize vortex formation and reduce induced drag. Among these, the curved wingtip design was notable for offering better aerodynamic efficiency and greater flight stability. Modifying a sharklet into a winglet necessitates structural reinforcement at the wingtip, underscoring the importance of careful engineering considerations. Overall, the results highlight the superior performance of wingtip curves, particularly in terms of lift-to-drag ratio and aerodynamic stability, making them a promising solution for enhancing flight performance in future aircraft designs.

Keywords: Aerodynamic optimization,Wingtip devices, Drag reduction.

STRUCTURAL EFFECTS OF STATIC LOADS AND MOTORS LOCATION OPTIMIZATION IN GLIDER WINGS

ONUR ACAR*[1], MEHMET HANIFI DOGRU[1], IBRAHIM GOV[1]

[1] Gaziantep University, Department of Aircraft and Aerospace Engineering, Gaziantep, Turkey.

Abstract

This study examines the structural behavior of glider wings during operational flight conditions, focusing on the effects of aerodynamic loads and propulsion-related forces. It emphasizes understanding how stress and deformation develop along the wing structure, especially in response to distributed loads such as lift and localized forces from onboard components like motors and electronic speed controllers. The wing is modeled as a cantilever beam to simulate realistic loading scenarios, allowing the analysis of how both lift and component weights contribute to overall deflection. In addition to distributed aerodynamic effects, the thrust produced by ducted fan systems is examined as a significant factor influencing structural deformation. The relationship between load positioning and structural response is a key aspect of the analysis, with special attention given to the impact of engine placement along the wingspan. Calculations were performed to evaluate how different positions of thrust sources affect bending and shear forces across the wing. Findings highlight the importance of placing propulsion units closer to the fuselage to minimize adverse structural effects and improve load distribution. This positioning strategy enhances durability and reduces the risk of fatigue-related damage over time. Ultimately, the study provides insights into how load distribution and propulsion system placement influence the mechanical performance of glider wings. These results serve as a foundation for optimizing wing design and improving the structural reliability of lightweight aerial platforms during extended unpowered or semi-powered flight.

Keywords: Wing stress distribution, Load positioning, Glider structural analysis.

1. Introduction

This study delves into the analysis of stresses and strains experienced by aircraft wings under real flight conditions. The forces acting upon aircraft in the atmosphere, the pressures exerted on wing materials, aerodynamic effects, and various contributing factors have been thoroughly examined. The outcomes reveal specific stress and strain patterns on the wings, underscoring the significant influence of this phenomenon on both aircraft design and flight safety. A comprehensive understanding of these factors is imperative for advancing aviation technologies and ensuring the robustness of aircraft structures in diverse operational scenarios.

2. Materials and Methods

2.1. Stresses and Strains on the Wing Under Real Flight Conditions

Wing structures function mechanically similar to cantilever beams, exhibiting comparable responses under loading. Improper placement of components without considering structural balance may induce torsional and bending moments over time. Such effects can accelerate structural fatigue, compromising both aerodynamic performance and operational safety. Therefore, careful optimization of load distribution and component alignment is essential.

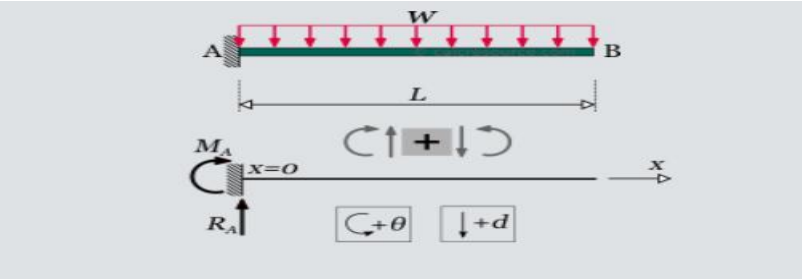


Figure 1 Cantilever Beam Deflection Due to Wind Loading[1]

As observed in cantilever beam deflection, the distributed load applied on the wing covers the entire span, as shown in Figure 1, leading to deflection across the wing. Therefore, we will attempt to calculate the applied load on the wing and explain it with equations. This will be approached academically.[1]

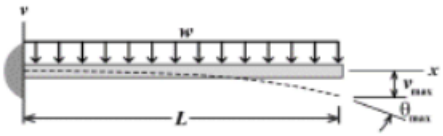


Figure 2 Spread load cantilever beam.[1]

Table 1 Cantilever beam distribution load calculation formula.[1]

Slope	Deflection	Elastic Curve
$\boldsymbol{\theta_{max} = -\frac{wL^3}{6EI}}$	$\boldsymbol{v_{max} = -\frac{wL^4}{8EI}}$	$\boldsymbol{v = -\frac{wx^2}{24EI}(6L^2 - 4Lx + x^2)}$

The impact of the distributed load on the wing is shown by the slope and deflection magnitudes, as outlined in Table 1 through formulated equations. Following these equations, the wing can be modeled as a cantilever beam. Additionally, the applied load and the corresponding slope angles are depicted in Figure 2. Calculating the deflection of a cantilever beam under distributed load involves four steps: first, determining the slope; second, calculating the deflection; third, evaluating the elastic slope magnitude; and finally, finding the deflection increment. This systematic method allows for a thorough analysis of how the wing responds structurally to the distributed load. As shown in Table 1, the formula for the effect of a cantilever beam on a rectangular wing under distributed loading has been developed. "The mathematical derivation of

this table will be elucidated below, thereby explaining how the distributed load acting on the wing induces deflection and formulates the slope gradient at the wingtip affected by this" load.

2.2. Wing Deformation Under Load and Thrust in Theoretical Conditions

Commencing with a focus on quantifying the deflection and inclination of the wing during non-flight conditions, we delve into specific calculations essential for wing analysis. Central to these computations is determining the geometry's inertial moment alongside the applied moment. Initially, we endeavor to ascertain the moment.

Subsequently: Moment Calculation:To determine the moments induced by loads along the wing, we employ the formula:

$$\boldsymbol{M = F \times d} \tag{4.20}$$

Here, M signifies the moment, F represents the force, and d denotes the moment arm (the distance from the wing to the fuselage). Deflection Calculation: We can ascertain the amount of wing deflection using the obtained moments. Utilizing the fundamental relationship governing the bending of an elastic beam, we can compute this deflection quantity. In a simplified scenario, the relationship between the bending moment M and the second moment of the wing I is expressed as:

$$\boldsymbol{\delta = \frac{M*L^2}{2*E*I}} \tag{4.21}$$

In this equation, δ denotes the deflection amount, L represents the length of the wing, E signifies the material's Young's modulus, and I (moment of inertia) signifies the second moment of the wing.

From here, how can we find I (moment of inertia):

$$\boldsymbol{I = \frac{bh^3}{12}} \tag{4.22}$$

From here, b represents the width of the rectangle's base, and h is the height of the rectangle. By utilizing these formulas in various ways, we can also understand how the thrust effect of the motor induces deflection on the wing. This allows us to determine the motor's location on the wing and make appropriate designs to reinforce the wing accordingly.
When considering an airplane wing as a rectangular beam, the deflection amount due to a uniformly distributed load (UDL) is calculated differently compared to a point load. In the case of a uniformly distributed load, the formula used to calculate deflection changes accordingly.

Under this heading, we will address two problems:

1. The load acting on the wing during flight.
2. The deformation of the wing along the chord axis due to the engine at full thrust.

2.3. The Load Acting on the Wing During Flight

Problem 1 Statement: Given an airplane wing considered as a rectangular beam subjected to a uniformly distributed load, the deflection of the beam needs to be calculated. Additionally, the weight of the motor, acting as a point load at a specified position along the wing, should be included in the deflection calculation. Given parameters:
Length of the wing ($\boldsymbol{L}$): 80 cm = 0.8 m
The width of the wing ($\boldsymbol{b}$): 24.2 cm = 0.242 m
Thickness/height of the wing ($\boldsymbol{h}$): 5.15 cm = 0.0515 m
Total uniformly distributed load ($\boldsymbol{W}$): 700 grams = 0.7 kg
Motor weight ($\boldsymbol{W_m}$): 41 grams = 0.041 kg
ESC weight ($\boldsymbol{W_{esc}}$): 35 grams = 0.035 kg
Total weight of main components: 76 grams = 0.076 kg
Position of the Motor and ESC along the span of the wing: 30 cm = 0.3 m

Conversion: To find the total force in Newtons, we multiply the mass by the acceleration due to gravity:

$$\text{Total distributed load: } \boldsymbol{W = 0.7\ kg \times 9.81\ m/s^2 = 6.867\ N} \tag{4.23}$$

$$\text{Total weight } (\boldsymbol{W_m + W_{esc}}) = \boldsymbol{0.076\ kg \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 0.7455\ N} \tag{4.24}$$

The load is assumed to be uniformly distributed across the length of the beam. The uniformly distributed load (w) is calculated as follows:

$$\boldsymbol{w = \frac{W_t}{L}} \tag{4.25}$$

where: w is the uniformly distributed load (N/m), W is the total load (N), and L is the length of the beam (m). Calculation of Moment of Inertia (I): For a rectangular section, the moment of inertia I is calculated using the formula:

$$\boldsymbol{I = \frac{bh^3}{12}} \tag{4.26}$$

Here: b= 0.8 m, h=0.0515 m Let's calculate:

$$\mathbf{I= \frac{0.8*(0.0515)^3}{12} = I=9.1060\times10^{-6}m^4} \tag{4.27}$$

Elastic Modulus (E) Value: Let's take the elastic modulus of the polystyrene foam as an average value:

$$\mathbf{E\approx3MPa=3\times10\ ^6N/m^2} \tag{4.28}$$

Deflection under Uniformly Distributed Load: The deflection ($\boldsymbol{\delta_{max}}$) at the end of a wing under a uniformly distributed load is calculated using the formula:

$$\delta_{udl} = \frac{5w*L^4}{384*E*I} \tag{4.29}$$

Calculation of Uniformly Distributed Load (w):

$$w = \frac{W}{L} = \frac{6.867\text{N}}{0.8m} = 8.58\text{N/m} \tag{4.30}$$

Deflection Calculation Substituting the values:

$$\delta_{udl} = \frac{5*8.58\text{N/m}*(0.8m)^4}{384*3\times\frac{10^6 N}{m^2}*9.1060\times10^{-6}m^4} = \frac{17.57}{10490.11} \approx 0.00168\text{m} \tag{4.31}$$

Result: The deflection at the end of the wing, made of foam and subjected to a uniformly distributed load totaling 700 grams, is approximately 0.00168 meters (approximately 1.68 mm).

Deflection Due to Motor and ESC Weight as Point Load: The deflection (δ_P) at the end of a cantilever beam with a point load P at a distance a from the fixed end is given by:

$$\delta_m = \frac{P\,a^2}{6EI}(3L - a) \tag{4.32}$$

$$\delta_{max} = \frac{0.7455\text{N}*(0.3m)^2*(3*0.8m-0.3m)}{6*3\times\frac{10^6 N}{m^2}*9.1060\times10^{-6}m^4} = \frac{0.1426}{163.908} \approx 0.00087\text{m} \tag{4.33}$$

Result: The deflection at the end of the wing, made of foam and subjected to a position load by motor weight totaling 76 grams, is approximately 0.00087 meters at the end of the wing. (approximately 0.87 mm).

Total Deflection: The total deflection at the end of the wing is the sum of the deflections due to the uniformly distributed load and the motor weight. During flight, the uniformly distributed load (aerodynamic lift) on the wing deflects it upward, while the weight of the motor deflects it downward. Therefore, to calculate the total deflection, we need to subtract the deflection caused by the motor's weight from the deflection caused by the uniformly distributed load.

$$\delta_{Total} = \delta_{udl} - \delta_m = 1.68\text{ mm} - 0.87\text{ mm} = 0.81\text{ mm} \tag{4.34}$$

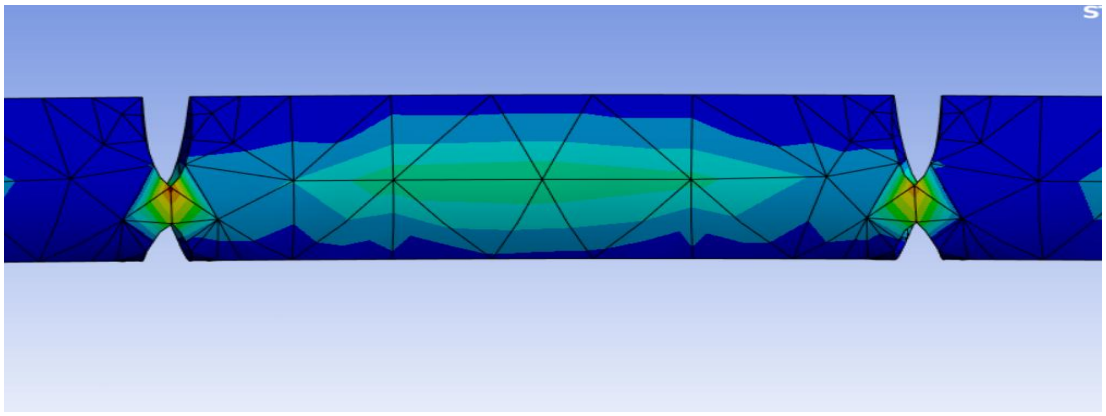


Figure 3 Stress Calculation Under Weight Application From Top Face

As shown in Figure 3 and Figure 4, the stress distribution on the wing under real flight conditions due to weight has been analyzed. Variations in stress intensity, particularly at the motor-wing connection structures, have been observed. These findings are crucial for assessing structural durability and ensuring the wing's reliability under operational loads.

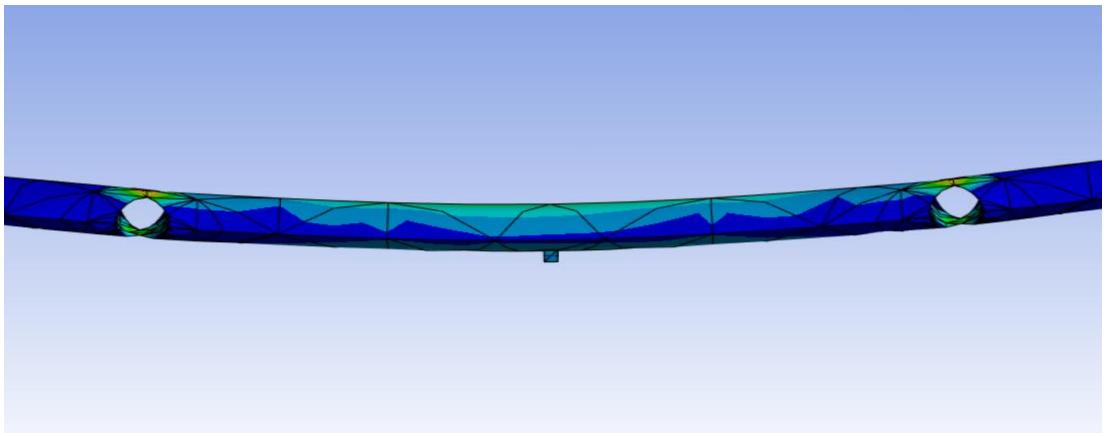


Figure 4 Stress Calculation under Weight Application From Front Face

As a result of the conducted analyses, it has been observed in Figure 4 that the wing structure experiences flexure in regions where the ducted fan and motor assembly attach to the wing, particularly when subjected to distributed loads. The flexural deformations, in conjunction with cyclic loading, may lead to fatigue and structural damage in the wing structure over time. To mitigate and reduce this flexibility, reinforcements should be implemented in these specific regions of the wing structure. This preventive measure aims to enhance structural integrity, diminish flexibility, and prevent the occurrence of fatigue-related damages, thereby contributing to the overall longevity and reliability of the wing assembly in aerial systems.

2.4. The Crucial Role of Engine Positioning for Thrust Bending

The positioning of engines on an aircraft significantly influences the balance of weight, and the shear and bending forces exerted on the wing due to the thrust generated by the engine are crucial factors. Thorough research and accurate analysis are essential in understanding this phenomenon.

Precise data are required to delve into the details of these effects. When determining the location of the engine, it is crucial to ensure that the motor thrust does not impose excessive bending forces on the wing and that rigidity is maintained. When determining the engine location, two crucial details take precedence: minimizing the shear moment exerted by the engine on the wing structure and enhancing the efficiency of the engine's air intake. By achieving these objectives, engine efficiency is improved, and structural damages and fatigue forces on the wing are minimized.
This academic discourse underscores the importance of optimizing shear moment, as seen in Figure 5, reducing and maximizing air intake efficiency during engine placement. Integrating these considerations aims to enhance overall aircraft performance while minimizing potential structural issues and fatigue forces on the wing.

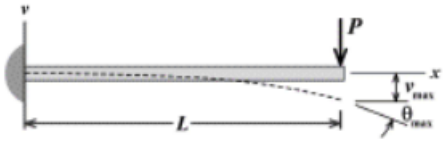


Figure 5 Positioning load cantilever beam. [1]

In aircraft design, calculating the load distribution on cantilever beams is critical, especially when placing components like engines. The position of the motor directly affects the bending moment and shear force acting on the wing structure.

In our configuration, the motors are mounted away from the root of the wing, increasing the moment arm and thus the resulting stresses. This highlights the importance of precise load calculations to ensure structural integrity and efficient load transfer across the cantilever system as seen in Table 2 mathematical format.

Table 2 Cantilever beam positioning load calculation formula.[1]

Slope	Deflection	Elastic Curve
$\boldsymbol{\theta_{max} = -\frac{PL^2}{2EI}}$	$\boldsymbol{v_{max} = -\frac{PL^3}{3EI}}$	$\boldsymbol{v = -\frac{Px^2}{6EI}(3L - x)}$

The deflection effect caused by the thrust force of ducted fan motors on the wing's vertical axis results in an elastic deformation of the wing. This deformation varies proportionally with the position of the engine along the wing. Therefore, to mitigate the impact of structural effects, it is necessary to position the motors closer to the fuselage.

This discussion emphasizes the intricate balance required when determining engine placement, considering both aerodynamic efficiency and structural implications on the wing. When defining the primary stresses on the wing, it is imperative to conceptualize our wing in three-dimensional coordinates, denoted as x, y, and z, particularly concerning the connection to the fuselage. This

facilitates the determination of normal stresses occurring between the motor fuselage and the wing-fuselage interface.

These stresses arise from static and dynamic forces. Static forces include the weight of the engine and the wing itself, contributing to the structural stress, while dynamic loads are influenced by factors such as increased engine thrust and aircraft velocity, affecting lift generation and the resultant upward force opposing the aircraft's weight. Additionally, drag forces play a role.

While these calculations are typically performed using software like Ansys, they can be successfully expressed through fundamental formulas. Thus, academically, it can be articulated as follows.

$$\sigma_x = -\frac{M_z Y}{I_z} + \frac{M_y Z}{I_y} \tag{4.19}$$

Here, M represents the moment applied to the wing, and when the coordinate axis is drawn over the fuselage, Z and Y denote the wing's axis perpendicular to the wing's longitudinal structure. I represent the moment of inertia. Here, we observe that the total stress is expressed through a simple formula. This formula is derived considering the forces and moments acting on the wing. In an academic context, it can be articulated as above.

2.5. The Deformation of the Wing Along the Chord Axis Due to the Engine at Full Thrust

Problem 2 Statement: To observe the effect of the thrust force from the engine on the wing, we will perform calculations based on the dimensions of our glider wing.

Given parameters:
Length of the wing (L): 80 cm = 0.8 m
The width of the wing (b): 24.2 cm = 0.242 m
Thickness/height of the wing (h): 5.15 cm = 0.0515 m
Conversion: To find the thrust force in Newtons, we multiply the mass by the acceleration due to gravity:

$$\boldsymbol{T = 0.35\ kg * 9.81 \frac{m}{s^2} = 3.43N} \tag{4.35}$$

Calculation of Moment of Inertia (I) for deflection: For a rectangular section, the moment of inertia I is calculated using the formula:

$$\boldsymbol{I = \frac{bh^3}{12}} \tag{4.36}$$

Here: In this calculation, we have to think b = 0.8 m, h = 0.242 m because we are using height as the wing veter axis, and L is b as the length of the wing. Let's calculate:

$$\mathbf{I = \frac{0.8*(0.242)^3}{12} = I = 9.45 \times 10^{-4} m^4} \tag{4.37}$$

Elastic Modulus (E) Value: Let's take the elastic modulus of the polystyrene foam as an average value:

$$\mathbf{E \approx 3MPa = 3 \times 10^{6} N/m^{2}} \tag{4.38}$$

Calculate the deflection (δ) due to the point force P applied at x = 0.3: The deflection (δ) at the end of a cantilever beam with a point load P at a distance a from the fixed end is given by:

$$\boldsymbol{\delta = \frac{P a^{2}}{6EI}(3L - a)} \tag{4.39}$$

where: P is the thrust force (3.43 N), a is the distance from the fixed end where the force is applied (0.3 m), L is the length of the beam (0.8 m), E is the modulus of elasticity (3MPa = $3 \times \mathbf{10^{6} N/m^{2}}$), I is the second moment of area ($\mathbf{9.45\backslash times\ 10^{-4} m^{4}}$). According to this calculation of example:

$$\boldsymbol{\delta_{max} = \frac{3.43N*(0.3m)^{2}*(3*0.8m-0.3m)}{6*3\times\frac{10^{6}N}{m^{2}}*9.45\times10^{-4}m^{4}} = \frac{0.6483}{17.010} *10^{-3} \approx 0.038mm} \tag{4.40}$$

Therefore, the deflection at the end of the wing due to the thrust force of 3.43 N applied at 0.3 m from the root is approximately 0.038mm.

As illustrated in Figure 6 and Figure 7, it is evident that positioning the engine closer to the fuselage is more desirable than an exaggerated depiction from the ANSYS program. This translation and academic discourse emphasize the importance of meticulous investigation and analysis in comprehending the impact of engine placement on the structural integrity of aircraft wings.[2,3,4]

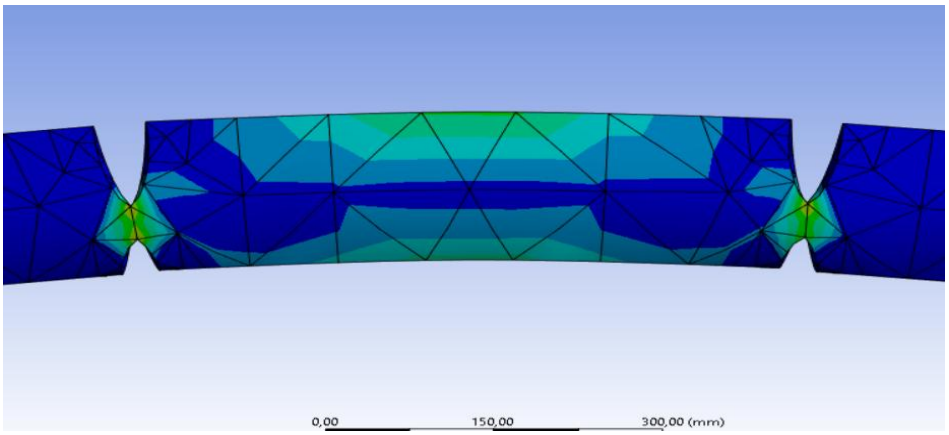


Figure 6 Ducted Fan Thrust Force Effect on Wing Structure.

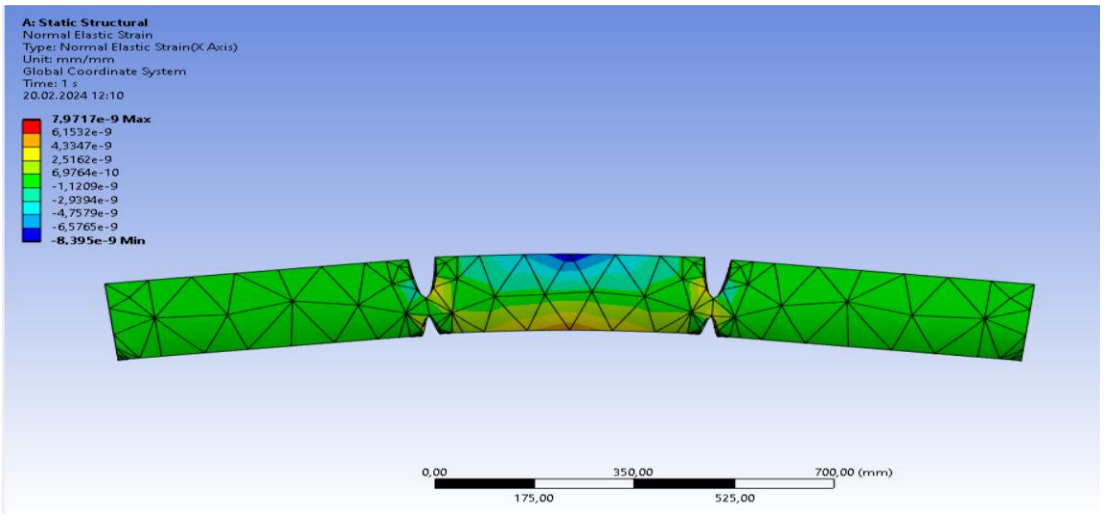


Figure 7 Comparison of Static Structural Effect According to Ducted Fan Motor Location 1

As evident from the differences in these two illustrations, as seen in Figures 7 and Figure 8, variations in engine locations result in distinct effects on shear and bending moments over the wing. Therefore, choosing the engine location plays a pivotal role, and being closer to the wingtip is found to be less advantageous due to the altered shear and bending moment effects. However, to ensure optimal air intake performance for engines positioned near the fuselage, a gap has been introduced between the engine and the aircraft's fuselage.

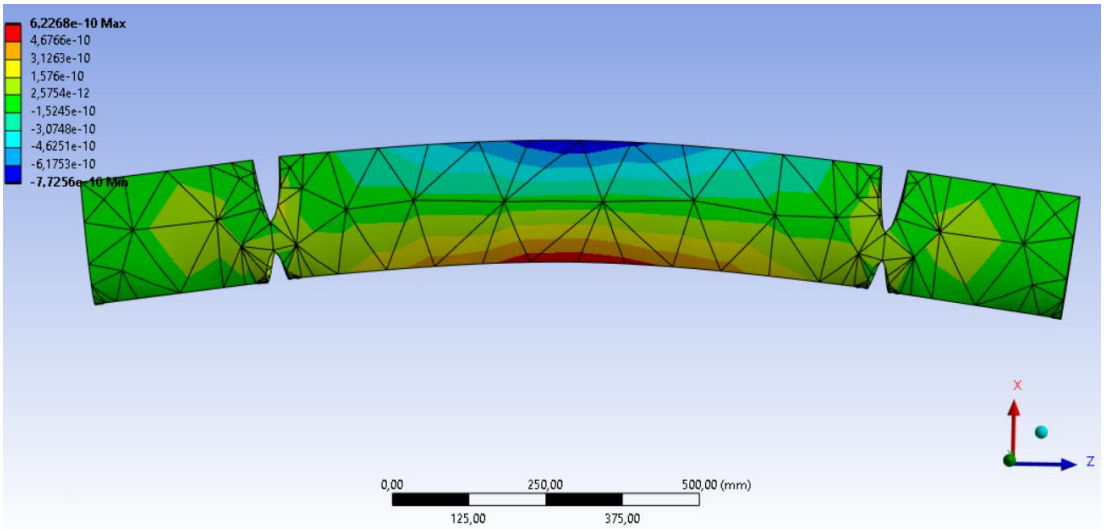


Figure 8 Comparison of Static Structural Effect According to Ducted Fan Motor Location 2

3. Results and Discussion

3.1. Wing Deflection Under Distributed Loads and Component Weight

This section of the study focused on assessing the structural behavior of the aircraft wing under the influence of uniformly distributed aerodynamic loads and discrete point loads caused by onboard components such as the motor and ESC.

Based on beam deflection theory and material properties, the aerodynamic lift-modeled as a uniformly distributed load-resulted in a tip deflection of approximately 1.68 mm. In contrast, the motor and ESC, acting as a point load at 0.3 m from the fixed end, produced a downward deflection of about 0.87 mm.

When the combined effect of both loading scenarios is considered, a net upward deflection of approximately 0.81 mm was identified. This outcome highlights the structural sensitivity of lightweight wing materials to minor mass concentrations and the importance of accurately modeling distributed and concentrated forces during design stages. Neglecting such loads could lead to underestimating fatigue accumulation and eventual structural degradation, particularly in high-stress connection zones.

Visual analysis results (Figures 3 and 4) supported this conclusion by demonstrating stress intensification around the motor-to-wing interface. These localized stress concentrations indicate a risk of fatigue initiation under cyclic loading, reinforcing the necessity of structural reinforcements in those specific areas. Optimizing component placement and load path continuity in these regions is therefore crucial for ensuring long-term durability and safety of the aerial vehicle.

3.2. Chordwise Deformation Induced by Engine Thrust

In the second phase of the investigation, the vertical elastic deformation caused by the 3.43 N thrust force of the ducted fan motor—applied at 0.3 m from the root—was analytically evaluated using cantilever beam principles. The resulting deflection was calculated to be approximately 0.038 mm, suggesting that under isolated loading, the structural response is relatively minor.

Nevertheless, this slight deformation should not be disregarded, as repetitive thrust cycles may lead to stress accumulation and material fatigue over extended operational periods. Simulation results (Figures 7 and 8) clearly illustrated the significant influence of engine placement on shear force and bending moment distributions across the wing. Configurations where the motor is placed near the wingtip were associated with elevated moment arms and increased structural stress, whereas positioning closer to the fuselage yielded more favorable load distributions and reduced deflection.

However, a trade-off exists. Engine positions too close to the fuselage may hinder airflow intake efficiency, compromising propulsion performance. To address this, a calculated spatial offset between the engine nacelle and the fuselage body was introduced. This design choice ensures adequate airflow while maintaining structural effectiveness, striking a necessary balance between aerodynamic and mechanical performance.

Overall, this analysis affirms that engine placement is a critical determinant of both structural integrity and aerodynamic efficiency. A well-optimized configuration not only enhances lift-to-drag characteristics but also prevents premature fatigue in the wing, thereby extending the lifespan of the UAV platform. Proper integration of engine thrust considerations into structural analysis enhances the aircraft's performance, safety, and operational reliability.

4. Conclusion of the Wing Deflection Performance

Both mathematical and theoretical calculations were performed to evaluate the applied loads within two problem scopes. The first analysis examined how the wing's load-bearing capacity changes in response to the applied forces. At the same time, the second focused on the impact of the installed motor on stress distribution at the wingtip and inner sections. These evaluations provided critical insights into structural behavior, helping to optimize design for improved durability and efficiency. The knowledge gained from this study has been instrumental in refining the construction phase, ensuring a more robust and aerodynamically efficient wing structure.[3,4,5]

References

[1] Hibbeler, R. C., & Nolan, G. (1997). *Structural analysis*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
[2] Gort Mas, M. (2016). Design of a system for measuring the weight and balance of sailplanes (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
[3] Yazar et al. (Yıl). *Static Aeroelastic Analysis of Strut-Braced Wings using Finite Element Method*. Journal Name, cilt(sayı), sayfa aralığı.
[4] Yazar et al. (Yıl). *Static Aeroelastic Tailoring of High-Aspect-Ratio Wings for Sailplanes*. ICAS Conference Paper.
[5] Raja Sekar, K., Ramesh, M., Naveen, R., Prasath, M. S., & Vigneshmoorthy, D. (2020). *Aerodynamic design and structural optimization of a wing for an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 764, 012058.

ACKNOWLEDGEMENT

First and foremost, I want to sincerely thank my family, whose constant support, patience, and encouragement have been the foundation of my motivation throughout this entire study. Their presence and belief in me have made this process not only possible but also meaningful.
I am also deeply thankful to M. Hanifi Doğru and İbrahim Gov for their valuable help and contributions during the research. Their insights and team spirit played a crucial role in overcoming technical challenges and improving the quality of this work.To all who stood by me during this journey, thank you.

%100 MICROMODAL VE MICROMODAL-KAŞMIR KARIŞIMLI ÖRME KUMAŞLARIN FARKLI İPLİK NUMARALARINA GÖRE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

EDA AKCURA*[1], ERSEN ÇATAK[1], ZÜLEYHA DEĞİRMENCİ[2]

[1] SANKO Tekstil İşletmeleri, Gaziantep, TÜRKİYE.
[2] Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü (İngilizce), Gaziantep, TÜRKİYE.

Özet

Bu çalışmada, %100 micromodal ve micromodal-kaşmir karışımlı örme kumaşların fiziksel özellikleri, farklı iplik numaraları kullanılarak üretilen numuneler üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Numune üretiminde yalnızca micromodal kumaş tam boyama işlemine tabii tutulmuş; kaşmir içeren karışımlı kumaşta ise yalnızca micromodal bileşeni boyanmıştır. Bu farklı üretim yaklaşımının kumaş performansına etkisi de değerlendirilmiştir. Elde edilen kumaş numunelerinde en, gramaj, mukavemet, renk haslığı, boncuklanma, esneklik ve yumuşaklık gibi temel fiziksel performans parametreleri analiz edilmiştir. Yapılan testler sonucunda hem iplik numarasının hem de elyaf karışım oranlarının kumaş özellikleri üzerinde önemli etkiler yarattığı belirlenmiştir. Özellikle daha kalın ipliklerden üretilen kumaşların daha yüksek gramaj ve mukavemet değerlerine sahip olduğu, ayrıca karışım oranlarının yumuşaklık ve boncuklanma performansını anlamlı biçimde etkilediği gözlemlenmiştir. Çalışmanın bulguları, yüksek konfor ve estetik beklentileri karşılayacak örme kumaş geliştirme süreçlerinde uygun iplik seçimi ve elyaf karışım oranlarının dikkatle belirlenmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: micromodal, kaşmir, iplik numarası, örme kumaş, fiziksel performans, boncuklanma, haslık, mukavemet

1. Giriş

Günümüzde tekstil sektörü, yalnızca temel giyim ihtiyacını karşılamaktan öte, kullanıcı odaklı çözümler sunmayı hedefleyen çok yönlü bir yapıya dönüşmüştür. Tüketicilerin artan bilinç düzeyi ile konfor, estetik, çevre dostu üretim, sağlığa uygunluk ve sürdürülebilirlik gibi kriterler, tekstil ürünlerinin tercih edilmesinde belirleyici unsurlar haline gelmiştir (Kara ve Yılmaz, 2020). Buna göre doğal ve fonksiyonel özellikleri bir arada sunan yeni nesil elyaf türlerinin ve bu elyaflarla oluşturulan karışımların önemi giderek artmaktadır (Yıldız, 2019). Özellikle hem kullanıcı konforunu artıran hem de yüksek performans sunan ürünler, günümüz tekstil tasarımlarının temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

Mikro modal elyaf, selülozik kökenli yapısı sayesinde doğaya uyumlu, biyolojik olarak parçalanabilir bir lif türüdür. Doğal kaynaklardan, özellikle kayın ağacından elde edilen odun hamurunun özel üretim süreçlerinden geçirilmesiyle üretilen bu lif, ince lif yapısı sayesinde yüksek nem yönetimi, nefes alabilirlik ve ipeksi yumuşaklık özellikleri sunar (Kara ve Yılmaz,

2020). Ayrıca lif yüzeyindeki düzgün yapı, kumaşın daha az pürüzlü olmasını sağlayarak cilt ile temasında hassasiyet gösteren kullanıcılar için de konforlu bir deneyim yaratmaktadır. Renk tutma kapasitesinin yüksek olması ve boyama işlemleri sırasında renklerin daha canlı kalması, mikro modal kumaşları estetik açıdan da cazip hale getirmektedir (Öztürk ve Çelik, 2021).

Buna karşılık, kaşmir elyafı, yumuşaklık, hafiflik ve yüksek ısı yalıtımı gibi üstün özellikleri nedeniyle lüks tekstil segmentinde sıklıkla tercih edilen bir hayvansal protein elyafıdır (Yıldız, 2019). Kaşmir, düşük lif inceliği (~14–19 mikron) ve yüksek termal performansı sayesinde özellikle kışlık giyim ürünlerinde öne çıkar. Bununla birlikte, hassas yapısı nedeniyle üretim ve bakım süreçlerinde özen gerektirir. Ancak, doğru karışım oranları ve uygun iplik teknolojileriyle kaşmir elyafı, farklı elyaflarla birlikte kullanıldığında hem dayanıklılığı artırabilir hem de maliyet avantajı sağlayabilir.

Mikro modal ve kaşmirin birlikte kullanımı, farklı yapısal ve fonksiyonel özelliklere sahip bu iki elyafın sinerjisini ortaya çıkararak hem estetik hem de performans açısından zengin kumaşlar geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Öztürk ve Çelik, 2021). Ancak bu tür karışımlarda, her iki elyafın lif uzunluğu, nem emiciliği, boya alma kapasitesi ve mukavemet gibi temel özellikleri dikkate alınarak karışım oranı dikkatle belirlenmelidir. Ayrıca, üretim parametrelerinden biri olan iplik numarası, kumaşın gramajı, mukavemeti, esnekliği ve genel dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili bir faktördür. İnce numaralı ipliklerle üretilen kumaşlar hafif ve yumuşak olma eğilimindeyken, kalın numaralı ipliklerde bu durum tersine dönmekte ve kumaşlar daha sıkı, tok bir yapıya kavuşmaktadır (Demirtaş ve Karakuş, 2017).

Bunun yanı sıra, boyama işlemleri de karışımlı kumaş üretiminde kritik bir aşamadır. Elyafların kimyasal yapılarının farklı olması, boya alma davranışlarının da farklı olmasına neden olur. Buna göre, sadece mikro modal bileşeni boyanmış karışımlı kumaşlarda renk homojenliği, renk haslığı ve estetik görünüm açısından bazı performans farklılıkları gözlenebilir (Şahin, 2020).Buda karışım oranın belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın amacı; mikro modal kumaşlara belirli oranda kaşmir elyafının eklenmesiyle iplik ve kumaş kalite değerlerindeki değişimin analiz edilmesidir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma kapsamında ring iplik makinesinde 4 farklı iplik üretilmiştir. Kullanılan bu ipliklere ait iplik numarası ve karışım oranları tablo1 de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan ipliği karışım özellikleri

İPLİK NUMARASI	KARIŞIM ORANI
Ne 30/1	%100 MICROMODAL
Ne 30/1	%90 MICROMODAL - %10 KAŞMIR
Ne 50/1	%100 MICROMODAL
Ne 50/1	%90 MICROMODAL - %10 KAŞMIR

Çalışmada Tablo 1.'de belirtilen iplikler ile elastanlı örme kumaş türü kullanılmıştır.
Kumaşlar 96 sistem sayısına sahip, 30 pus 24 fein Monarch marka makinede, 20 Td elastan ile örülmüştür.

Çalışmada kullanılan micromodal kumaşlar tam boyama işlemine tabi tutulmuşken, karışımlı kumaşlarda yalnızca micromodal bileşen boyanmıştır. Bu yöntemsel farklılığın kumaşların genel performans özellikleri üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Boyama işlemi sırasında kostik (sodyum hidroksit) uygulanmamış; işlem sırasında sıcaklık 80 °C'nin üzerine çıkarılmamıştır. Alkali kullanımında yüksek yoğunluk tercih edilmemiş, pH seviyesi kontrollü biçimde soda eklenerek ayarlanmıştır. Bu koşullar altında gerçekleştirilen boyama işlemi, hem lifin zarar görmemesi hem de renk performansının doğru şekilde analiz edilebilmesi açısından önem arz etmektedir.

2.2. Test Metotları

Elde edilen dört farklı elastanlı süprem numune kumaşlara uluslararası standartlara göre fiziksel testler uygulanmıştır. Uygulanan testler, testlerin yapıldığı cihazlar ve standartlar Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada uygulanan testler, kullanılan cihazlarve standartları

Uygulanan Test	Kullanılan Test Cihazı	Standart
Gramaj (g/m²)	Gramaj kesme aparatı ve hassas terazi	ISO 3801
Patlama mukavemeti	SDL Atlas	ISO 13938-2
Esneklik	Zwick Roell	
Renk haslığı	-	(ISO 105)
Boncuklanma	James Heal	(Martindale yöntemi) (ISO 12945-2)
Yumuşaklık	Emtec	-

3. Araştirma Bulgulari

3.1. İplik test sonuçları

Çalışmada kapsamında üretilen ipliklere uygulanan kalite test sonuçlarından dikkate alınan temel parametreler tablo 3 de sunulmuştur.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan ipliklerin kalite değerleri

	CVm (%)	Neps 200%	H	Mukavemet cN/tex	Uzama %
30/1 %100 micromodal	9,7	13,6	4,3	26	9,7
30/1 micromodal - kaşmir	11,9	113,2	5,9	28,6	9,3
50/1 %100 micromodal	12	67,7	3,8	24,7	9,4
50/1 micromodal - kaşmir	14,3	404	4,1	21,9	8,7

3.2. Kumaş performans analizi

3.2.1. Gramaj

Çalışma kapsamında üretilen kumaşlara ait gramaj test sonuçları Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Üretilen kumaşların boya sonrası gramajları

	GRAMAJ, gr/m2
30/1 %100 micromodal	186
30/1 micromodal - kaşmir	178
50/1 %100 micromodal	115
50/1 micromodal - kaşmir	104

3.2.2. Patlatma mukavemeti

Çalışma kapsamında üretilen kumaşlara ait patlatma mukavemeti test sonuçları Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 5. Üretilen boyalı kumaşların patlatma mukavemetleri

	Patlatma mukavemeti, kPa
30/1 %100 micromodal	495,8
30/1 micromodal - kaşmir	409
50/1 %100 micromodal	296,8
50/1 micromodal - kaşmir	235

3.2.3.Esneklik

Çalışma kapsamında üretilen kumaşlara ait esneklik test sonuçları Tablo 6'de sunulmuştur.

Tablo 6. Üretilen boyalı kumaşların esneklik değerleri

	En Esneklik, %	**Boy Esneklik, %**
30/1 %100 micromodal	122,7	100,2
30/1 micromodal - kaşmir	127,3	82,2
50/1 %100 micromodal	152,6	87,9
50/1 micromodal - kaşmir	198,9	97,3

3.2.4. Renk Haslığı

Çalışma kapsamında üretilen kumaşlara ait renk haslığı test sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Üretilen boyalı kumaşların renk haslık değerleri

	Renk haslığı
30/1 %100 micromodal	4/5
30/1 micromodal - kaşmir	4/5
50/1 %100 micromodal	4/5
50/1 micromodal - kaşmir	4/5

3.2.5. Boncuklanma

Çalışma kapsamında üretilen kumaşlara ait boncuklanma test sonuçları Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Üretilen boyalı kumaşların boncuklanma değerleri

	Boncuklanma
30/1 %100 micromodal	1/2
30/1 micromodal - kaşmir	1
50/1 %100 micromodal	2/3
50/1 micromodal - kaşmir	1

*Boncuklanma sonucunda değerlendirmeler örnek sonuç kartlarıyla karşılaştırılarak, 1 en kötü 5 en iyi şeklinde yorumlanmaktadır.

3.2.6. Yumuşaklık

Çalışma kapsamında üretilen kumaşlara ait yumuşaklık test sonuçları Tablo 9'de sunulmuştur.

Tablo 9. Üretilen boyalı kumaşların yumuşaklık değerleri

	Yumuşaklık
30/1 %100 micromodal	149
30/1 micromodal - kaşmir	167
50/1 %100 micromodal	161,4
50/1 micromodal - kaşmir	187,4

*Yumuşaklık sonuç değerlendirmesinde sonuç yüksek ise yumuşaklıkta yüksek olarak değerlendirilmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada hedeflenen, mikro modal kumaşa kaşmirin fiziksel etkisinin ne olduğunu incelemekti.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında üretilen tüm kumaşlara uygulanan test sonuçlarına göre; kaşmir, mikro modal ile birleştirilerek kumaşın yumuşaklık ve esneklik değerlerini yüksektir. Bu sonuca göre kaşmir mikro modal karışımı, kumaştan konfor beklentisi olan alanlarda kullanılabilir. Bununla birlikte kaşmir, mikro modal kumaştaki boncuklanma, ve patlatma mukavemetini düşürdüğü için hassas kullanım alanlarında tercih edilmesine neden olur.

Kumaştaki renk haslığına kaşmirin olumlu ya da olumsuz bir etkisi olmadığı saptanmıştır.

Kaynakça

1. Kara, S., & Yılmaz, M. (2020). Micromodal liflerinin özellikleri ve tekstil uygulamaları. *Tekstil ve Mühendis*, 27(123), 45–52.
2. Yıldız, B. (2019). Kaşmir elyafının örme kumaş performansına etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 25(2), 78–86.
3. Öztürk, E., & Çelik, H. (2021). Elyaf karışımlarının fiziksel özelliklere etkisi. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 31(4), 300–308.
4. Demirtaş, M., & Karakuş, E. (2017). İplik numarasının örme kumaş özellikleri üzerindeki etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3), 234–236.
5. Şahin, L. (2020). Karışımlı kumaşlarda boyama problemleri ve çözüm önerileri. *Tekstil Boya Teknolojileri Dergisi*, 15(1), 91–94.

EFFECT OF PIN DENSITY ON INTERLOCKING STRENGTH ANALYTICAL MODELING AND FEM VALIDATION OF FAILURE MODES IN POLYMER METAL INTERFACES

MEHMET ALADAG*[1], IZABELA ZGLOBICK[1], KRZYSZTOF KURZYDLOWSKI[1]

[1]Bialystok University of Technology, Poland

Abstract

This study investigates the influence of pin density (Na) on the mechanical interlocking performance between metallic substrates and polymer coatings through a theoretical and numerical approach. Using established analytical models for interfacial failure—including Mode I (polymer fracture), Mode II (pin failure), and Mode III (polymer shearing)—interlocking stresses are calculated for selected pin densities (Na = 3, 5, 8, and 13 pins/mm²). Finite Element Method (FEM) simulations are performed to model pull-out behavior under axial loading and to validate the predictions derived from the mathematical formulations. The study aims to assess the agreement between analytical stress estimates and FEM-based stress responses, and to evaluate how variations in pin density influence dominant failure mechanisms. The findings will support the development of design guidelines for mechanically interlocked hybrid structures based on controllable geometrical parameters.

Keywords: Mechanical interlocking, Pin density, Failure modes, Polymer-metal interface, Analytical modeling, Finite Element Method (FEM), Interfacial stress, Hybrid joint design.

ESTIMATING CROSS COUNTRY SKIING PERFORMANCE THROUGH ADVANCED MACHINE LEARNING TECHNIQUES

ALI KARAH BASH*[1], SHAHABODDIN DANESHVAR[1]

[1]Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, Turkey.

Abstract

This study advances performance analytics in cross-country skiers by building and evaluating a suite of machine learning models that forecast race completion times from readily obtainable athlete data. Six well-established algorithms—Optimized General Regression Neural Network (OPGRNN), standard GRNN, Support Vector Machine, Multilayer Perceptron, Radial Basis Function Network, and a Single Decision Tree—were trained on a data set that blends physiological measurements with extensive questionnaire responses. Before modeling, the Relief-F algorithm was applied to isolate the most informative predictors. Model accuracy was assessed through stratified ten-fold cross-validation, with root-mean-square error serving as the performance metric. Across all experiments, the OPGRNN consistently delivered the lowest error, indicating superior generalization and robustness. Because the input variables can be collected without laboratory testing, the proposed framework offers a practical alternative for coaches and athletes who lack access to high-cost equipment. The findings underscore the promise of tailored, feature-selection-enhanced machine-learning pipelines as accessible tools for talent identification, training load management, and strategic race planning in cross-country skiing.

Keywords: Machine Learning, Cross-country skiing, Race-time prediction, Feature selection, OPGRNN.

MICROWAVE SENSOR METHOD IN MATERIAL CHARACTERIZATION

HUSEYİN KORKMAZ*[1], UGUR CEM HASAR [1]

[1] Gaziantep University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Gaziantep, TÜRKİYE

Abstract

Microwave sensors offer unique advantages, including low cost, compact size, and high accuracy. In this context, they play critical roles in various fields such as health, the food industry, and defense. Resonance-based microwave sensors constitute an important class of sensors due to their superior sensitivity and accuracy. This study proposes a repeatable and applicable microwave sensor to characterize samples. These sensors achieve detection through a shift in the resonant frequency and/or a change or deterioration in the quality factor after the sample is placed in the resonator. As a result of the literature review, it has been identified that quality factor (Q-factor), depth of transmission/reflection scattering parameters, and structural simplicity are critical performance parameters for the proposed sensors. Moreover, these parameters pose potential limitations and drawbacks in the sensors presented in the literature. The proposed transmission-based sensor shows better performance compared with sensors available in the literature, with an approximately 2.66 GHz resonance frequency and a −61.54 $|S_{12}|_{dB}$ value. The proposed sensor can be preferred in industry and sensing applications.

Keywords: Microwave, Characterization, Quality Factor, Sensor

DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF AN INTERNET OF THINGS (IoT)-ENABLED AUTOMATIC AQUAPONIC SYSTEM

YÜKSEL TOKUR BOZKURT[1] , ADİL CEYLAN*[2]

[1]Gaziantep Islam Science and Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Gaziantep, TURKIYE.

[2]Kızılhisar Vocational and Technical Anatolian High School, Department of Industrial Automation, Gaziantep, TURKIYE.

Abstract

Global issues such as climate change, increasing population, and the reduction of agricultural land make it imperative to develop sustainable and efficient food production systems. Traditional agriculture and fish farming methods fall short of meeting the growing food demand due to their dependence on water and land efficiency and climatic conditions. In this context, aquaponic systems offer a closed-loop production model with low water consumption and space-saving advantages by integrating aquaculture and hydroponics. However, the manual management of these systems increases both time requirements and the risk of human error, particularly because it necessitates continuous monitoring of critical environmental parameters such as pH and temperature. In this study, to overcome these challenges, a mobile aquaponic system integrated with the Internet of Things (IoT) and based on the ESP32 microcontroller was developed. The system continuously monitors key environmental variables such as water temperature, plant temperature, pH level, water level, light condition, and feeding schedule through integrated sensors and automatically controls these parameters to keep them within the desired ranges. Cloud based data transmission is provided through the BLYNK platform, enabling real time monitoring and manual intervention via both web and mobile interfaces. During a four-week experimental process using guppy fish and strawberry plants, observations revealed that growth values in the automated system were statistically significantly higher compared to traditional methods. The findings indicate that IoT-based automation offers significant advantages in terms of resource efficiency, production stability, and scalability in aquaponic systems.

Keyword: IoT-based Aquaponics, Sustainable Agriculture, Automated Food Production, IoT

EFFECT OF COLD SPRAYING PARAMETERS ON THE DEPOSITION PERFORMANCE OF ADDITIVELY MANUFACTURED Ti6AL4V ALLOY

Doğukan KOLCU[1], Dursun MERİÇ[2], Hüseyin Can AKSA[3], Tuğçe DOKUZ[1], Harun YANAR[1], Ömer Necati CORA[1,4], Hasan GEDİKLİ[1], Temel VAROL[5], Gençağa PÜRÇEK[1]

[1]Karadeniz Technical University, School of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Trabzon, Türkiye
[2] Karadeniz Technical University, Abdullah Kanca Vocational School, Trabzon, Türkiye
[3]Karadeniz Technical University, Medical Device Design and Production Application and Research Center (METAM), Trabzon, Türkiye
[4]KTÜ-TUSAŞ UAV Technologies & Thermal Management Systems Laboratory, Trabzon, Türkiye
[5]Karadeniz Technical University, School of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Trabzon, Türkiye

Abstract

Cold Spray (CS) is a solid-state coating process in which metal powders are propelled to supersonic velocities by a high-pressure, high-velocity gas stream at relatively low temperatures. Upon impact with the substrate, particles undergo extensive plastic deformation, enabling metallurgical bonding without melting. This solid-state mechanism preserves the chemical and microstructural integrity of the feedstock material while minimizing thermal degradation phenomena such as oxidation, porosity, and residual stresses. Consequently, CS enables the fabrication of dense, uniform coatings with favorable surface morphology and mechanical performance. Due to these advantages, CS has emerged as a promising technology for highperformance applications in the aerospace, defense, and space sectors—particularly in surface refurbishment, dimensional restoration, and corrosion-resistant coating systems—where thermal effects must be minimized. In this study, CS deposition was sprayed onto a Ti6Al4V substrate (60×60×4 mm³) fabricated via Selective Laser Melting (SLM), using spherical Ti6Al4V powders with a particle size distribution of 0–20 µm. The primary objective was to optimize CS process parameters to observe coating integrity and interfacial adhesion. Considering the limitations of low-pressure spraying, temperature, nozzle-distance, and advancement speed were fixed at constant values, while gas pressure and powder feed rate were systematically varied. Coating characteristics—including thickness, homogeneity, surface morphology, and adhesion—were evaluated through scanning electron microscopy (SEM). Subsequently, under the previously optimized selected parameter set, the effect of different advancement speeds (10, 20, 30, and 40 mm/s) on the accumulation behavior was analyzed.

Keyword: Additive Manufacturing, Cold Spray, Ti6Al4V, Coating, Advancement Speed

EFFECT OF Ti6Al4V COLD SPRAYING ON THE SURFACE QUALITY OF ADDITIVELY MANUFACTURED AlSi10Mg ALLOY

İBRAHİM CAN DUMAN[1] , DURSUN MERİÇ[2], HASAN GEDİKLİ[1], REMZİ ECMEL ECE[3], ÖMER NECATİ CORA[1,4]

[1]Karadeniz Technical University, Department of Mechanical Engineering, Trabzon, TÜRKİYE.
[2]Karadeniz Technical University, Abdullah Kanca Vocational School, Trabzon, TÜRKİYE.
[3]Turkish Aerospace Industries, Additive Manufacturing & Aerostructures, Ankara, TÜRKİYE.
[4]KTU-TUSAS UAV Technologies & Thermal Management Systems Laboratory, Trabzon, TÜRKİYE.

Abstract

Additive manufacturing (AM) has emerged as a transformative production technology, enabling the fabrication of complex geometries and customized components, particularly in industries such as aerospace, defense, biomedical, automotive, and energy. The design flexibility offered by AM provides significant advantages, especially in producing intricate structures that are difficult to achieve using conventional manufacturing methods. Among AM-compatible materials, AlSi10Mg alloy stands out due to its high specific strength, excellent thermal and electrical conductivity, and low density. However, the layer-by-layer nature of selective laser melting (SLM) often results in poor surface quality and insufficient mechanical properties. Therefore, post-processing methods are essential to enhance the surface integrity of AM-produced parts. In this study, the cold spraying (CS) process was applied to improve the surface properties of AlSi10Mg samples manufactured by the SLM technique. The samples 100×50×5 mm3 in dimensions were fabricated using Aconity MIDI LPBF machine and characterized using optical microscopy and a non-contact profilometer. Subsequently, Ti6Al4V powders (15–53 µm in diameter) were deposited onto the samples using a cold spray system under the following process parameters: air temperature of 460 °C, air pressure of 7 bar, powder feed rate of 24.9 g/min, and nozzle distance of 5 mm. The spraying process was performed at three different traverse speeds (10, 20, and 30 mm/s) to examine the influence on surface roughness. In the continuation of the study, post-spray surface measurements were taken and compared with the measurements obtained in AM part production.

Keyword: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting (SLM), Cold Spraying, Surface Characterization, Post-processing.

COMPARISON OF MODULATION TECHNIQUES IN THREE-PHASE TWO-LEVEL BOOST RECTIFIERS FOR HIGH-POWER APPLICATIONS

MERVE MOLLAHASANOGLU*[1], HAKKI MOLLAHASANOGLU[2]

[1]Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Electrical and Electronic Engineering Department, Trabzon, TURKEY.
[2]Recep Tayyip University, Engineering and Architecture Faculty, Electrical and Electronic Engineering Department, Rize, TURKEY.

Abstract

In this study, the evaluation of a three-phase two-level boost AC/DC rectifier for high-power applications is conducted by investigating different modulation techniques. The rectifier performance is analyzed through a comparison between various modified carrier-based pulse width modulation (PWM) methods and the classical sinusoidal PWM technique. The two-level boost converter employing the conventional carrier-based PWM provides desirable performance for high-power applications, including low output voltage ripple, reduced total harmonic distortion (THD) of the input current, unity input power factor, and a well-regulated DC bus voltage. The classical PWM method has proven to be highly effective for two-level rectifiers rated within the range of 10 to 100 kW. Simulation results demonstrate that the conventional carrier-based phase-shifted PWM technique offers greater validity and flexibility for high-power applications of the three-phase two-level boost rectifier.

Keywords: Modulation technique, Carrier signal, Pulse width modulation (PWM), Multilevel rectifier

AN INVESTIGATION INTO THE IMPACT OF WIRE DRAWING PROCESS PARAMETERS ON ENGINEERING PERFORMANCE PROPERTIES

TUBA DEMIREL*[1] , LEVENT CENK KUMRUOGLU[2]

[1]Hasan Kalyoncu University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Gaziantep, Türkiye
[2]Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Iskenderun, Hatay, Türkiye,

Abstract

One of the most significant manufacturing processes in the metal forming sector is wire drawing, and the final product's surface quality, mechanical strength, and dimensional accuracy are all directly impacted by the process parameters being optimized. This study, thoroughly examines how important wire drawing parameters affect engineering performance characteristics. This scope of the experimental study includes a detailed evaluation of the effects of material selection, rolling, and lubrication characteristics on drawing force, surface roughness, elongation, and hardness values, as well as an examination of their synergistic effects. The influence of process parameters on engineering performance properties is analyzed using an inductive approach. The possible effects of drawing speed, die geometry, and cooling conditions on material behavior are evaluated, and the potential of different lubricants to reduce the friction coefficient and prevent wear is discussed. The results obtained reveal that proper parameter combinations not only improve product quality but also provide significant improvements in energy efficiency and production costs. These findings offer a valuable scientific contribution toward making wire drawing processes more efficient, reliable, and sustainable in industrial applications.

Keywords: Wire drawing, Wire rod, Steel wire, Rolling.

DWARF MONGOOSE OPTIMIZATION ALGORITHM FOR CHANNEL ESTIMATION

YÜKSEL TOKUR BOZKURT[1]

[1]Gaziantep Islam Science and Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, Gaziantep, TURKIYE.

Abstract

Channel estimation in OFDM systems faces a fundamental trade-off between performance and practical implementation. Although MMSE estimators achieve superior performance by incorporating second-order channel and noise statistics, their practical deployment is limited by the computational complexity of statistical estimation in dynamic wireless environments. This paper formulates channel estimation as a parameter optimization problem and proposes the Dwarf Mongoose Optimization Algorithm (DMOA) as a gradient-free solution for adaptive parameter search. Extensive simulations are conducted using MATLAB across TDLC-300, Rician-K10dB, and High-Speed-Train channel models with QPSK and 64-QAM modulation schemes. Statistical validation employs 95% confidence intervals over multiple independent runs. The proposed DMOA estimator demonstrates BER improvements of 6.1- 6.7% compared to LS estimation across all channel models, while achieving performance within 6-19.8% of optimal MMSE without requiring channel statistics. The key contribution lies in reformulating channel estimation as a parameter optimization problem, offering a practical solution for blind channel estimation in OFDM systems.

Keywords: Channel estimation, OFDM, Dwarf mongoose optimization algorithm, Metaheuristic optimization

PRELIMINARY ANALYSIS OF CRANE DYNAMICS FROM ROPE ANGLE AND LOAD DATA

Fatma Perihan CANDAN [1], SULEYMAN CANAN [1], ABDULKADİR SADAY *[2]

[1] Elfatek Elektronik Ltd Sti, Konya, Türkiye
[2] Selcuk University, Faculty of Technology, Konya, Türkiye

Abstract

Overhead cranes used in industrial facilities are critical for the safe and efficient handling of heavy loads. However, oscillations occurring during crane operations pose significant risks to both occupational safety and operational efficiency. This study presents a straightforward framework for preliminary analysis of crane dynamics by simultaneously evaluating rope angle and load data obtained through a CAN-bus communication link. Data were recorded at 5-second intervals. After removing missing and outlier values, descriptive statistics, correlation analysis, histograms, boxplot examinations, and time series analyses were performed. The findings revealed that rope angles X and Y exhibited low variance and a balanced distribution, while the load variable was right-skewed, with most values occurring at low levels but rarely reaching very high values. Correlation analysis revealed a moderately positive correlation between rope angles, while linear relationships between load and angles remained weak. Time series analyses and moving average methods demonstrated that sudden load increases caused angular deflections, making the system more sensitive, especially under high load conditions. The results indicate that the crane system generally operates stably; however, operational risks become more pronounced at higher loads. The study aims to identify dominant oscillation components in the frequency domain, create a repeatable yet straightforward data preparation and analysis pipeline, and provide indicators that will form the basis for future anti-sway profile optimization and predictive maintenance applications.

Keywords: anti-sway, crane dynamics, fundamental analysis, load analysis, time series.

THE TECHNO ECONOMICS OF LITHIUM ION CATHODE RECYCLING IN A CIRCULAR ECONOMY

ADIL FAROOQ*[1], OMER NECATI CORA[1]

[1] Karadeniz Technical University, Trabzon, TÜRKİYE.

Abstract

The high demand for lithium-ion batteries (LIBs), especially from electric vehicles, raises significant issues about the raw material, environmental degradation, and end-of-life management. Closed-loop cathode recycling provides a sustainable solution, reducing environmental impact and dependence on these resources. This study reviews different methodologies for recycling of discarded LIB cathode materials in a closed loop, such as pyrometallurgy, hydrometallurgy, and direct regeneration. Pyrometallurgical techniques that have been used in industry for a long time consume a lot of energy and often lose lithium to slag. However, recently proposed methods like reductive calcination are promising in terms of energy consumption. Hydrometallurgical processes can recycle a considerably higher amount of lithiumyet they use a lot of chemicals and water, which can hurt the environment. Direct recycling, which relithiates and thermally treats spent cathodes, has the lowest environmental impact and retains 80–90% capacity yet it requires perfect feedstock control. Life-cycle assessments of LIBs show that closed-loop recycling reduces greenhouse gas emissions by 50–80% and water usage by 72–88% over primary material extraction. Industrial examples like Redwood Materials and Li-Cycle demonstrate the scalability and economic feasibility of these recycling streams, with process costs ranging from $26 to $7,000 per tonne depending on technology. The study also looks at whether the long-term benefits of electric vehicles over conventional vehicles make up for the environmental costs of making LIBs. Evidence suggests that even after manufacturing and recycling, electric vehicles reduce life-cycle greenhouse gas emissions. Thus, integrating a closed-loop LIB recycling into the supply chains is crucial for making a shift to sustainable energy storage.

Keywords: Circular economy,Lithium-ion battery,Hydrometallurgy,Pyrometallurgy,Recycling.

INSPECTION OF WELD AREA JOINING MIILUX PROTECTION 600 ARMOR STEEL WITH METAL INERT GAS WELDING (MIG)

HASAN ÇETİN [*1], ENVER ATİK [2]

[1] BMC Automotive Industry and Trade Inc., İzmir, TÜRKİYE.
[2] Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering and Natural Science, Mechanical Engineering Department, Manisa, TÜRKİYE.

Abstract

This study investigates the effects of welding Miilux Protection 600 armor steel with ER 110 SG and ER 307Si filler wires, along with the subsequent application of stress relief annealing and quenching–tempering heat treatments, on the mechanical properties of the joints. The experimental data were comparatively analyzed to evaluate the influence of these parameters. In the experimental program, 10 mm thick Miilux Protection 600 armor steel plates were welded by the gas metal arc welding (MIG) process using ER 110 SG and ER 307Si filler wires. Following welding, some specimens were subjected to stress relief annealing, while others underwent quenching and tempering.The joints were evaluated by both non-destructive and destructive testing methods. Liquid penetrant and ultrasonic inspections were carried out for defect detection, while hardness measurements, tensile testing, Charpy V-notch impact tests, and microstructural examinations were conducted to determine mechanical performance.The results showed that the low carbon content of ER 110 SG and ER 307Si weld metals prevented significant hardness improvement after post-weld heat treatment. Without sufficient carbon, the martensitic transformation required for hardness enhancement could not be achieved. Consequently, stress relief annealing and quenching–tempering treatments applied to these low-carbon weld metals did not improve the mechanical properties in a meaningful way.

Keywords: Armor steel, welding wire, heat treatment, mechanical properties, Miilux Protection 600

1. Introduction

Armor steels are widely used in the defense industry for military armored vehicles, gun turrets, naval structures, and facilities requiring critical protection such as police stations and government buildings. Among these materials, Miilux Protection 600 armor steel is frequently preferred due to its high hardness, impact resistance, and superior ballistic protection performance [1].

The joining of armor steels is of critical importance, with welding being the most commonly employed method. However, the combination of high hardness and relatively low toughness introduces challenges during the welding process. The heat input generated during welding alters the microstructure of the heat-affected zone (HAZ), leading to crack formation, reduced ductility, and toughness losses [2, 3].

It is of critical importance to use appropriate welding wire in the welding process, to optimize welding parameters to obtain consistent and repeatable results, and to perform the post-welding heat treatment process with appropriate parameters and methods [4].

The welding process applied to 10 mm thick and 300x150x10 mm sized Miilux Protection 600 armor steel using ER 110 SG and ER 307Si welding wires and the effect of stress relief annealing and quenching process on mechanical properties (hardness, tensile strength, tensile strength, microstructure) were investigated.

In this study, the welding process applied to 10 mm thick and 300x150x10 mm Miilux Protection 600 armor steel using ER 110 SG and ER 307Si welding wires was investigated, as well as the effects of additional stress relief annealing and quenching treatments on the mechanical properties (hardness, tensile strength, tensile strength, and microstructure). For this purpose, various heat treatment processes, such as stress relief annealing and quenching, were applied to samples subjected to gas shielded MIG weld joints with different welding wire materials. Subsequently, penetrant and ultrasonic tests, microstructural examinations, Vickers hardness measurements, tensile and notch impact tests were conducted for weld control. The effects of appropriate welding wire selection, stress relief annealing, and quenching treatments were evaluated using the data obtained from the test results.

The primary alloying elements in armor steels, which are primarily classified as low-carbon steels, are Cr, Ni, Mo, and Mn. They generally contain less than 0.30% carbon. Low carbon content increases toughness and impact resistance. High hardness is a sought-after characteristic of armor steels. However, toughness must also be maintained to absorb incoming impact [5].

2. Materials And Methods

In the experimental study, 10 mm thick plates of ultra-high hardness (UHHA) Miilux Protection 600 armor steel and 1.2 mm diameter ER 307Si and ER 110 SG welding wires were used as filler materials during the welded joints.

The chemical composition of Miilux Protection 600 armor steel is is presented in Table 1, while its mechanical properties are listed in Table 2[1].

Table 1. Chemical compositions (%) of Miilux 600 armor steel

Armor Steel	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Miilux Protection 600	5-20	0.46	0.80	0.60	0.015	0.015	0.80	3.50	0.50	0.004

Table 2. Mechanical properties of Miilux Protection 600 armor steel

Armor Steel	Thickness (mm)	Yield Stress (Rp) MPa	Tensile Strength (Rm) MPa	Elongation (%)	Charpy-V Min. -40°C (Joule)	Hardness (HBW)
Miilux Protection 600	5-20	1500	2000	6	15	570-650

Heat treatment processes such as stress relief annealing (500-650 °C) to reduce internal stresses occurring after welding, pre-annealing to prevent crack formation, softening annealing (750–850 °C), which balances hardness and toughness while eliminating undesirable phase transformations, and annealing to homogenize the microstructure can be applied to armor steels [2, 6].

Miilux Protection 600 armor steel is a quenched and tempered armor steel. While it boasts high impact strength, hardness, and abrasion resistance, Miilux Protection 600 armor steel is considered to have limited weldability. A literature search revealed that product technical documentation published by Miilux indicates that this armor steel can be successfully welded using appropriate welding techniques and consumables. It is recommended that MIG/MAG and TIG welded joints with low heat input be used for this armor steel. For applications where ballistic protection is paramount, ER 110 SG welding wire is preferred due to its high strength compatibility. For applications where crack resistance is more critical than ballistic protection, ER 307Si welding wire is preferred due to its austenitic structure. In temporary or low-load working conditions, it is recommended to use ER 307Si welding wire for repair purposes.

In this study, Miilux Protection 600 armor steel was subjected to gas shielded MIG welding process using ER307Si and ER110 SG filler materials.

The chemical composition of the welding wires used as filler material is given in Table 3, and their mechanical properties are given in Table 4 [7, 8].

Table 3. Chemical compositions of ER 307Si and ER 110 SG welding wires with a diameter of 1.2 mm

Chemical compositions (%)							
ER 307Si	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**P+S**	**Mo**
	0.08	0.80	7.00	19	8.50	0.35	0.50
ER 110 SG	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**P+S**	**Mo**
	0.12	0.45	1.70	26	2.0	0.35	0.50

Table 4. Mechanical properties of ER 307Si and ER 110 SG welding wires with a diameter of 1.2 mm

Mechanical Properties				
Welding Wires	**Yield Stress (N/mm²)**	**Tensile Stress (N/mm²)**	**Notch Impact Resistans (ISO-V/-30°C)**	**Elongation (L_o=5do) (%)**
ER 307 Si	min. 370	580 - 750	min. 63 J	min. 30
ER 110 SG	min. 690	min. 760	min. 47 J	19

Test samples were taken from Miilux 600 sheet metal with dimensions of 300x150x10 mm and the weld groove was machined in accordance with TS EN ISO 9692-1 standard as shown in Figure 1.

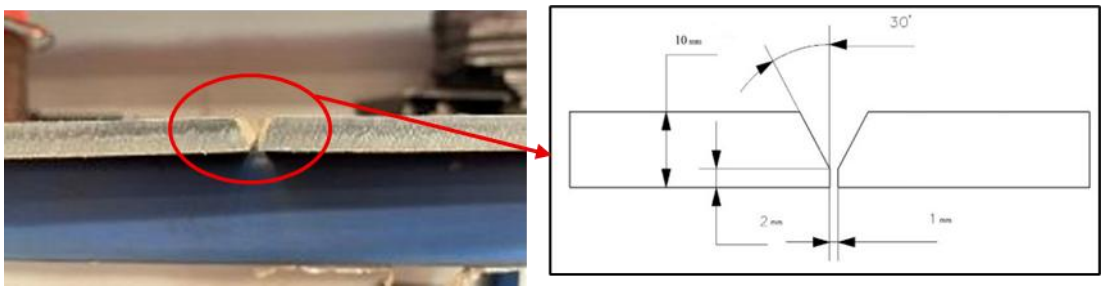


Figure 1. Weld groove

In this experimental study, metal inert gas welding (MIG) process is applied to samples obtained from Miilux 600 armor steel and the Fronius TPS 500i brand welding machine used.

The test samples were preheated to a temperature of 200°C using a propane torch from the source. After the samples reach a preheating temperature of 200°C, the welding process of the samples is completed with the 1st, 2nd, 3rd and 4th passes, respectively, as shown in Figure 2.

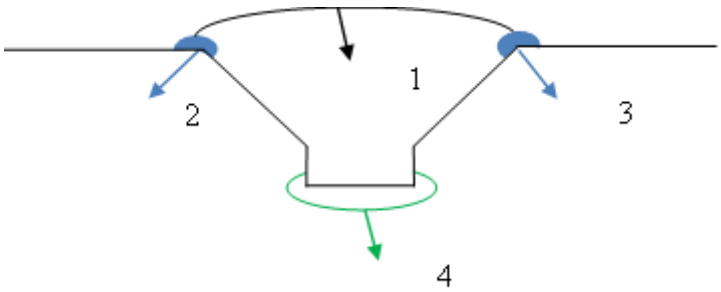


Figure 2. Welding pass representation in the welding groove schematic drawing

The welding parameters defined on the Fronius TPS 500i welding machine for welding with ER 110 SG and ER 307Si wires are summarized in Table 5, while representative welded samples are presented in Figures 3 and 4.

Table 5. ER 110 SG and ER 307Si welding parameters

Job Number Defined in the Welding Machine	Properties	Value
1- ER 307Si	Welding current	251 A
	Voltage	24.4 V
	Welding velocity	8.8 m/min
2- ER 307Si	Welding current	196 A
	Voltage	21.8 V
	Welding velocity	6.7 m/min
4- ER 110 SG	Welding current	209 A
	Voltage	24.1 V
	Welding velocity	7.2 m/min
5- ER 110 SG	Welding current	165 A
	Voltage	21.7 V
	Welding velocity	5.2 m/min

Figure 3. Example of a welded sample - ER 110 SG

Figure 4. Example of a welded sample - ER 307Si

Sample codes and heat treatment conditions for samples prepared after welding are given in Table 6.

Table 6. Sample code and heat treatment condition after welding

Sample Code	Heat Treatment Condition
ER 110 SG-01	No Heat Treatment Applied
ER 110 SG-02	Stress Relief Annealing
ER 110 SG-03	Conditioning Heat Treatment
ER 307Si-01	No Heat Treatment Applied
ER 307Si-02	Stress Relief Annealing
ER 307Si-03	Conditioning Heat Treatment

Process data for the applied stress relief and conditioning process are given in Table 7.

Table 7. Process data for stress relief and conditioning applied after the welded joint

Heat Treatment		Temperature (°C)	Time (minute)
Stress Relief Annealing		520	180
Islah İşlemi	Quenching at oil	830	190
	Tempering 1	320	180
	Tempering 2	430	180
	Tempering 3	460	180

3. Results And Discussion

Miilux 600 armor steel was welded using two different welding wires, and the resulting specimens were subjected to the corresponding heat treatments. The hardness graph of samples prepared with ER 110 SG and ER 307Si welding wires is shown in Figure 5. The tensile strengths of the welded samples under as-welded and heat-treated conditions are shown in Figure 6. Average fracture energy of the welded samples are shown in Figure 7.

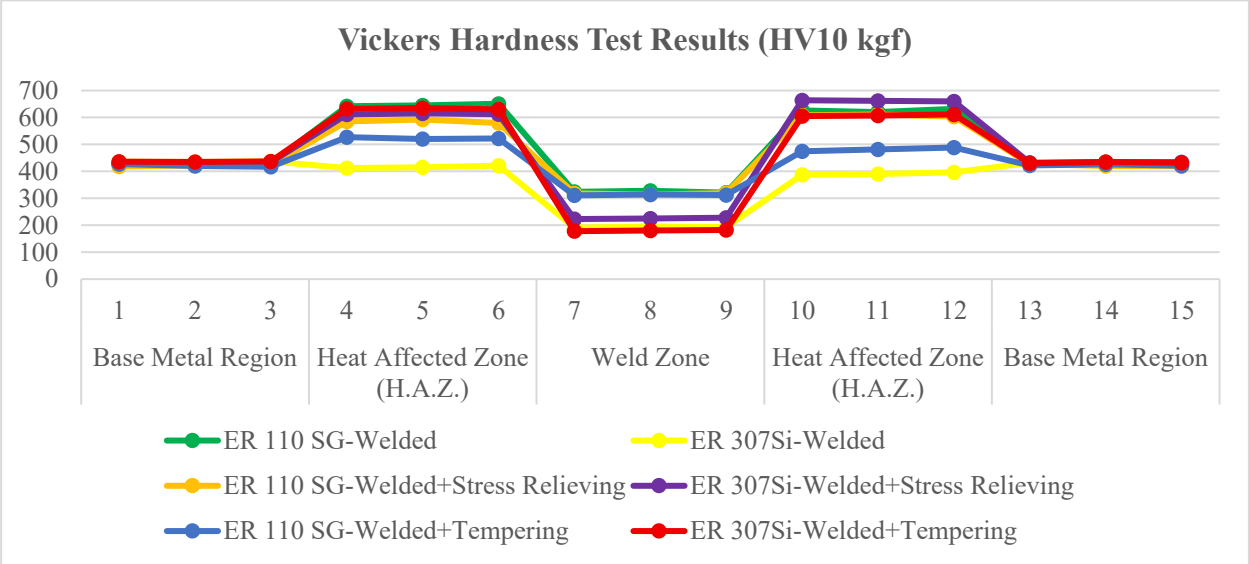


Figure 5. The hardness graph of samples prepared with ER 110 SG and ER 307Si welding wires

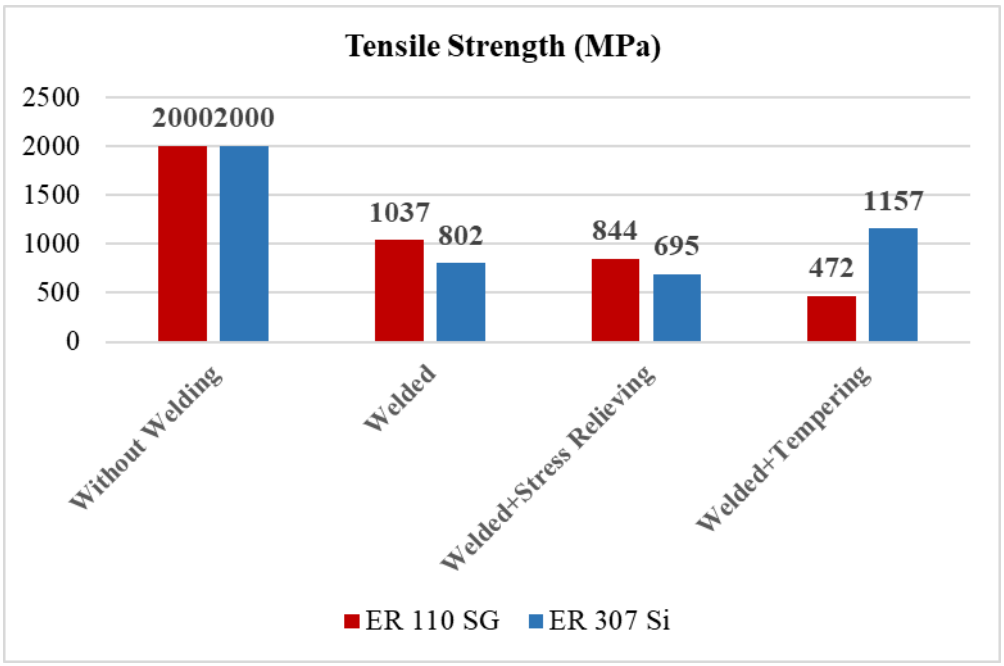


Figure 6. Effect of welding process on tensile strength

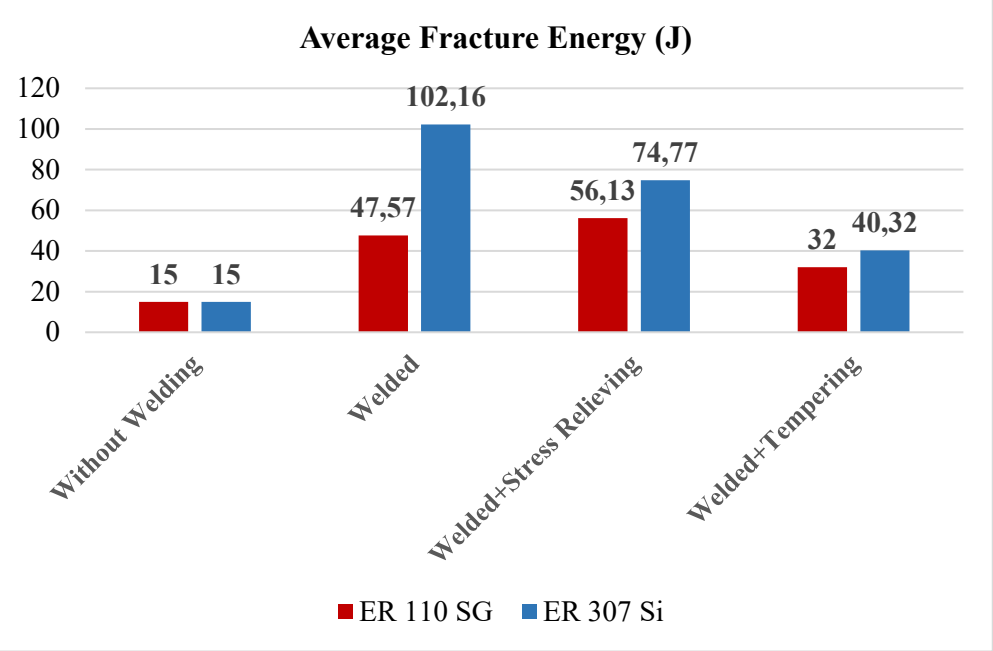


Figure 7. Average fracture energy of the welded samples.

4. Conclusions

It was observed that the tensile strength of samples welded with ER 110 SG welding wire was higher than that of samples welded with ER 307Si, except for the quenched condition. However, the elongation was lower. It was observed that the tensile strength value increased in the sample welded with ER 307Si welding wire and subjected to the quenching treatment. This is thought to be due to the austenite-forming effect of Mn in the ER 307Si composition, which improves ductility.

After stress relief annealing, the tensile strength decreased while elongation increased in both ER 110 SG and ER 307Si welded samples. In ER 110 SG welded samples, quenching–tempering caused a significant decrease in tensile strength, and all specimens fractured in a brittle manner within the weld zone.

ER 307Si welding wire has an austenitic structure due to the high Mn (6-8%), Cr (18-20%), Si (0.65-1%), and Ni (8-10%) elements in its chemical composition. The notch impact test confirmed that samples welded with ER 307Si welding wire had higher impact toughness due to the austenitic structure.

It has been observed that applying stress relief annealing to samples welded with ER 110 SG welding wire has a positive effect on fracture toughness (impact toughness), whereas the quenching process has a negative effect.

In all tensile tests, brittle fracture occurred in the weld zone of the specimens. ER 307Si filler wire is therefore more suitable for applications requiring high toughness and lower hardness, while ER 110 SG is preferred where higher tensile strength and a harder weld bead are needed.
ER 110 SG welding wire, due to its low alloy content and high hardness, is preferred in working conditions requiring high tensile strength and a hard weld bead.

Acknowledgments: We would like to thank BMC Automotive Industry and Trade Inc. and Bodycote, along with their valuable employees, for their contributions to this study. We would also like to thank Metallurgical Engineer Bilgi ÇENGELLI, who provided unwavering knowledge, experience, and technical support during the experimental work conducted within the scope of this study.

References:

[1] Miilux Oy. (2020). Miilux Protection 600 technical datasheet.
[2] Kou, S. (2003). Welding metallurgy (2nd ed.). Wiley-Interscience.
[3] Özdemir, N. (2015). Yüksek sertlikte çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölge özelliklerinin incelenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (MATEDER), 12(1), 45-52.
[4] Baldi, M., et al. (2012). Effect of heat input on HAZ microstructure of armor steel welds. Journal of Materials Engineering and Performance, 21(5), 831-838. https://doi.org/10.1007/s11665-011-9960-x.
[5] Malzeme Bilimi. (t.y.). Zırh çeliği nedir? Nasıl üretilir? https://malzemebilimi.net/zirh-celigi-nedir-nasil-uretilir.html
[6] Totten, G. E., Howes, M. A. H., & Inoue, T. (2002). Handbook of residual stress and deformation of steel. ASM International.
[7] Askaynak. (t.y.). Resmi web sitesi. http://www.askaynak.com.tr
[8] Gedik Kaynak (t.y.). Resmi web sitesi. http://www.gedik.com.tr

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF YARN A VALUE ON ENDHEM SHRINKAGE RATIO

MUSTAFA SAHIN KOSAK*[1], NAVRUZ UDURGUCU[1], ECE SILA UNAL[1]

[1] Sanko Textile., Gaziantep, TÜRKİYE.

Abstract

A towel is a type of warp-structured fabric produced using warp yarns with defined loops, creating a pile on the surface. Fabrics with a pile/loop structure can be produced using weaving, knitting, and tufting techniques. The most common terry fabric production method is weaving, which has a weft system and two warp series: the ground and the pile. The pile and ground yarns are wound separately on beams with different tensions. The ground warp, along with the weft, forms the ground, while the pile yarns are woven through the ground structure to create the loops. The loop structure can be on one or two sides. Textiles where the term towel is used as a product name include different zones compared to plain-woven terry fabrics. The terms pile zone, edge fabrics, head and end fabrics (fringes in some special designs), and border are used to describe the main zones of a towel. While not all of these zones are present in a towel, the pile zone is the most basic structure and is present in all towels. The pile area is the area with one or both surfaces looped for high water absorbency. Head or end fabrics are the parts woven without loops to prevent the pile from spreading during weaving. Fringe, head, and end fabrics are created by leaving only the ground and pile yarns long, without creating an edge texture, and are either knotted or left unknotted using various knotting methods. The edge fabric is the area woven into the fabric structure to reinforce the two edges along the length of the towel. The border is the part near one or both ends of the towel, patterned with different weaves. In addition to the pattern, yarns of different colors and thicknesses, such as polyester, chenille, indanthrene dyed, mercerized, etc., can be used to create a border structure. Head and End Fabric (Endhem): Towels are fabric structures woven or knitted on a loopless ground to prevent the pile from spreading before and after the loop fabric begins. Due to the nature of terry fabrics, achieving shrink-resistance is more difficult than other categories. Tensile performance plays a significant role in the quality parameters of towel textile products. Due to the different sections of a towel and the different construction features used in these sections, quality parameters for each section are subject to separate analysis. Tensile performance is also a critical quality parameter for the head and end weave structure, which is one of these sections. In this study, the need to examine the effect of the α value of the yarns used in the head and end weave on the endhem shrinkage ratio was the defining theme of the project. The study involved testing five different pile yarns. The resulting samples were washed in an Arçelik washing machine at 40°C for cycles 1, 2, 3, 4, and 5. Following the washing process, they were dried in a Beneks tumbler dryer. Tensile performance was then evaluated.

Keywords: Towel Endhem, Dimensional Change, Towel, Yarn α value.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PRETREATMENTS ON THE PRINTING PROCESS IN TOWEL FABRIC

MUSTAFA SAHIN KOSAK [*1], NAVRUZ UDURGUCU[1], BETUL KARABORAN[1], ERSIN KEKLIKCIOGLU[1], HARUN ARSLAN[1]

[1] Sanko Textile. Gaziantep, TÜRKİYE.

Abstract

Digital printing systems allow printing to be done quickly and with high quality on all types of materials in a computer-aided environment. Initially preferred for fast printing of small quantities and small runs, digital printing systems have become increasingly competitive with traditional printing techniques. Initially producing extremely slow, low-resolution prints, digital technologies have rapidly developed, now distinguishing themselves with both their print quality and speed, as well as their creative and innovative potential. In inkjet printing systems, the artwork sent from the computer is converted into print codes using a RIP (Recommended Printing System). Printing systems that operate in this manner are generally referred to as "digital printing systems." Unlike conventional printing techniques, digital printing systems do not require a plate preparation step. The computer-generated artwork is printed directly [1]. Studies on patterning high-pile structures, such as towels, are limited. Printing on high-pile textile structures is challenging. Surface heterogeneity, deeper penetration, and higher dyestuff requirements make printing on pile fabrics more challenging than on plain fabrics. Screen printing, which requires the application of each color separately, is widely used in the towel printing industry. Small batches, short runs, and quick-response orders are often requested, often involving complex, multi-color prints that are expensive and/or technically unattainable with traditional screen printing techniques. An industrial requirement is that inkjet printing systems do not require any pre- or post-processing beyond the thermal curing step required for the current towel screen printing process. This study aims to thoroughly investigate the towel printing process and determine the most suitable printing process. In this context, it aims to find solutions to problems encountered in printing on terry cloth and to identify the parameters that affect print quality during the printing process.biocompatibility, improving patient comfort, and maximizing clinical performance.

Keywords: Towel, Digital printing, Quality parameters.

PASLANMAZ ÇELİK SACDAN MAMUL BİR PARÇANIN DERİN ÇEKME PROSESİNİN ARI ALGORİTMASI KULLANILARAK OPTİMİZASYONU

MUSTAFA AY [1], EMRE GÜL[2], METE KALYONCU[3]

[1,2] Vaden Otomotiv Sanayi ve Ticaret AŞ., Konya, TÜRKİYE
[3] Makine Mühendisliği Bölümü, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

Özet

Bu çalışmada paslanmaz çelik sacdan mamul bir parçanın derin çekme prosesi Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Derin çekme işlemine etki eden kalıp tasarım parametrelerinden dişi kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı, kalıp boşluğu, kalıp derinliği, zımba çapı, pod çapı parametrelerinin farklı seviyelerde katı modelleri oluşturulup, bir mühendislik yazılımı ile analiz edilmiştir. Malzeme olarak AISI 304 seçilmiştir. Bilgisayar ortamında, daha kalıp üretimine başlamadan, bu analizler yapılıp istenilen ölçülere en yakın kalıp modellemesini bulabilmek için çıkan sonuçlar Arı Algoritması ile bütünleştirilerek optimum parametreler bulunmuştur. Bulunan optimum değerlere göre varyans analizi uygulanarak doğruluk oranı bulunmuştur. Yapılan analizlerde dişi ve zımba yarıçapları büyüdüğünde derin çekme işlemi hata oranı azalmıştır. Kalıp boşluğu ve pod çapı iş parçasına göre verilmezse parçanın derin çekme işleminde yırtılma, çizilme, kulaklanma gibi problemler olabilir. Kalıp derinliği ve zımba çapı birbiri ile bağlantılıdır. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

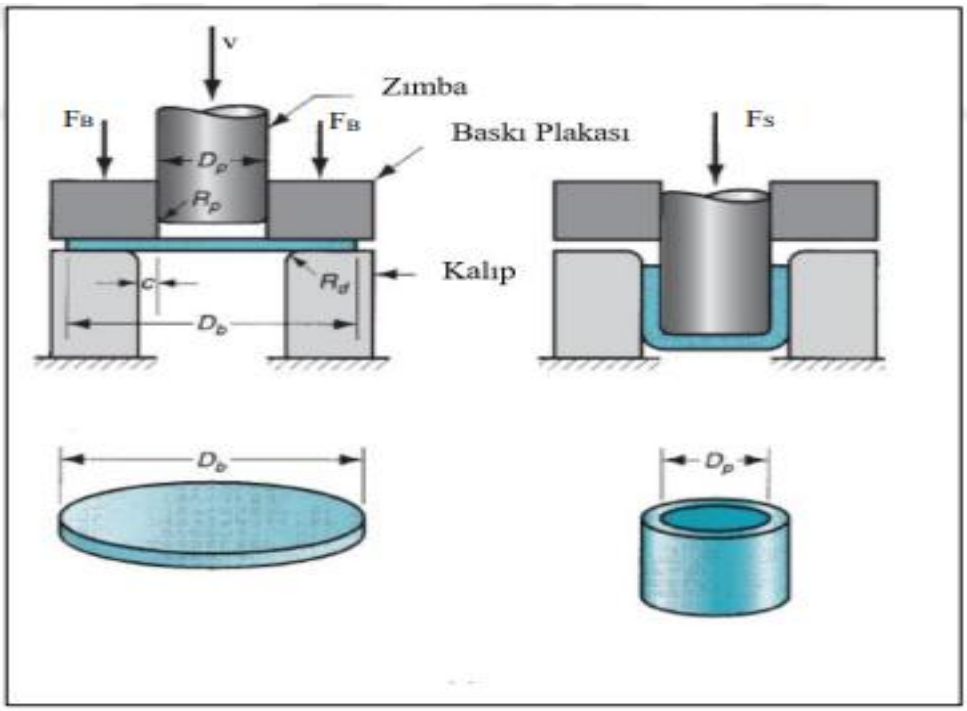
Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, Arı Algoritması, Derin Çekme, Paslanmaz Çelik, Proses Parametreleri

1. Giriş

Plastik şekillendirme ile şekillendirilmiş saclar otomotiv, havacılık, makine sektörlerinde tercih edilmektedir. Belirli malzemeler farklı parametreler etkisi altında istenilen şekle plastik şekillendirme ile getirilmektedir. Sac şekillendirme için üretilen kalıplar yüksek maliyetlerle üretilmekte ve gözden kaçan kalıp üretim hataları saca istenilen şeklin verilmemesini sağlamaktadır. Kalıbın hurdaya ayrılması ya da şekillendirilmiş sacın çalışma ortamına uygunsuz olması, deneme yanılmaya bağlı üretimler maliyetleri artırmaktadır.

Sac metal şekillendirme süreçlerinde oluşabilecek hataların, tasarım aşamasında belirlenip giderilmesi kritik öneme sahiptir. Derin çekme işlemlerinde, proses parametrelerinin doğru seçimi üretim kalitesini doğrudan etkiler. Bu çalışmada, zımba yarıçapı, kalıp yarıçapı, kalıp derinliği, zımba çapı, pod çapı ve kalıp boşluğu gibi parametreler Arı algoritması yöntemiyle optimize edilerek derin çekme prosesi için en uygun koşullar belirlenmiştir.

DIN 8584 standardına göre derin çekme, düz bir sac levhanın çekme-basma kuvveti etkisiyle bir tarafı açık, içi boş bir gövdeye dönüştürülmesi ya da önceden şekillendirilmiş bir kabın, herhangi bir dış müdahale olmadan daha dar kesitli bir forma yeniden şekillendirilmesi işlemidir.



Şekil 1. Derin çekme prosesi (Erbaş 2014)

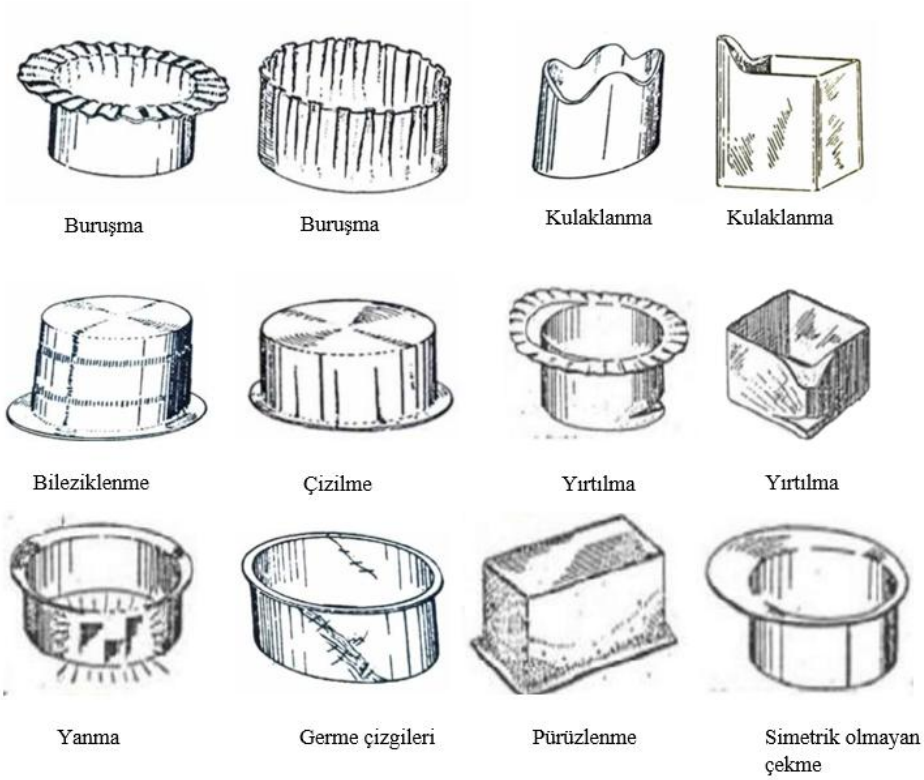
2. Derin Çekmeyi Etkileyen Unsurlar

Derin çekme operasyonu için simülasyon modellerinin oluşturulması, kalıp imalatından önce kalıbın çalışma parametrelerinin tahmin edilmesinde ön bilgi sağlamaktadır. Düzlemsel şekilde bulunan levha, derin çekme operasyonu sayesinde üç boyutlu şekil almaktadır. Derin çekme operasyonunun verimliliği etkileyen önemli unsurlar bulunmaktadır.

Bu unsurlar malzeme etkisi, kalıp şekil etkisi, işlem koşullarının etkisi olarak üç başlıkta değerlendirilebilir. Malzeme etkisi; malzeme kalınlığı, anizotropi, sertleşme üssü ve deformasyon hız duyarlılığı üssü maddelerini kapsamaktadır. Kalıp şekil etkisi; zımba çapı, zımba köşe yarıçapı, sac kalınlığı, sac metal çapı, kalıp çapı, kalıp köşe yarıçapı, derin çekme boşluğu, tutucu ve sac parça boşluğu, eğme açısı, kalıp derinliği, kalıp yüze pürüzlülüğü maddelerini kapsamaktadır.

3. Derin Çekme Prosesinde Yaşanan Problemler

Sac parçaların şekillendirilmesi esnasında çatlama, buruşma, yırtılma, kulaklama, çizilme, çentiklenme, yanma gibi problemler yaşanmaktadır. Simülasyon yazılımlarında kalıp tasarımının değerlendirilmesi deneme yanılma gibi çalışmaların önüne geçilerek problem yaşanmamasını sağlamaktadır. Derin çekme prosesinde karşılaşılabilecek hatalar Şekil 2'de verilmiştir.

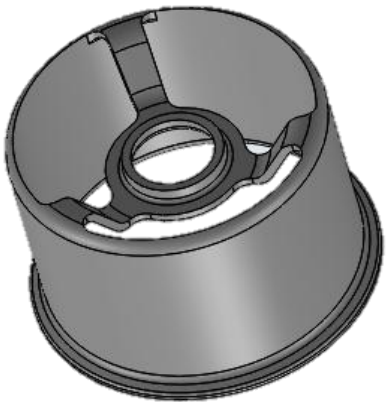


Şekil 2. Derin çekme işleminde karşılaşılan problemler. Arslan, 2021

Soğuk şekillendirme yöntemleri ile ilgili literatürdeki bilgiler;
Arslan V. (2021) çalışmasında derin çekme prosesinde parametre seçiminin etkilerinden bahsetmiştir. Deneme yanılma gibi klasik yöntem yerine sonlu elemanlar yöntemi ile proses parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir.
Kap E. (2022) çalışmasında derin çekme prosesinin AA6061 malzeme üzerinde etki eden parametrelerini sonlu elemanlar ve Taguchi metodları ile incelemiştir Çalışmasında simülasyonlar için bir yazılım kullanılmıştır. En çok etki eden parametre %34,43 ile baskı kuvveti olmuş, zımba yarıçapının %31,21, kalıp çapının %27,67 etki ettiği görülmüştür.
Özkan U. (2022) çalışmasında derin çekme işleminde kare geometriye sahip bileşenlerin yüzeylerinde yırtılma ve cidarlarda incelme oluşabildiğini gözlemlemişlerdir.
Güneşgörmez G. (2020) çalışmasında geçmişte sac metal şekillendirme işleminde deneme yanılma ile kalıpların üretildiğinden bahsedilmiş, bu durumun kalıplarda çok fazla revizyon yapılmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Günümüzde simülasyon yazılımları ile zaman ve maliyet kazancı sağlandığı belirtilmiştir.
Bu çalışmanın özgün değeri AISI 304 malzemenin derin çekme işlemi parametrelerinin Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmesidir. Dişi kalıp Yarıçapı (mm), Zımba Yarıçapı (mm), Kalıp boşluğu (mm), Kalıp derinliği (mm), Zımba çapı (mm), Pod çapı (mm) parametreleri kullanılmıştır. Bor, yarı sentetik ve bitkisel yağın dikkate alındığı çalışmada, kesme sıvılarının Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmesi literatür için tektir. Çıkış parametresi olarak yüzey pürüzlülüğü ve sertlik incelenmiştir.

4. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ağır vasıtalarda soğutma sistemi bileşenlerinden termostat ürünü bileşenlerinden sac piston tasarım analiz ve üretim çalışması yapılacaktır. Şekil 3 'de deney numunesinin görseli verilmiştir.

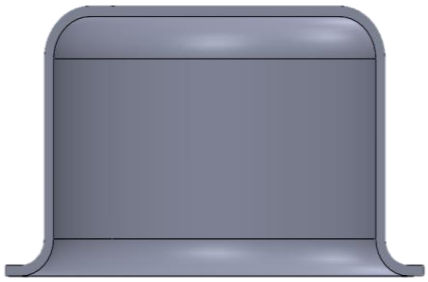


Şekil 3. Deney numunesi

Sac kalınlığı 2 mm, malzemesi AISI 304 olarak seçilmiştir. Pod çapında lazer kesim yapılmıştır. Şekil 4.d.'deki forma ulaşabilmek için adım adım operasyonlar gerçekleştirilecektir.

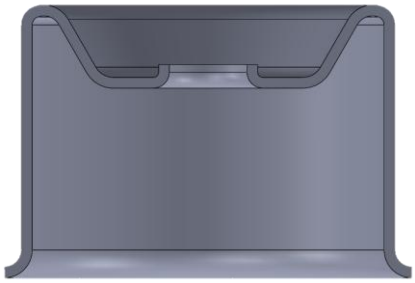
Operasyon adımları;

a) 1. derin çekme operasyonu
b) 2. derin çekme operasyonu
c) Küçük delik delme ve iç çap derin çekme
d) Tüm delik delme

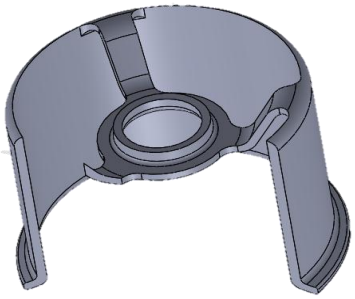


a) 1.Derin çekme operasyonu

b) 2.Derin çekme operasyonu



c) Küçük delik delme ve iç çap derin çekme



d) Tüm delik delme işlemi

Şekil 4. Deney numunesi **a)** 1.Derin çekme operasyonu **b)** 2.Derin çekme operasyonu **c)** Küçük delik delme ve iç çap derin çekme **d)**Tüm delik delme işlemi

Derin çekmede en çok karşılaşılan yırtılma, kulaklanma, çizilme, marullanma gibi hatalar mevcuttur. Bu hatalara etkisi olan parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler; dişi kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı, kalıp boşluğu, kalıp derinliği, zımba çapı, pod çapıdır. Her parametre için 3 seviye belirlenmiştir.

4.1. Analiz

Günümüzde sac şekillendirme süreçlerinde oluşabilecek hataların öngörülmesi, zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda kullanılan yazılımlar; özellikle kalıp tasarımı, malzeme akışı analizi, deformasyon tahmini ve kalite kontrol alanlarında sunduğu çözümlerle sürece kritik katkılar sunmaktadır.

Programın başlıca özellikleri şunlardır;

Kalıp Tasarımı ve Analizi: Metal levha şekillendirme kalıplarının tasarım ve optimizasyonuna yönelik gelişmiş araçlar sunmakta, deformasyon analizleri ve malzeme akış simülasyonları ile kalıp performansının önceden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Malzeme Akışı Analizi: Şekillendirme sürecinde malzemenin akış davranışı, deformasyon mekanizmaları ve son ürün kalitesini belirleyen faktörler ayrıntılı biçimde analiz edilmektedir.

Deformasyon Tahmini: İleri seviye simülasyon teknikleri kullanılarak levha şekillendirme sürecinde meydana gelecek deformasyonlar tahmin edilmekte, böylece ürünün nihai geometrisi ve kalitesi öngörülebilmektedir.

Kalite Kontrol: Kalıp tasarımı ve üretim aşamalarında potansiyel sorunların önceden tespit edilmesiyle atık oranı azaltılmakta ve üretim süreçleri optimize edilmektedir.

Kısaca yazılım, metal şekillendirme süreçlerinin karmaşıklığını azaltarak ürün kalitesinin iyileştirilmesine ve üretim maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Seviyelerin belirlenmesinde literatür ve hesaplamalar göz önünde bulundurulmuştur. Parametreler ve seviyeler Tablo 1.'de mevcuttur.

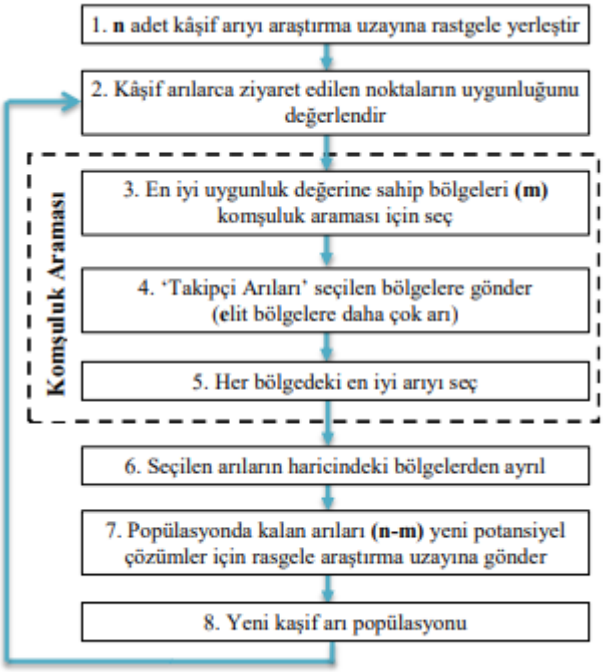
Tablo 1. Belirlenen parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Dişi kalıp Yarıçapı (mm)	2	10	15
Zımba Yarıçapı (mm)	6	16	20
Kalıp boşluğu (mm)	0,7	1	2,7
Kalıp derinliği (mm)	50	60	70
Zımba çapı (mm)	65	67	70
Pod çapı (mm)	140	145	147

4.2. Arı Algoritması

Arı algoritması, bal arılarının kaynak arama davranışlarını taklit eden popülasyon tabanlı, sezgisel bir algoritma olup, ilk olarak 2006 yılında D.T. Pham ve arkadaşları tarafından önerilmiştir.

Arı algoritması birçok parametre içermekte olup, bu parametreler kâşif arı sayısı (n), ziyaret edilen n nokta içinden seçilen en uygun bölge sayısı (m), seçilen m bölge içindeki elit bölge sayısı (e), en iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı (nep), kalan (m-e) bölgeye gönderilen arı sayısı (nsp), bölge boyutu (ngh) ve durdurma kriteri/iterasyon sayısı (itr)'dir. Arı algoritmasının çalışma prensibi Şekil 5'de verilmiştir (Erdemir ve ark., 2022).



Şekil 5. Arı Algoritması akış şeması (Erdemir ve ark., 2022)

Parametrelerin farklı seviyeleri için Arı Algoritması optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve optimum Arı Algoritması parametre değerleri Tablo 2.'de verilmiştir. Bu parametrelere karşılık optimizasyon sonucu bulunan boyutsal değerler Tablo 3.'de paylaşılmıştır.

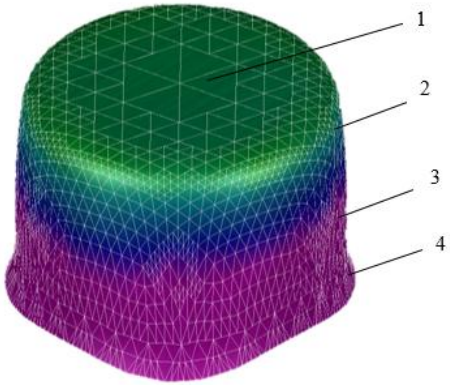
Tablo 2. Arı Algoritması parametreleri

n	m	e	nep	nsp	ngh	itr
30	20	4	9	5	0.02	450

Tablo 3. Optimizasyon sonucu bulunan boyutlar

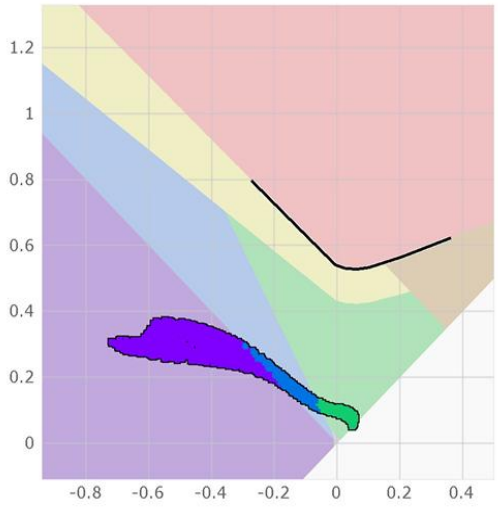
Parametreler	**Değerler**
Dişi Kalıp Yarıçapı	15 mm
Zımba Yarıçapı	6 mm
Kalıp Boşluğu	2.7 mm
Kalıp Derinliği	60 mm
Zımba Çapı	70 mm
Pod Çapı	145 mm

Bulunan değerler ile kalıp tasarım parametreleri, kalıp modellemesine yansıtılarak bir yazılım programında analiz edilmiştir. Analize ait şekillendirme sınır diyagramı ve cidar incelme görseli aşağıdaki Şekil 6. a ve b'de verilmiştir.



Bölge	1	2	3	4
Kalınlık (mm)	1.81	1.95	2.1	2.4

Şekil 6. a) Bulunan değerlere göre yapılan analiz



	Kalınlık	Ezilme	Yetersiz esneme	Güvenli	Risk	Aşırı incelme	Yırtılma
Bölge	51.75%	15.76%	0.00%	32.49%	0.00%	0.00%	0.00%
Limit	0.01		<0.02		20.00%	>0.50	0.00%

Şekil 6. b) Bulunan değerlere göre yapılan analizin şekillendirme sınır diyagramı

Yapılan analiz sonucunda parçada yırtılma, kulaklanma, çizilme, marullanma gibi hatalar görülmemektedir. Bulunan değerlere göre maksimum kuvvet dişi kalıpta oluşmuştur.

6. Sonuçlar

Sac şekillendirme yöntemlerinden biri olan derin çekme işleminde, ürün kalitesinin artırılması için sürecin kontrol edilebilir ve öngörülebilir olması önemlidir. Literatürde derin çekme üzerine pek çok geliştirme yapılmış olmakla birlikte, alan hâlâ iyileştirilmeye açıktır. Bu çalışmada, derin çekme prosesine etki eden kalıp parametrelerinden dişi kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı, kalıp boşluğu, kalıp derinliği, zımba çapı ve pod çapının, farklı seviyelerdeki etkilerini derin çekilebilirlik ve iş parçası cidar kalınlığı üzerindeki etkileri Arı Algoritması ile optimize edilmiştir. Tecrübeye dayalı tasarımlarda deneme yanılma süreci zaman alabilmektedir. Zaman ve maliyet açısından değerlendirildiğinde optimizasyon yöntemleri kullanılması ve simülasyon yazılımlarında değerlendirme yapılması daha sorunsuz kalıp tasarım ve üretiminin yapılmasını sağlamaktadır. Analizler için bir yazılımı kullanılmıştır. Veriler Arı algoritması ile optimize edilmiş ve sonuç olarak optimum değerler Tablo 3 'de verilmiştir.

7. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde verdikleri destekten dolayı Vaden Otomotiv Sanayi ve Ticaret AŞ. firması ve Ar-Ge Merkezi çalışma arkadaşlarımıza teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Erbaş, O. (2014). Experimental and Numerical Analysis of Deep Drawability of Aluminium alloys AA5754-H22 and AA6061-T6, Fakultät Maschinenbau, Master of Science in Manufacturing Technology, Master Thesis
2. Arslan, V. (2021). Paslanmaz çelik sacların derin çekilebilirlik kabiliyetlerinin sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi (Master's thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
3. Kap, E. (2022). Alüminyum Sac Parçaların Derin Çekme Proses Optimizasyonu (Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi (Türkiye)).
4. Özkan, U. (2022) Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Kare Kap Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve İşlem Parametrelerinin Şekillendirilebilirliğine Etkisinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
5. Güneşgörmez, G. (2020) Sac metal ölçü tasarımına etki edenlerin incelenmesi ve simülasyonu (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
6. Erdemir, A., Alver, V., & Kalyoncu, M. (2022). Ari Algoritmasi Kullanilarak Önden Dümenlemeli Bir Aracin Dümenleme Mekanizmasinin Optimizasyonu.

PREDICTIVE MAINTENANCE OF LINEAR GUIDEWAYS IN PVC WELDING MACHINES USING FAILURE MODE DETECTION

MUHAMMET TAHA AKKOC[*1], HASAN AYTUG KURT[2], MUSTAFA BAKKAL[3], UMUT KARAGUZEL[1], HAYDAR LIVATYALI [1]

[1] Yildiz Technical University, İstanbul, TÜRKİYE.
[2] Yilmaz Machine, İstanbul, TÜRKİYE.
[3]İstanbul Technical University, İstanbul, TÜRKİYE.

Abstract

Linear guideways are critical motion components in PVC welding machines, directly influencing the precision and reliability of the welding process. Failures in these components, particularly in the rolling elements of linear bearings, can lead to unexpected downtime, product defects, and costly repairs. This study presents a predictive maintenance approach aimed at early detection of failure modes such as spalling, pitting, and lubrication degradation in linear guideways. A data-driven framework is proposed, combining vibration analysis, thermal monitoring, and operational load data to assess component health. Machine learning models are trained to classify patterns associated with incipient bearing failures, enabling timely interventions. Experimental validation is conducted on a lab-scale PVC welding unit with instrumented linear bearings under controlled degradation scenarios. The results demonstrate the feasibility of predicting bearing faults with high accuracy, offering a pathway to improved machine uptime and maintenance planning. The proposed approach supports the broader transition towards smart manufacturing and condition-based maintenance in industrial machinery.

Keywords: Predictive Maintenance, Linear Guideways, PVC Welding Machine, Bearing Failure, Condition Monitoring, Smart Manufacturing.

THE BLUETOOTH-BASED SMART DOORBELL SYSTEM FOR HEARING-IMPAIRED USERS

MUHAMMED EMİN KUTLUCA*[1], MUSTAFA ERGİN ŞAHİN[1]

[1]Recep Tayyip Erdogan University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Rize, Türkiye.

Abstract

This study introduces a smart doorbell system that enhances the safety and independence of hearing-impaired individuals. The system delivers customizable vibration and light-based notifications through a mobile application, ensuring that users are promptly informed of visitors at their door. In addition to real-time alerts, notifications are stored in the app for later review, and a backup power supply ensures uninterrupted operation during electricity outages.

The system was validated through both simulation and real-world testing, confirming stable performance, quick response times, and reliable wireless communication. Designed to be affordable and energy-efficient, the proposed solution not only improves daily convenience for hearing-impaired individuals but also offers potential for wider use in assistive technology applications.

Keywords: Smart Doorbell, Bluetooth Low Energy, Vibration Alert, Visual Notification, Hearing Impairment, Assistive Technology

1. Introduction

Doorbell systems are crucial for daily interaction, yet they present accessibility barriers for individuals with hearing impairment. Conventional auditory alerts cannot provide adequate awareness for people who cannot perceive sound, creating safety and communication challenges in daily life. According to the Turkish Ministry of Family and Social Services, more than 179,000 registered hearing-impaired individuals were reported in 2023 [1]. This highlights the societal need for alternative notification technologies that go beyond traditional acoustic signaling.

In recent years, assistive technology research has increasingly focused on multimodal interaction combining tactile and visual feedback. Brewster and Brown [2] demonstrated that haptic feedback significantly enhances user interaction, especially for individuals with sensory limitations. Gonzalez and Gonzalez [3] emphasized that vibration-based alerts can improve awareness in daily activities, while Crispin [4] reviewed the role of haptic technologies in mobile environments. Jiang et al. [5] extended this perspective by analyzing haptic feedback in IoT applications, showing how tactile systems can complement visual alerts for accessibility. Light-based notification systems have also been investigated as an effective complement to auditory methods [6]. Such multimodal systems not only improve awareness but also contribute to greater independence and safety for hearing-impaired users.

Wireless communication has been a cornerstone of recent innovations in assistive devices. Bluetooth-based notification and automation systems have demonstrated high reliability and efficiency in household contexts [7]. In particular, Bluetooth Low Energy (BLE) has been highlighted for its low power consumption and stable connectivity, making it suitable for portable notification systems [8]. Huang et al. [9] showed that BLE can significantly extend device battery

life, while An et al. [10] confirmed its adaptability for smart home and IoT applications. Large-scale surveys of IoT technologies [11, 12] further underline the importance of BLE-enabled microcontrollers for energy-efficient and secure communication.

The ESP32 microcontroller has received growing attention in this context due to its dual-mode Bluetooth support and high processing power with low energy demand [13]. Studies confirm its versatility for IoT and assistive applications, especially when combined with modular design approaches [14]. In addition, researchers emphasize that data security and backup power support are critical for the sustainable deployment of IoT-based notification systems [15].

Despite these advances, current solutions often suffer from high costs, limited customizability, or lack of integration with everyday mobile devices. The system proposed in this study addresses these gaps by combining a low-cost ESP32-based platform, BLE communication, and a user-friendly mobile application. It provides customizable vibration and visual notifications, timestamped history, and backup battery support to ensure continuity during power interruptions. By integrating hardware and software into a compact, energy-efficient design, this work contributes to the ongoing development of inclusive and practical assistive technologies.

2. Materials and Methods

The core components of the system include the ESP32 microcontroller, a 12 V transformer, full-wave bridge rectifier, backup battery with a TL431-based charging circuit, notification LEDs, and a tactile vibration motor. The ESP32 handles Bluetooth communication and GPIO event processing. The hardware was designed using Eagle CAD, with a single-layer PCB fabricated via toner transfer [16-18]. Components were mounted through-hole, and signal traces were reinforced with solder, and the general structure of the proposed smart doorbell system and its components are presented in Figure 1.

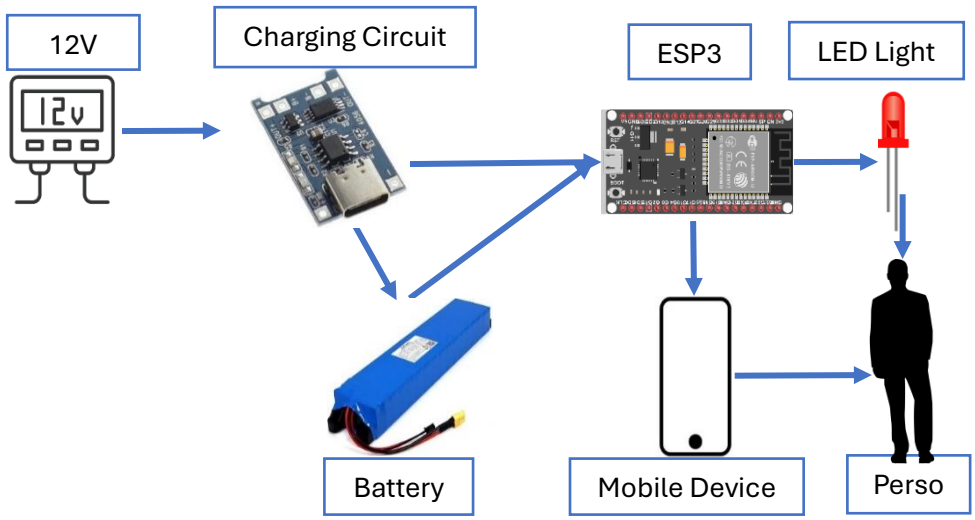
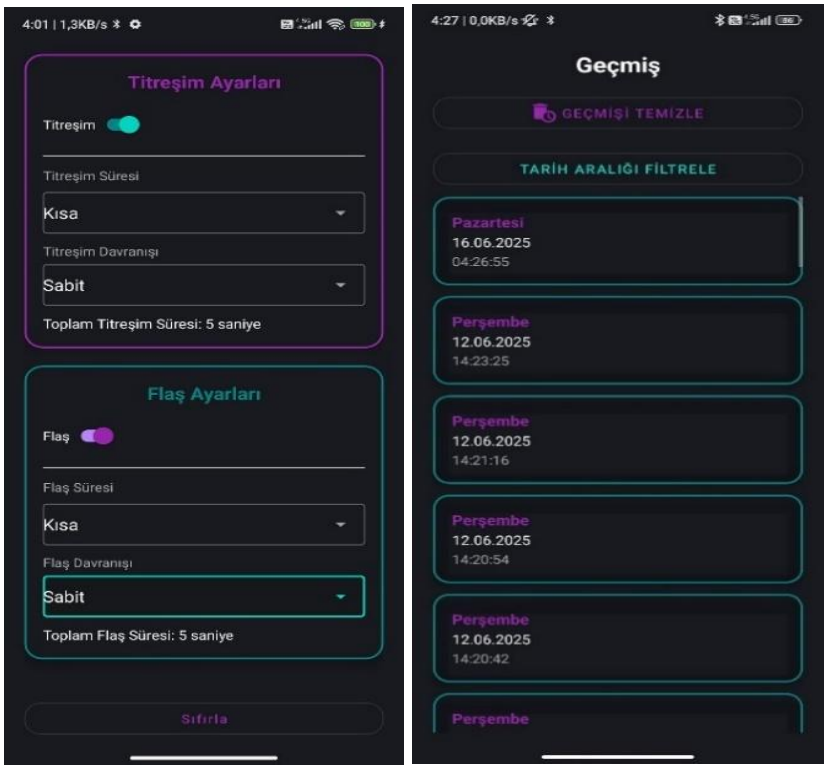


Figure 1. Schematic representation of ESP32-based smart doorbell system.

Mobile application development was conducted using Android Studio software. The interface structure and key functionalities of the mobile app are presented in Figure 2, including a settings panel that enables users to customize vibration duration, repetition mode, and flash alerts, and a history panel that records and displays timestamps of doorbell events, allowing users to review past notifications.



(a) (b)

Figure 2. Interface of the developed mobile application: (a) Settings panel enabling customization of vibration duration, repetition mode, and flash alerts. (b) History panel showing recorded timestamps of doorbell events.

As illustrated in Figure 3, the circuit schematic was initially created using EAGLE software, while Figure 4 presents the final device, showing the fully assembled and implemented system.

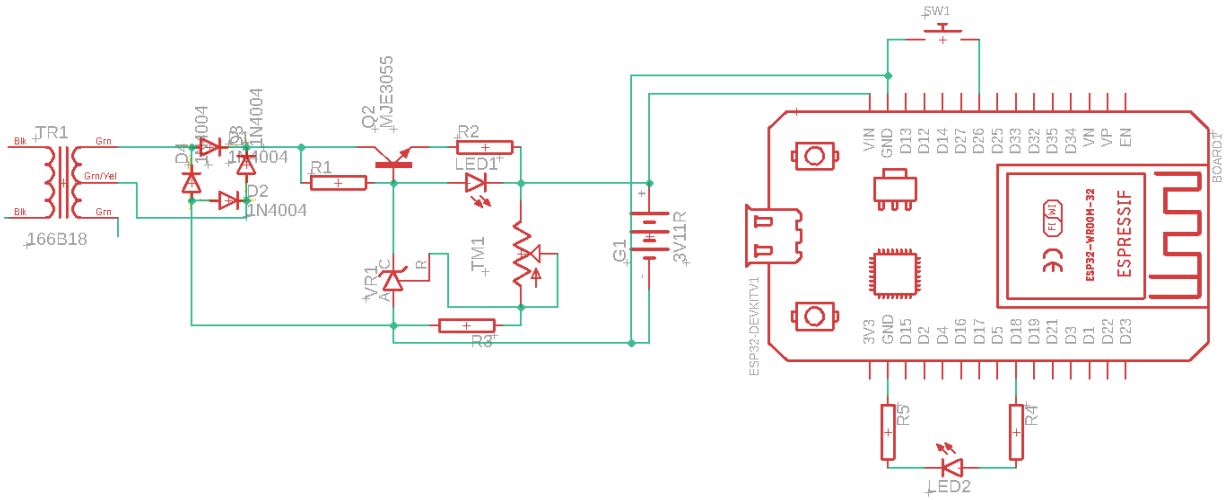
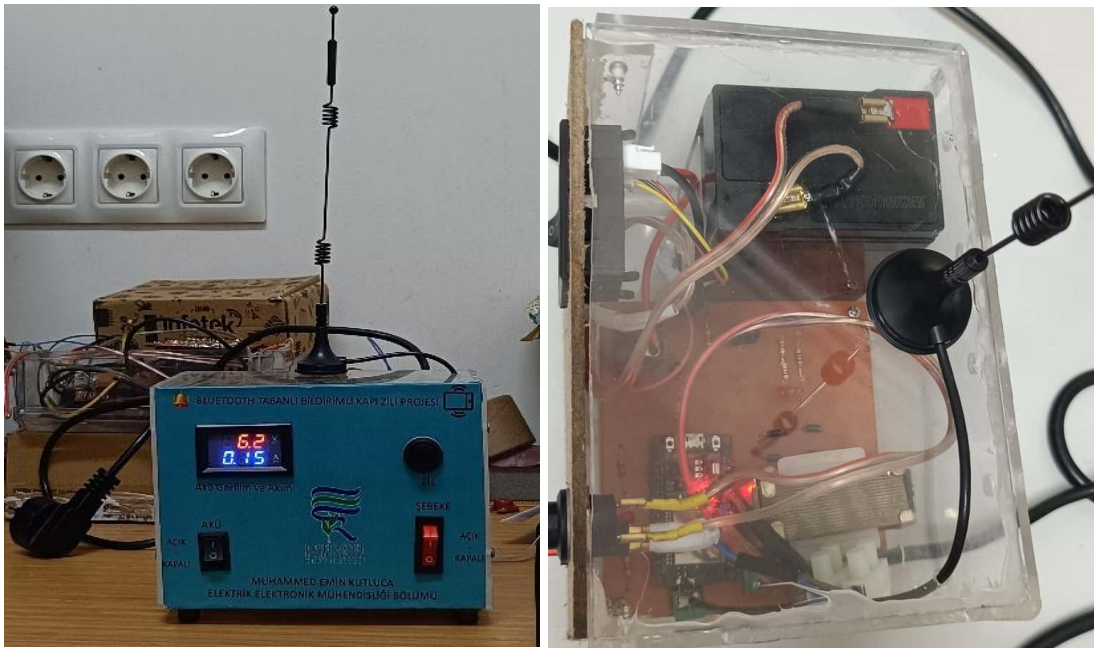


Figure 3. Circuit schematic of the smart doorbell system, designed using EAGLE software.



(a) (b)

Figure 4. Completed implementation of the device, (a)front side, (b) inside.

The simulation of the designed system was carried out using the Wokwi environment, and the corresponding visual representation is provided in Figure 5.

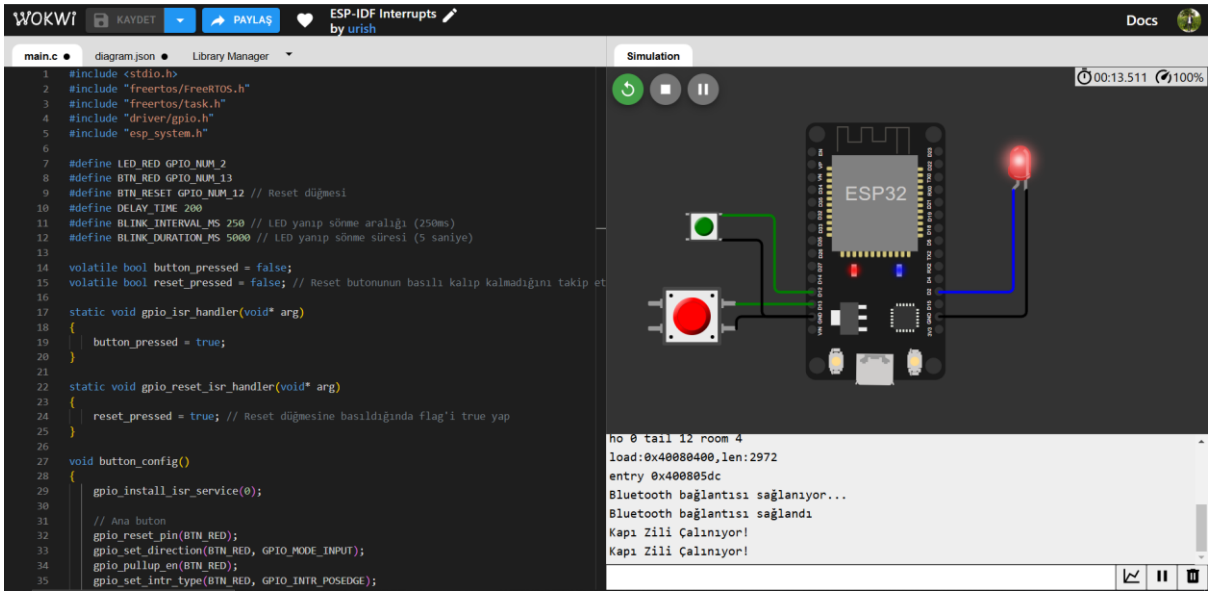


Figure 5. ESP32 firmware simulated in Wokwi environment.

3. Results and Discussion

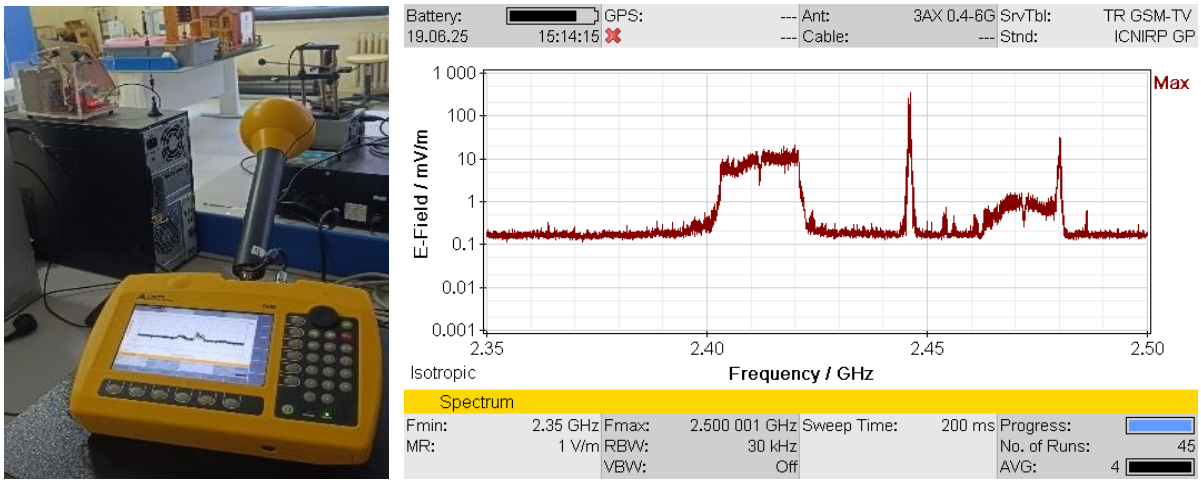
System simulations demonstrated efficient signal propagation and energy management. The ESP32 consumed less than 0.15 A during active notification and near-zero current in idle state. Bluetooth range testing indicated reliable connection up to 30 meters indoors [11].

The summary of power consumption patterns according to the frequency of doorbell usage is presented in Table 1. This table illustrates how usage intensity affects current draw and expected operation time.

Table 1. Power consumption versus usage frequency.

Scenario	Power Consumption (W)	Working Hours
Continuous Bell (0.15A)	0,8175 W	~26,67 hours (1,11 day)
10 Times a Day Bell	~1,3168 Wh/day	~16,5 day
Standby only (0.01A)	0,0545 W	~400 hours (~16,6 day)

PCB durability and battery backup efficiency were validated over multiple power cycle scenarios. EMC tests confirmed the system complies with SRM-3006 standards. The antenna tests showed signal integrity improved by 300% with external antenna integration [23-26]. The electromagnetic compatibility performance of the system was validated using SRM-3006, and the test layout and procedural setup are presented in Figures 6 and 7.



(a) (b)

Figure 6. Electromagnetic compatibility test conducted using SRM-3006: (a) Measurement setup during the test, (b) Electromagnetic radiation results obtained from the device under test.

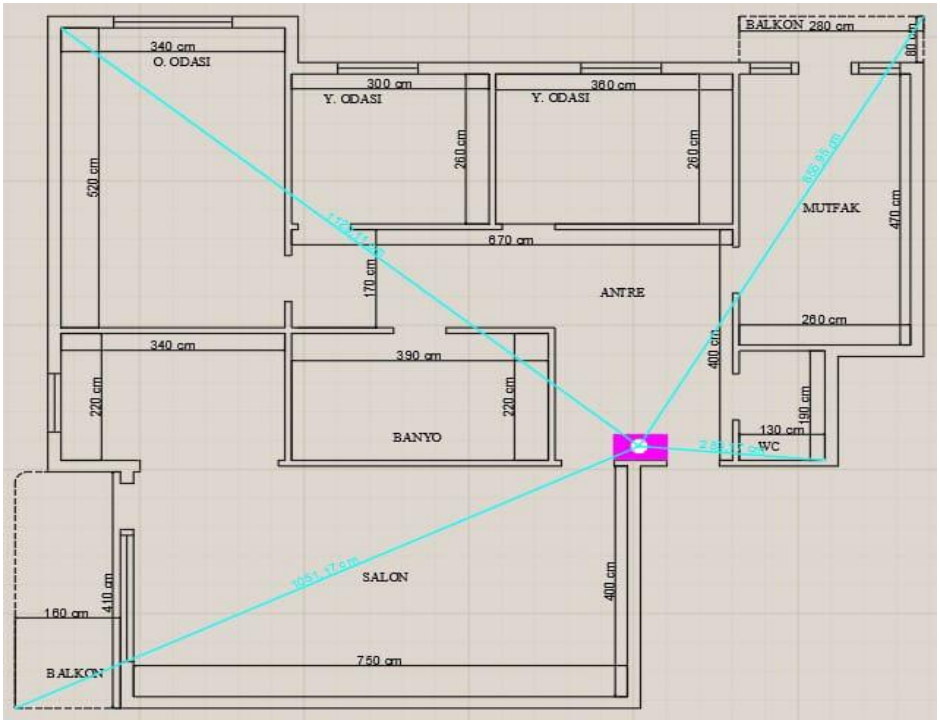
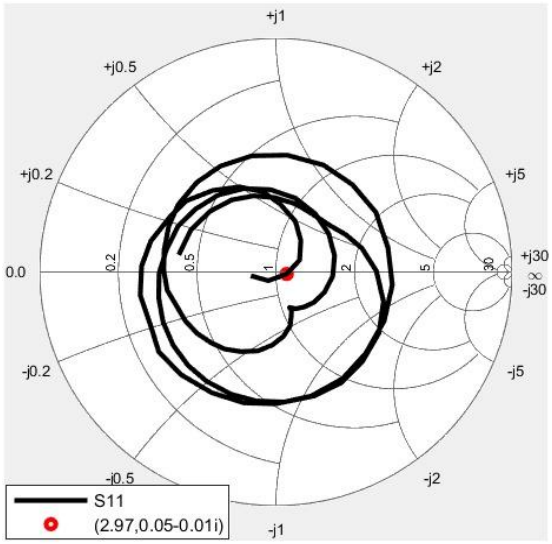


Figure 7. AutoCAD layout of the indoor test setup used in EMC analysis.

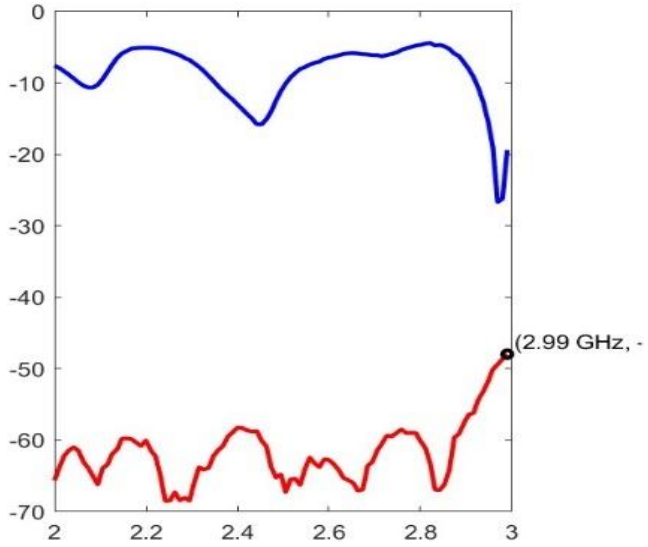
3.1. Antenna Result

Antenna reflection (S_{11}), energy consumption, Bluetooth coverage, and EMC tests were conducted in real-world settings. The results of these evaluations are presented in Figure 8(a) which shows the real-time S_{11} measurement, Figure 8(b) illustrates the impedance behaviour on the Smith Chart, and Figure 8(c) provides MATLAB-based frequency-domain S_{11} and S_{21} values, demonstrating that at 2.4 GHz the reflection coefficient was measured as S11 ≈ –14.5 dB. According to the reflection calculation, only about 3.5% of the input power was reflected, indicating that the antenna operates with high efficiency at the target frequency band. The antenna tests showed signal integrity improved by 300% with external antenna integration [19-22].

(a)



(b)



(c)

Figure 8. (a) Real-time S11 measurement of the antenna, (b) Impedance behavior represented on the Smith Chart, (c) Frequency-domain S11 and S21 results obtained from MATLAB analysis.

3.2. Mobile Application Performance

The mobile application allowed seamless configuration and alert logging, providing users with the ability to customize vibration and flash settings, reset preferences, and review a detailed history of past alerts. The user interface, which includes a dynamic settings panel and a dedicated history screen, was rated highly intuitive and user-friendly by testers. Real-time performance measurements indicated sub-second latency between the doorbell press and the mobile alert, confirming both the reliability and responsiveness of the system in practical scenarios.

4. Conclusion

This study presents a low-cost, modular, and efficient smart doorbell designed for hearing-impaired users. The system integrates tactile (vibration) and visual (flash) notifications via BLE

communication, allowing real-time alerts with sub-second latency. A dedicated mobile application enables customization of notification patterns, durations, and repetition modes, as well as review of logged alert history. The hardware features a compact ESP32-based control unit, external antenna for improved range, and a backup battery for uninterrupted operation. Testing confirmed reliable Bluetooth coverage, efficient energy consumption, and electromagnetic compatibility.

The modular design allows adaptation to broader smart home applications, including integration with additional sensors or smart devices. Future improvements may involve cloud-based logging, AI-driven anomaly detection, and wearable device notifications, enhancing usability and user independence. Overall, the developed system demonstrates a practical, user-friendly solution and provides a strong foundation for further research and development in assistive technologies and smart home systems.

Acknowledgements: This project was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the 2209-A University Students Research Projects Support Program. The authors also thank the Recep Tayyip Erdogan University Electromagnetic Research Center (REMAM) for equipment and test support.

References

1. Ministry of Family and Social Services of Türkiye (2023). Disability and Elderly Statistics Bulletin, April **2023**.
2. Brown, L. M., Brewster, S. A., & Purchase, H. C. A first investigation into the effectiveness of Tactons. World Haptics Conference, Pisa, Italy, **2005**, pp. 132–139.
3. Gonzalez, E., & Gonzalez, F. Haptic feedback interfaces for individuals with hearing impairments: A technological perspective. International Journal of Human-Computer Interaction, **2018**, 34(10).
4. Crispin, K. Haptic Feedback in Mobile Devices: A Review of Current Research and Future Directions. Journal of Mobile Technology in Medicine, **2016**, 5(3):23–27.
5. Jiang, X., Ren, J., & Li, Y. A Survey on Haptic Feedback Technology for the Internet of Things. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, **2020**, 50(4):348–360.
6. Paidi, Z., Haliza, H. E., Zain, N. M., & Othman, M. Development of a Notification System Using a Wearable Concept that Allows Hearing-Impaired Person to Detect that Their Doorbell Has Been Pressed Using the nRF24L01 Wireless Module. International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, **2022**, 12(12):2766–2777.
7. Hassan, M. M., Ali, A. A., & Younis, M. A. Bluetooth-Based Wireless Home Security and Automation System Using Arduino. Journal of Intelligent Systems, **2018**, 10(4):1425–1432.
8. Alarifi, A., Tolba, A., & Elsaadany, A. Internet of Things and Fog Computing Applications: Overview and Challenges. International Journal of Computer Applications, **2017**, 975(8887):1–5.
9. Huang, Y., Wu, X., & Chen, J. Energy-efficient Bluetooth Low Energy (BLE) for Internet of Things (IoT) Applications. IEEE Transactions on Industrial Informatics, **2017**, 13(2):944–954.
10. An, X., Wang, L., Wu, Y., & Chen, D. Implementation of a Home Automation System Using Bluetooth, and IoT. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, **2018**, 9(2):321–331.
11. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, **2015**, 17(4):2347–2376.

12. Sinha, A., & Mukhopadhyay, I. Implementing Internet of Things (IoT) Solutions for Smart Homes. In: Mondal, S., Piuri, V., Tavares, J.M.R.S. (eds) Intelligent Electrical Systems and Industrial Automation. Springer, **2024**.
13. Rodriguez, J., Ramirez, F., & Sanchez, P. ESP32 Microcontroller Applications in IoT. International Journal of Embedded Systems, **2018**, 11(2):115–124.
14. Brown, T. Energy Efficient Microcontrollers. Microelectronics Journal, **2022**, 15(4):123–130.
15. Kumar, R., & Singh, A. Bluetooth-based Wireless Communication, and IoT Security Challenges. International Journal of Computer Networks & Communications, **2019**, 11(5):81–95.
16. Rodriguez, C., Palacios, J., & Garcia, M. Real-Time and Low-Power Internet of Things Applications Using ESP32. Microprocessors and Microsystems, **2018**, 63:22–30.
17. Wokwi Platform (2025). ESP32 Circuit Simulation. Available at: https://wokwi.com/projects/419603774313691137
18. Espressif Systems (2025). ESP32 Datasheet. Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
19. Balanis, C. A. Antenna Theory: Analysis and Design (4th ed.). Wiley, **2016**.
20. Agilent Technologies. Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis (Application Note 1287-1). **2006**.
21. Keysight Technologies. Vector Network Analyzer (VNA) Measurement Basics. **2018**.
22. IEEE Standard Test Procedures for Antennas. IEEE Std 149-1979, **1979**.
23. ICNIRP & ElectroSense. Electromagnetic Field Limits and Regulations. **2025**. Available at: https://electrosense.com.tr/yonetmelikler/
24. Şahin, M.E., Dilek, B., and As, N. Electromagnetic pollution measurement in the RTE University campus area. Recep Tayyip Erdoğan University Journal of Science and Engineering, **2021**, 2(1):53–65.
25. Şahin, M.E., Karan, Y., and As, N. Investigation of GSM, LTE and Wi-Fi electromagnetic radiation in dwellings. Acta Physica Polonica A, **2017**, 132(3):509–512.
26. Şahin, M.E., Karan, Y., and As, N. Selective radiation measurement for safety evaluation on base stations. Gazi University Journal of Science, **2013**, 26(1):73–83.

DİŞ HEKİMLİĞİ UYGULAMALARI İÇİN DENTAL REÇİNEDE HİDROKSİAPATİT KATKISININ ÜRETİLEBİLİRLİĞİ VE YAPISAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

MUSA YILMAZ[1]

[1]Naci Topcuoğlu Vocational School, Gaziantep University, Türkiye

Özet

Diş hekimliği uygulamalarında kullanılan reçine esaslı materyaller, estetik ve üretim kolaylığı açısından avantajlar sunmakla birlikte biyouyumluluk ve fonksiyonellik yönünden geliştirilme potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, ticari bir dental reçine içerisine hidroksiapatit (HA) katkısı yapılarak kompozit malzemeler üretilmiş ve temel karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında saf reçine ve %5 HA katkılı reçine kompoziti hazırlanmış, tüm numuneler sabit süreli ultraviyole (UV) kürleme işlemine tabi tutularak tam polimerizasyon hedeflenmiştir. FTIR analizleri ile polimer matrisin fonksiyonel grupları ve polimerizasyon davranışı değerlendirilmiş, SEM görüntüleri ile katkının yüzey ve kesit morfolojisine etkileri incelenmiştir. EDS analizleri sonucunda Ca ve P elementlerinin varlığı doğrulanmış ve elde edilen Ca/P oranları, hidroksiapatit fazının reçine matrisine başarıyla entegre edildiğini göstermiştir. Ayrıca yoğunluk ölçümleri ile HA katkısının malzemenin fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, hidroksiapatit katkısının dental reçine kompozitlerinde homojen bir şekilde dağılabildiğini, elementel düzeyde doğrulandığını ve fiziksel özelliklerde ölçülebilir değişiklikler oluşturduğunu göstermektedir. Bu bulgular, hidroksiapatit katkısının dental reçine bazlı materyallerin biyouyumluluk ve fonksiyonel performansını geliştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymakta ve ilerleyen çalışmalarda yapılacak mekanik ile biyolojik testler için bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hidroksiapatit (HA), Biyoaktif kompozit, Dental reçine, Dental kompozitler, Üretilebilirlik

METALLURGICAL ASPECT OF WIREDRAWING PROCESS OF METALLIC WIRES

ZAKARIA BOUMERZOUG[1]

[1]University of Biskra, LMSM, Department of Mechanical Engineering, Biskra, ALGERIA

Abstract

Global wire production is constantly increasing. This increase in wire production is due to industrial demand for various applications. For example, copper and aluminum wires are generally used as electrical conductors for electricity transmission, and steel wires for civil engineering. Wire manufacturing techniques include wire drawing, which is a metal shaping process. This process involves reducing the initial wire by passing it through a very hard die that reduces its cross-section. Typically, several dies are placed in series to gradually reduce its cross-section to the desired diameter. From a metallurgical point of view, this reduction in cross-section is accompanied by significant plastic deformation that affects the microstructure of the metal and, consequently, its mechanical, physical, and chemical properties. This paper will focus on the microstructure evolution during the drawing of metallic materials, as well as their properties. In addition, existing research questions in drawn wires and the challenges to overcome will also be presented.

Keyword: Wiredrawing, metallic wires, microstructures, properties.

1. Historical aspect

The production of metal wire for various applications is a very ancient process. For example, the use of metal wire, especially gold wire, dates back to ancient Egypt. Wire has been produced for millennia using various methods [1]. Carrol reported that all ancient wire was faceted with hammer blows [2]. In our days, the most well-known process is wire drawing, which is a shaping process by passing the wire through a die harder than the metal to be drawn and having a wire of smaller cross-section before drawing.

2.Production of metallic wire and their industrial application :

Currently, the production of metal wires is increasing. Copper, aluminum, and steel wires are the most produced due to their wide uses in different fields of industry and other areas of life. Copper wire is used in all types of installations, from residential installations to industrial sectors, or from electrical equipment to household appliances. Copper wire is widely used in the generation, transmission, and distribution of electricity for telecommunications and electronic circuits. Copper has excellent conductivity and is a malleable material.
Aluminum wires are widely used in various applications due to their light weight, conductivity, and corrosion resistance. They are used in the electronics and electrical industries, as well as in telecommunications, particularly for cables and cable networks, as they allow the transport of electrical current over long distances without significant loss. They are also used in the automotive

industry: The automotive sector uses aluminum cables, in particular, to reduce fuel consumption and improve energy efficiency. Aluminum wire is widely used for power lines, lighting systems, and building wiring. For the renewable energy sector, aluminum cabling is becoming the preferred choice for power cables in renewable energy projects due to its efficiency and cost-effectiveness [3]. Steel wires are also widely used in many fields. They can be used both as a final consumer product (e.g., needle thread, rope thread, polygraphic thread, etc.) and as a semi-finished product for the production of electrodes, meshes, ropes and cables , etc.[4].

3.Principle of wiredrawing process :

Wire drawing is based on the ability of the metal to deform plastically. This process consists of passing the metal through a calibrated orifice of a die, under the action of continuous traction until a wire of lower section is obtained (Fig.1). Wire drawing is a metal forming process characterized by a high deformation rate. During wire drawing, a significant amount of heat is generated, particularly by friction at the contact interface between the wire and the die [5]. It has been established that the capacity of a wire drawing process depends mainly on three characteristics: (a) the properties of the raw material; (b) the geometry of the die, particularly its angle and length; and (c) the processing conditions, such as the drawing speed and friction at the interface between the die and the wire [6]. Note that the deformation rate is written as:

$$\varepsilon = [(D_0 - D) / D_0] \times 100 \quad (1)$$

With:

D_0: initial diameter (diameter of the wire rod).
D: diameter after drawing.

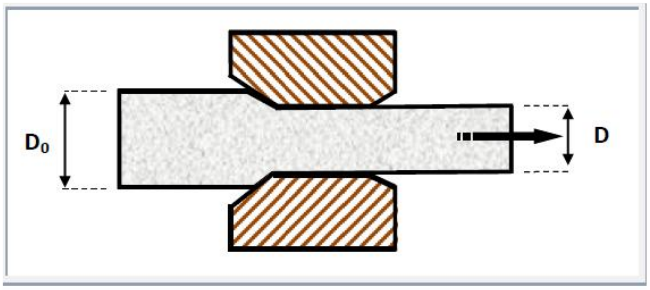


Figure 1. Reduction of the wire section by wiredrawing process after its passage through a die.

4. Industrial manufacturing process

On an industrial scale, the principle of wire drawing is almost the same for different metal wires, except in certain manufacturing stages, either before drawing or after drawing. For example, drawing aluminum wire goes through certain stages. The main raw material used for drawing is aluminum rod, generally available in diameters between 9 and 30 mm. The aluminum rods are prepared and cleaned to remove impurities, oils, and oxidation, then preheated to facilitate drawing. The key steps in aluminum wire manufacturing include drawing, annealing, and coiling. Drawing involves passing the aluminum rods through a series of progressively smaller dies that reduce their diameter to the desired size. This process requires lubrication to reduce friction and prevent wire breakage. Lubricants such as oils or gels are used to coat the wire during drawing. The temperature is controlled throughout the drawing process to avoid overheating, which could

cause metal deformation or surface imperfections. Once the wire is drawn to the desired thickness, it undergoes annealing. This annealing process involves heating the wire to a specific temperature (350-500°C), then slowly cooling it to stabilize its structure, release internal stresses, and increase ductility, meaning it becomes malleable. This step is crucial for improving the wire's flexibility and tensile strength. Finally, it is wound into coils for easier storage and transportation [3].

It should be noted that rigorous quality control is essential in the production of aluminum wire, such as the tensile test to determine the wire's strength and elasticity. The electrical conductivity test to measure the wire's ability to conduct electricity. Surface Inspection testing is commonly used to detect possible defects such as scratches, cracks or oxidation. There is also dimensional control, to ensure that the wire meets the specified diameter and length. Chemical composition analysis is usually performed on the initial wire to ensure that the wire meets the required purity levels and does not contain unwanted elements [3].

5. Industrial problems

Like any manufacturing process, wire drawing encounters problems such as wire breakage during drawing, surface degradation, etc. However, breakage is almost the major problem. For example, the problem of wire breakage in the production of steel cables has always attracted much interest. Research on the crack propagation mechanism caused by drawing damage remains an urgent area of study in engineering [7].

6.Metallurgical aspects of wiredrawing process :

From a metallurgical view, wire drawing is a shaping process during which the metal undergoes plastic deformation, which induces grain orientation along the drawn wire axis, an increase in the number of dislocations; deformation energy will be stored in the drawn metal. Figure 2 illustrates grain elongation after drawing a wire. The grains are oriented along the wire axis. This morphology is known as texture. Figure 3 shows an example of the effect of the drawing reduction ratio on the microstructure of a 0.05 % Carbon steel. It can be seen that as the drawing ratio increases, the grains become more deformed and oriented along the axis of the drawn wire. The most well-known texture is the fibrous texture, illustrated in the figure of drawn steel.

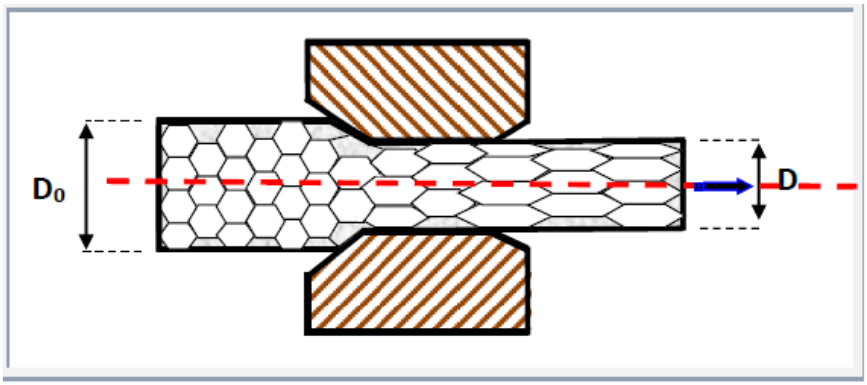


Figure 2. Schematic representation of grains elongation after wiredrawing process.

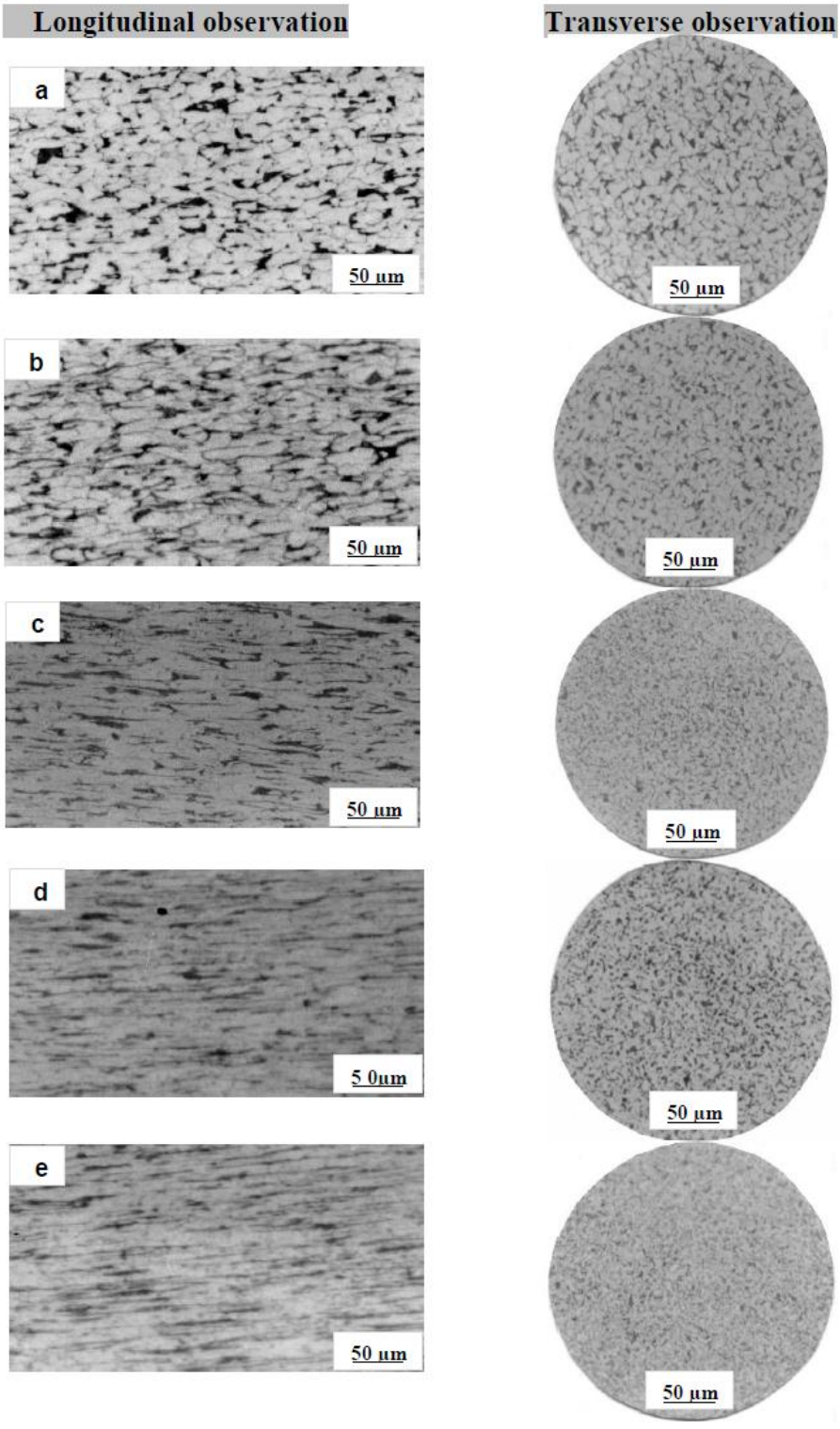


Figure 3. Microstructures of mild steel wires (0.05%C) reduced by wiredrawing: (a) : ε=30.1%, (b): ε=49.1%, (c): ε=74.1%, (d): ε=81.1%, and (e): ε=87.6%.

This new state of the drawn wire is characterized by a very high hardness, called hardening by plastic deformation. The wire is drawn through conical dies and hardens due to the strong deformation during cold working [8]. For example, drawing a high-carbon steel wire increases the wire's strength but significantly decreases its ductility [9].In this state, the wire is no longer malleable, which is why manufacturers apply heat treatments to make it malleable and usable in various industrial sectors. In addition, for metal wires used as conductors, such as copper or aluminum wires, drawing process affects the electrical conductivity of the metals, meaning the metal becomes less conductive. Therefore, for each drawn metal, there is an appropriate heat treatment to restore these initial properties (malleability, electrical conductivity, etc…). It is important to note that heat treatments cause a restoration reaction in the early stages of treatment, and if the treatment time is prolonged, the metal will undergo a recrystallization reaction. As a result, the metal becomes less hard. Therefore, the majority of research work is concerned with determining the optimal thermal conditions for obtaining usable drawn metal.

According to the above, the field of scientific research related to metal drawing is very diverse. In addition, each metal material has its own characteristics and therefore its own behavior during drawing. Consequently, several scientific questions have already been asked and remain subjects of research. Table 1 lists some selected scientific works related to the drawing of some metallic materials. It can be seen that the research works are not only focused on common materials like copper, aluminum or steel, but also extend to other metallic materials like titanium, tungsten and others. However, the number of metallic materials that have been studied remains very limited and therefore that this is an area in which scientific research can still be explored.

Table 1. Some selected scientific works related to the drawing of some metallic materials.

Metal	Research Question	Ref.
Copper Wire	Effect of wiredrawing speed on the deformation characteristics, microstructure and properties of copper wire rod.	[10]
Copper alloy (Cu-Zr) wire	Effect of second phase on strength and electrical conductivity of drawn Cu-Zr wire.	[11]
Aluminum wire	Microstructure evolution and strengthening mechanisms of cold-drawn commercially pure aluminum wire.	[12]
Aluminum alloy wire	Prediction of damage in the wire drawing	[13]
Carbon steel wire	Creating an ultrafine-grain structure in carbon steel wire.	[4]
Mg alloy (Gd-Y-Zn-Zr) wire	Microstructure evolution and mechanical properties of Mg alloy during the multi-pass drawing.	[14]
Titanium wire	Effect of two type of lubricants on the hardeness of commercial pure titanium (CpTi) in wire drawing processes.	[15]
Titanium alloy (Ti-Al-V)	Experimental and simulation study on the deformation behavior, mechanical properties and microstructure of	[16]

	Ti–6Al–4V alloy wires fabricated by hot drawing.	
Tantalum wire	Physical properties evolution of high-purity tantalum wire with the elongated grains caused by cold drawing.	[17]
Tungsten wire	Graphite emulsion (as a lubricant) with excellent dispersion stability and rheological property for drawing ultrafine tungsten wire.	[18]
Stainless steel wires	Application of the Electrically Assisted (EA) wire drawing process (is a hybrid manufacturing process).	[19]
Zinc alloy (Zn-Al) wire	Developing models with the aim of designing and optimizing the wiredrawing process of zinc–aluminum (ZnAl) alloys, specifically ZnAl15%, used for anti-corrosion applications	[20]
Nickel alloy (Ni-Co) wire	The influence of texture on strength was investigated by altering the amount of cobalt in Ni-Co alloys.	[21]

7.Future challenges

The growing global demand for wires is expected to continue. To meet this demand, financial and scientific resources must be allocated. However, some challenges remain, such as improving the manufacturing process from the choice of the initial material to be drawn, using the appropriate lubricant to increase the life of the die and have a good surface finish of the drawn wire, and finally controlling the drawing parameters. Additionally, the type of wire drawing die poses another challenge due to its design and the material used for its manufacture. The drawing parameters are mainly summarized in the choice of the appropriate drawing speed for the proper drawing process, and the application of the appropriate heat treatment to make the material malleable when needed. All these challenges help to avoid several manufacturing defects such as wire breakage during drawing and other defects. Among the challenges to be faced in the wire drawing industry is the mastery of manufacturing fine metal wires that can reach a cross-section diameter of less than 1 mm and this for specific applications, like the electronics industry.

8. Conclusion

The wire manufacturing industry relies on wire drawing. This process is one of the shaping methods applied to metals. A drawn wire is a wire that has undergone plastic deformation by passing through a die to reduce its cross-section. This reduction is accompanied by a microstructural change, resulting in the orientation of the grains in the direction of the wire axis. This microstructural change induces the hardening of the material and, consequently, the modification of its properties. This is why certain heat treatments are proposed to restore the initial properties of the wire. Generally, wire drawing faces problems such as wire breakage during drawing. This is why manufacturers are careful to control the parameters of this process, such as the wiredrawing speed, and others. Finally, research on wire drawing has been limited to a limited number of metallic materials, and several research questions remain to be clarified, which means that this is an area where scientific research can be further explored.

References

19. Newbury, B.D., and Notis, M.R. The History and Evolution of Wiredrawing tTechniques. JOM, **2004**, 56:33–37.
20. Carroll, D. L. Wire Drawing in Antiquity. American Journal of Archaeology, **1972**, 76(3):321-323.
21. Aluminium-wire-drawing-Manufacturing-Plant-Project-Report 2025: Key Insights and Strategies. Available in : https://www.openpr.com/news/3910141/aluminium-wire-drawing-manufacturing-plant-project-report . download on 10/08/2025.
22. Polyakova, M. A., Gulin, A. E., and Golubchik, E. M. Alternate Drawing as the Way for Improving Mechanical Properties of Medium Carbon Steel Wire. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **2018**, 411(1) p. 012058.
23. Prisco, U. Strain Hardening of Carbon Steel During Wire Drawing. Mater. Res. **2017**, 21(3), p. e20170303.
24. Haddi, A., Imad, A., and Vega, G. Analysis of Temperature and Speed Effects on the Drawing Stress for Improving the Wire Drawing Process. Mater. Des., **2011**, 32: 4310–4315.
25. Ma, A., Fang, F., and Li, Z. Damage Analyses and Crack Propagation of Wire Drawing With Central Inclusion Under Different Compression Ratios. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **2025**, 48(6): 2743-2758.
26. Larsson, J., Jansson, A., and Karlsson, P. Monitoring and Evaluation of the Wire Drawing Process Using Thermal Imaging. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **2019,**101(5):2121-2134
27. Nagashima, H., Kubota, H., and Yoshida, K. Ductility Improvement of Drawn High-Carbon Steel Wire by Alternate Wire Drawing. Materials Transactions, **2025**, 66(8):1059-1064.
28. Wu, H., Huang, T., Song, K., Li, S., Zhou, Y., and Zhang, Y. Effect of Drawing Speed on the Deformation Characteristics, Microstructure and Properties of Copper Wire Rod. Materials Science and Engineering: A, **2024**, 892, 146025.
29. Nakashima, K., Kunimine, T., Monzen, R., Muramatsu, N., and Ueno, S. Effect of Microstructure on Strength and Electrical Conductivity of Cu–3.8 wt% Zr Alloy Wires. Materials Transactions, **2024**, *65*(2):130-137.
30. Hou, J. P., Wang, Q., Yang, H. J., Wu, X. M., Li, C. H., Li, X. W., and Zhang, Z. F. Microstructure Evolution and Strengthening Mechanisms of Cold-drawn Commercially Pure Aluminum Wire. Materials Science and Engineering: A, **2015,** *639*, 103-106.
31. González, Á., Cruchaga, M., Celentano, D., and Ponthot, J.-P. Damage Prediction in the Wire Drawing Process. *Metals,* **2024**,*14*, 1174.
32. Xie, W., Fu, M., Su, H., Wang, S., Wang, W., Chen, W., ... and Zhang, W. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of the Mg-9.5 Gd-4Y-2Zn-0.5 Zr Alloy Wire During the Multi-pass Drawing. Journal of Alloys and Compounds, **2025,** 182845.
33. Iqbal, Gunawarman, Yetri, Y., and Affi, J. (2025, January). Effect of Two Type of Lubricants on the Hardeness of Commercial Pure Titanium (CpTi) in Wire Drawing Processes at Constant Rpm Speed. In AIP Conference Proceedings, **2025**, 3223, 1, p. 040008. AIP Publishing LLC**.**
34. Gao, Z., Mao, Y., Zhang, Z., Bai, C., and Zhou, L. Experimental and Simulation Study on the Deformation Behavior, Mechanical Properties and Microstructure of Ti–6Al–4V Alloy

Wires Fabricated by Hot Drawing. Journal of Materials Research and Technology, **2025**, *35*:5440-5454**.**

35. Lin, J. L., Wang, G. S., Zhang, X. F., Bi, Y. S., Wu, Y. J., Zhi, X., and Wang, Q. Physical Properties Evolution of High-purity Tantalum Wire with the Elongated Grains Caused by Cold Drawing. Materials Today Communications, **2025**, 44, 111983.
36. Zhao, D., Xie, J., Hou, R., Wei, Q., Lai, F., Wang, B., ... & Shen, Q. Graphite Emulsion with Excellent Dispersion Stability and Rheological Property for Drawing Ultrafine Tungsten Wire. Journal of Materials Research and Technology**. 2025**, 36, 9473-9480.
37. Sánchez Egea, A. J., González Rojas, H. A., Celentano, D. J., Jorba Perió, J., and Cao, J. Thermomechanical Analysis of an Electrically Assisted Wire Drawing Process. Journal of Manufacturing Science and Engineering, **2017**, 139(11), 111017.
38. Del Rey, J.C., Guerrero-Vacas, G., and Comino, F., Rodríguez-Alabanda, O. Models for the Design and Optimization of the Multi-Stage Wiredrawing Process of ZnAl15% Wires for Spray Metallization. *Materials,* **2024***, 17,* 5307.
39. Bojjawar, G., Suwas, S., and Chokshi, A. H. The Effect of Texture on the Hall-Petch Relationship in Severely Drawn Ni-Co Microwires. Metallurgical and Materials Transactions A, **2024**, 55(1):232-246.

FLUID STRUCTURE INTERACTION FSI BEHAVIOR OF A VVER 1200 NUCLEAR REACTOR VESSEL UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS

BEGUM KUTUK [*1], IBRAHIM HALIL GUZELBEY [1]

[1] Gaziantep University. Gaziantep, Türkiye.

Abstract

Maintaining the structural integrity of nuclear reactor pressure vessels (RPVs) during both normal operating conditions and postulated accidents is an important safety concern in the field of nuclear reactor design. Development of numerical techniques has been needed in order to solve complex phenomena which happen in nuclear power plants. So, accurate descriptions of the heat transfer and the coolant flow within a nuclear reactor for the safety and performance concerns are always desirable. In particular, fluid-structure interaction (FSI) analysis must be resolved for accurate investigation and design of nuclear reactor pressure vessel internals which are completely submerged in coolant. In this particular study, the FSI effect of the light water as a moderator on RPV wall in a typical Russian design VVER-1200 nuclear reactor has been investigated. The aim was the characterization of the FSI phenomena occurring between the reactor vessel structure and the inner pressurized fluid. Due to computational limits, some simplifications in the geometry of the RPV were applied. The deformation of the RPV wall caused due to the coolant temperature has been analyzed. The temperature distribution effect from the ANSYS Fluent solvers has been used as a thermal load in the reactor vessel structural analysis. As a result of the analyses, the reactor vessel wall deflection and equivalent stress and thermal strain have been found. The Von Mises stress has been simulated with the coupling of output from the fluid solvers and the structural ones. Based on these studies, the analyses show that the structural integrity of the RPV is provided throughout the normal operating conditions. The obtained results validate that it is possible to perform more analysis for asymmetric operating or accident conditions using the FSI simulation knowledge obtained.

Keywords: Fluid-structure interaction; VVER-1200; Reactor pressure vessel; Thermal stress; ANSYS simulation.

AUTOMATED IDENTIFICATON OF FORMED OR BENT SHEET METAL PARTS

GUL SIGINDI*[1], ALI KILIC [1], SADETTIN KAPUCU[1]

[1] Gaziantep University, Mechanical Eng. Dept. Gaziantep, Türkiye.

Abstract

With the rise of digitalization under the framework of Industry 4.0, the demand for automated identification and traceability systems in sheet metal part manufacturing has increased significantly. Contactless, fast, and accurate identification of parts throughout the production process is critical for production monitoring and traceability. However, traditional methods such as barcoding, labeling, and manual coding fall short in terms of reliability and sustainability due to issues such as physical damage to labels, incorrect placement, or human errors during the process. In particular, the manual identification of formed or bent sheet metal parts with complex three-dimensional geometries and the placement of barcodes or labels on their surfaces is often challenging; this not only reduces identification accuracy but also adds extra time and labor costs to the production process. In this context, this study proposes a deep learning-based approach for the automated identification of formed or bent sheet metal parts with complex 3D geometries. A Convolutional Neural Network (CNN) based on InceptionV3 architecture was trained using 3D CAD model images generated from at least four different angles for each class. Additionally, real-world photographs of physical parts were captured from at least four different angles in the production environment. These images were subjected to masking and data augmentation to train a semantic segmentation model based on the U-Net architecture. Through segmentation applied to the real images, the parts were isolated from the background and converted into a format suitable for the classification model. The processed images were then passed through the trained CNN model to perform part identification. The proposed end-to-end system reduces the domain gap between synthetic CAD data and real-world images through segmentation-based preprocessing. As a result, metal parts with complex 3D shapes that have been formed or bent sheet metal can be accurately, scalably, and contactlessly identified in industrial environments.

Keywords: Automated Identification, Bent Sheet Metal Part, Convolutional Neural Network, Deep Learning, Semantic Segmentation.

INVESTIGATION OF FLOW BEHAVIOR AND SHARP CORNER EFFECTS IN ABRASIVE FLOW MACHINING OF ADDITIVELY MANUFACTURED PARTS

MEHMET ALI AKELOGLU*[1] OMER EYERCIOGLU[1]

[1]Gaziantep University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Gaziantep, TURKEY.

Abstract

Additive manufacturing (AM) has transformed the way modern products are designed and produced, offering unmatched flexibility to create complex geometries and micro-scale features that were once beyond reach with traditional manufacturing. By building parts layer by layer, AM enables engineers to fabricate customized components with internal channels, lightweight structures, and intricate designs—all while minimizing material waste. Techniques such as Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), and Multi Jet Fusion (MJF) are widely used for polymers and composites, while metal-based methods like Selective Laser Melting (SLM) and Electron Beam Melting (EBM) make it possible to produce high-strength parts from alloys such as titanium and nickel. Despite these advancements, one persistent challenge of AM is the surface roughness created during the printing process. Each deposited layer leaves tiny ridges and imperfections that can negatively affect a component's performance—especially in micro-channels, where surface irregularities disrupt fluid flow, increase pressure losses, and accelerate wear or fatigue. For applications in aerospace, biomedical, or fluidic systems, where precision and reliability are vital, this roughness must be reduced through post-processing. Conventional finishing techniques like polishing or grinding are often unsuitable for these intricate geometries, as they cannot reach deep or narrow internal passages. Abrasive Flow Machining (AFM) offers a powerful alternative. In this process, a semi-solid medium containing abrasive particles is forced through the component's channels, gently smoothing the internal surfaces and improving their quality without altering the overall geometry. In this study, AFM was applied to additively manufactured micro-channels to evaluate its potential for surface enhancement. The results show that AFM effectively minimizes surface roughness, leading to smoother flow paths and improved functional performance. This approach bridges the gap between the design freedom of additive manufacturing and the demanding surface quality standards required in industrial applications—helping AM parts move one step closer to real-world readiness.

Keywords: Additive Manufacturing (AM), Fused Deposition Modelling (FDM), Surface Roughness, Abrasive Flow Machining (AFM).

COMPARATIVE STUDY OF DEEP LEARNING SEGMENTATION MODELS FOR BACKGROUND SUBTRACTION AND PRE DEFECT DETECTION IN LARGE SCALE 3D PRINTING

SINAN KESKIN*[1] OMER EYERCIOGLU[1]

[1]Gaziantep University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Gaziantep, TURKEY.

Abstract

Large-scale polymer additive manufacturing (AM) presents unique challenges in real-time monitoring and defect detection due to its complex geometries, surface reflections, and varying environmental conditions. Accurate background subtraction and robust segmentation are critical first steps toward reliable in-situ defect detection and process control. This study investigates and compares the performance of five state-of-the-art semantic segmentation models—DeepLabV3, FCN, LinkNet, SegNet, and U-Net—for segmenting large-scale 3D printed structures from their surroundings. By isolating the printed component from the background in real-time, the approach enables a pre-study for automated defect detection and emergency process control during additive manufacturing. The models are evaluated in terms of segmentation accuracy, computational efficiency, and suitability for real-time deployment. Preliminary results indicate that encoder-decoder architectures such as U-Net and LinkNet provide competitive accuracy with relatively lower computational overhead, making them promising candidates for online AM monitoring. The findings of this comparative study aim to support the development of intelligent, vision-based control systems for large-scale 3D printing, enhancing production reliability and reducing material waste.

Keywords: Large Format Additive Manufacturing (LFAM), Semantic Segmentation, Defect Detection, Deeplabv3, FCN, Linknet, Segnet, And U-Net Real-Time Process Monitoring.

A FORGING LOAD BASED DIGITAL TWIN APPROACH FOR CONCEPTUAL DESIGN OF PRECISION GEAR DIES

ADEM AKSOY*[1] OMER EYERCIOGLU[1]

[1]Gaziantep University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Gaziantep, TURKEY.

Abstract

Digital twin technologies offer significant advantages in the design and decision-making processes by enabling the digital representation of physical systems in manufacturing environments. This study presents a literature-based conceptual analysis of how a digital twin approach—focused solely on forging load—can be structured for the design of precision gear forging dies. The primary objective is to identify the key components of a digital twin framework that can effectively model forging loads and to propose a conceptual system architecture based on this focus. The study utilizes forging load data extracted from previously published academic sources and associates this information with digital twin elements representing die behavior. A proposed framework includes CAD-based geometry definition, force-centered finite element analysis (FEA), and the integration of literature-derived forging load values. This conceptual structure aims to support early-stage analysis of load distributions, evaluate their potential impact on die performance, and promote data-driven optimization during the design phase. Although this work does not include experimental applications, it provides a foundational perspective on how a load-focused digital twin model can be constructed. It serves as a theoretical contribution to future implementations of digital twin technologies in smart forging environments.

Keywords: Digital Twin, Forging Load, Die Design, Literature Review, Simulation, Industry 4.0.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE V BENDING PROCESS OF ALUMINIUM COPPER CLAD SHEETS

VEYSEL CELIK*[1] OMER EYERCIOGLU[1]

[1]Gaziantep University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Gaziantep, TURKEY.

Abstract

Sheet metal forming is one of the important production processes and clad sheet metals are used to meet the multifunctionality needs of product. Clad sheet metal has advantages for specific product needs and requirements by the combination of two or more sheet metal layers. In this study forming behaviors of clad sheet material in V-bending are investigated using FEA software Ansys which can simulate the clad sheet deformations to predict the springback behavior of clad sheet material. Firstly, a 3D V-bending model is prepared in the Autodesk Inventor program and the V-bending process runs in Ansys. To understand the springback behavior some calculations were done in Ansys. Also investigated was the effect of punch, die geometric change, and setting conditions on the springback. The FEA results are compared with studies in the literature.

Keywords: Sheet Metal, Clad Sheet, V-Bending, Springback, FEA, Ansys.

ROBOTİK TEKNOLOJİ KULLANILARAK METALİK EFEKTLİ UZUN DAMARLI MÜHENDİSLİK TAŞLARININ GELİŞTİRİLMESİ

RECEP DİRİK [*1], NURCAN TOPÇU [2]

[1] Lotte Chemical Turkey Yüzey Tasarımları, Research and Development Department, Manisa, TURKIYE.
[2] Lotte Chemical Turkey Yüzey Tasarımları, Research and Development Department, Manisa, TURKIYE.

Özet

Bu çalışma, robotik teknoloji kullanılarak metalik efektli uzun damarlı kuvars esaslı mühendislik taşlarının geliştirilmesini amaçlamaktadır. Laboratuvar ölçeğinde, metalik efekt oluşturabilecek mineraller (mika ve spekülarit), alaşımlar (silikon metali, pirinç, bronz, bakır ve çinko gibi) ve simler test edilmiştir. Bu malzemelerin görsel performansları ve kimyasal dayanımları değerlendirilmiştir ve simle yapılan denemeler diğer alaşımlar ve minerallere göre . En uygun sonuçlar, robotik uygulamalara uyumlu olduğu görülen sim–kuvars karışımları ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda 14 özgün tasarım başarıyla geliştirilmiş ve ürün portföyüne eklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mühendislik Taşı, Metalik, Robotik, Kuvars, Alaşım, Sim.

1. Giriş

Mühendislik taşı, kuvars agregaları ile polyester esaslı termoset reçinenin belirli oranlarda karıştırılıp vakum altında preslenmesi ve yüksek sıcaklıkta kürlenmesiyle elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir [1]. Yüksek mekanik dayanım, düşük gözeneklilik ve kimyasal direnç gibi avantajları nedeniyle mutfak tezgâhları, yer döşemeleri ve iç mekân kaplamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [2]. Son yıllarda mühendislik taşı endüstrisinde performans parametreleri büyük ölçüde optimize edilmiş olup, sektördeki rekabet unsuru estetik çeşitlilik ve yüzey tasarımına yönelmiştir. Geleneksel üretim yöntemlerinde pigmentler ile cam, ayna ve benzeri dekoratif agregalar kullanılarak görsel ve estetik farklılık sağlanmaktadır. Bununla birlikte, Lotte Chemical, envanterinde yer alan robotik üretim teknikleri sayesinde Calacatta ve Statuario mermerlerinden esinlenen doğal damar görünümlerini mühendislik taşı yüzeyine uygulayabilmektedir. Ancak güncel pazar analizleri, bu yöntemlerin sınırlı bir estetik çeşitlilik sunduğunu ve sektörün sürdürülebilir rekabet için daha yenilikçi tasarım çözümlerine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, söz konusu proje özgün ve yenilikçi çözümler geliştirmek amacıyla başlatılmıştır. Proje kapsamında robotik üretim teknikleri kullanılarak metalik efektli damar elde edilmesine karar verilmiştir.

2. Malzeme ve Metot

Metalik damar efekti elde edebilmek amacıyla çeşitli fuar ziyaretleri, literatür araştırmaları ve rakip ürün analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda en kapsamlı bilgiye, Cambria Co. LLC'ye ait US 2022/0363600 A1 numaralı *"Metallic Stone Slabs, Systems, and Methods"*[3] patentinde ulaşılmıştır. Söz konusu patentte, metalik efekt görünümü elde etmek için bakır, alüminyum, nikel, paslanmaz çelik ve pirinç gibi malzemelerin kullanıldığı belirtilmektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında, mühendislik taşının kompozisyonuna uyum sağlayabilecek silikat minerallerinden mika ve demir minerallerinden spekülarit seçilerek laboratuvar deneyleri

yapılmıştır. Parlatma işlemleri sonrasında, mika içeren taş numunesinde parlama gözlenmemiş, spekülarit içeren numunede ise parlama oluşmasına rağmen istenilen metalik görünüm elde edilememiştir.

Metalik görünümü arttırabilmek için farklı boyutlarda metal ve alaşım araştırmaları yapılmıştır. %99,7 saflıkta 250 µm boyutunda çinko tozu ve 75 µm boyutunda çinko tozu; %99,9 saflıkta 300 µm boyutunda bakır tozu ve 160 µm boyutunda bakır tozu; 100 µm boyutunda silikon metal, 45 µm boyutunda %85 bakır+%15 çinko içeren pirinç alaşımı; 160 µm boyutunda %63 bakır + %37 çinko içeren pirinç alaşımı; 100 µm boyutunda %90 bakır + %10 kalay içeren bronz alaşımı temin edilmiştir.

Çinko tozu (250 µm) ile yapılan numunede parlatma sonrası damar bölgelerinde parlama gözlenmiş, ancak numuneler ortam havasına maruz kaldığında kısa sürede oksidasyona uğramıştır. Çinko tozu (75 µm) ile yapılan numunede daha küçük tane boyutu nedeniyle parlama miktarı azalmış, ayrıca yüzeyde oksidasyon tespit edilmiştir. Bakır tozu (300 µm ve 160 µm) ile yapılan numunede parlatma sonrası özellikle damar bölgelerinde parlama elde edilmiş, ancak hava ile temas sonucu oksidasyon meydana gelmiş ve yeşilimsi renklenme oluşmuştur. Bronz alaşımı (100 µm) ile yapılan numunede parlatma sonrası parlama gözlenmiş, oksidasyona bakır ve çinkoya kıyasla daha dayanıklı bulunmuştur. Bununla birlikte, zamanla oksitlenme sonucu parlama etkisini kaybederek matlaşmıştır. Silikon metali (100 µm) ile yapılan numunede parlatma sonrası damar bölgelerinde parlama gözlenmiş, istenilen gümüş efekti elde edilmiş ve oksidasyona uğramadığı tespit edilmiştir. Pirinç alaşımları (45 µm ve 160 µm) ile yapılan numunede Parlatma sonrası damar bölgelerinde parlama gözlenmiş, istenilen altın efekti elde edilmiş ve oksidasyon oluşmamıştır.

Tablo 1. Metalik damar efekti için kullanılan malzemeler ve gözlenen etkiler

Malzeme	Tane Boyutu (µm)	Kompozisyon	Gözlenen Etki
Çinko Tozu	250	Zn (%99,7)	Parlama var, oksidasyon var
Çinko Tozu	75	Zn (%99,7)	Daha az parlama var, oksidasyon var
Bakır Tozu	300	Cu (%99,9)	Parlama var, oksidasyon sonrası yeşil renklenme
Bakır Tozu	160	Cu (%99,9)	Parlama var, oksidasyon sonrası yeşil renklenme
Bronz Alaşımı	100	Cu (%90) + Sn (%10)	Parlama var, oksidasyona daha dayanıklı, zamanla matlaşma
Silikon Metali	100	Si (%100)	Parlak damarlar, gümüş efekti, oksidasyon yok
Pirinç Alaşımı	45	Cu (%85) + Zn (%15)	Parlak damarlar, altın efekti, oksidasyon yok
Pirinç Alaşımı	160	Cu (%63) + Zn (%37)	Parlak damarlar, altın efekti, oksidasyon yok

Metalik efektin elde edilmesinde en başarılı sonuçlar, silikon metal ve pirinç alaşımlarının kullanımıyla sağlanmıştır. Ancak mühendislik taşlarının en yaygın kullanım alanı mutfak tezgâhları olduğundan, bu malzemelerin kimyasal dirençlerinin değerlendirilmesi kritik önem

taşımaktadır. Bu doğrultuda, EN 15388[4] standardı kapsamında mutfak tezgâhı olarak değerlendirilen mühendislik taşı numunelerinde, silikon metal ve pirinç alaşımı içeren örnekler hazırlanmış ve bu numunelerin kimyasal dirençleri EN 14617-10'da[5] tanımlanan yöntemler esas alınarak asit ve baz çözeltileri ile test edilmiştir.

Asit testi için hacimce %50 oranında %37'lik hidroklorik asit (HCl) çözeltisi, baz testi için ise hacimce %50 oranında 1N sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi hazırlanmıştır. Testlerde özellikle damar bölgeleri hedef alınmış ve çözeltiler doğrudan bu yüzeylere uygulanmıştır. Deneyler sonucunda hem silikon metalin hem de pirinç alaşımının asidik ve bazik ortamlarda parlaklığını kaybederek matlaştığı ve kimyasal etkilere dayanıklı olmadığı belirlenmiştir.

Bu bulgular doğrultusunda yöntemde değişikliğe gidilmiş ve metal alaşımların yüzey ile doğrudan temasını kesmek amacıyla şeffaf reçine ile kaplama yöntemleri test edilmiştir. Denemelerde, A ve B kodlu tek komponentli termoplastik akrilik reçineler, C (4:1) ve D (3:1) kodlu çift komponentli termoset akrilik reçineler, sertleştirici olarak E kodlu ürün, F kodlu epoksi reçine (2:1) kullanılmıştır.

Deney prosedüründe, polyester esaslı baz hamur kalıba yerleştirildikten sonra damar bölgeleri oluşturulmuş, bu bölgelere belirli miktarlarda pirinç alaşımı veya silikon metal eklenmiş ve ardından damarlar ilgili reçine ile kapatılmıştır. Ancak bu yöntemle istenilen metalik parlama elde edilememiştir. Özellikle F kodlu epoksi reçine ile yapılan denemelerde kürlenme süresinin çok uzun olduğu, bu nedenle endüstriyel prosesler için uygun olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, şeffaf reçine uygulanması durumunda hem pirinç hem de silikon metal alaşımlarının parlama etkisini kaybettiği gözlenmiştir.

Tablo 2. Kaplama yöntemleri ve deney sonuçları

Numune İçeriği	Kaplama Yöntemi	Gözlenen Etki
Silikon Metal	Kaplamasız	Asit/baz ortamında parlaklığını kaybetti, matlaştı
Pirinç Alaşımı	Kaplamasız	Asit/baz ortamında parlaklığını kaybetti, matlaştı
Silikon Metal + Reçine (A, B)	Tek komponentli akrilik reçine (A, B)	Parlaklık kayboldu, istenilen etki sağlanamadı
Silikon Metal + Reçine (C, D + E)	Çift komponentli akrilik reçine (C, D) + Sertleştirici (E)	Parlaklık kayboldu, kürleme sonrası başarı sağlanamadı
Pirinç Alaşımı + Reçine (A, B)	Tek komponentli akrilik reçine (A, B)	Parlaklık kayboldu, istenilen etki sağlanamadı
Pirinç Alaşımı + Reçine (C, D + E)	Çift komponentli akrilik reçine (C, D) + Sertleştirici (E)	Parlaklık kayboldu, kürleme sonrası başarı sağlanamadı
Silikon Metal + Reçine (F)	Epoksi reçine (F)	Kürlenme süresi çok uzun, prosese uygun değil
Pirinç Alaşımı + Reçine (F)	Epoksi reçine (F)	Kürlenme süresi çok uzun, parlama kayboldu

Proje sürecinde farklı bir firmaya ait metalik efekt içeren mühendislik taşı numunelerine ulaşılmış ve bu numuneler asit-baz testine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda bu firmanın ürünlerinin de asit ve baz ortamlarına karşı dayanım göstermediği belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, altın efekti için pirinç alaşımı, gümüş efekti için ise silikon metal kullanılarak üretim denemelerinin yapılmasına karar verilmiştir.

Denemeler kapsamında bilgisayar destekli çizim yazılımı olan Rhinoceros 5 kullanılarak farklı damar haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar doğrultusunda düz damar, sarmal damar ve paralel damar desenleri tasarlanmış; her bir desen için 4 g/m, 6 g/m, 8 g/m ve 15 g/m miktarlarında pirinç alaşımı ve silikon metal kullanılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, pirinç alaşımı ile yapılan denemelerde en iyi performansın 4 g/m miktarında elde edildiği, silikon metal ile yapılan denemelerde ise optimum sonucun 8 g/m miktarında sağlandığı belirlenmiştir. Damar çeşitliliği açısından değerlendirildiğinde, düz çizgi damar desenlerinde görünürlüğün düşük kaldığı, sarmal ve paralel damar desenlerinde ise görünürlüğün belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sarmal ve paralel damarlarda pirinç alaşımı ve silikon metalin bazı bölgelerde öbeklenme eğilimi gösterdiği, parlatma işlemi sonrasında bu noktalarda ışık kırılmalarının daha güçlü ve dikkat çekici hale geldiği tespit edilmiştir.

Efekt solmasının önüne geçebilmek amacıyla alternatif yöntemler araştırılmış ve parıltı efektini sağlayabilecek sim türleri üzerinde laboratuvar denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, iki farklı tedarikçiden (P ve R) üç farklı tane boyutunda (5", 8" ve 11") sim numunesi temin edilmiştir. Deney tasarımı, tedarikçi ve tane boyutu değişkenlerine göre planlanmıştır.

İlk aşamada P5–R5, P8–R8 ve P11–R11 numuneleri karşılaştırılmıştır. Tedarikçiler arasında renk tonunda farklılıklar gözlemlenmiş, ancak efekt açısından belirgin bir fark tespit edilmemiştir. Tane boyutuna göre yapılan değerlendirmelerde 5" boyutundaki simlerle hazırlanan numunelerde parıltı etkisinin zayıf olduğu görülmüştür. 8" ve 11" boyutlarında ise ışıltı etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Bununla birlikte 11" boyutundaki simlerin taneciklerinin çok belirginleştiği ve istenilen yumuşak görünümü sağlamadığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, farklı tasarım anlayışlarına göre farklı boyutların tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Tablo 3. Farklı tane boyutlarında sim denemeleri

Tane Boyutu (inç)	Gözlemler	Sonuç
5"	Parıltı etkisi zayıf	Efekt yetersiz
8"	Parıltı etkisi belirgin	Uygun
11"	Işıltı güçlü ancak tanecikler çok belirgin	Yumuşak görünüm sağlanamadı

Sim denemelerinde, malzemenin hafifliği ve elektrostatik yapısı nedeniyle dozajlama ve yüzeye homojen uygulama sırasında zorluklarla karşılaşılmıştır. Bu sorunun aşılması ve daha stabil bir akış sağlanması amacıyla sim ve kuvars karışımları hazırlanmıştır. Sim/kuvars oranları sırasıyla 5/95, 10/90, 15/85, 20/80 ve 50/50 olarak belirlenmiş, karışımlar cam baget yardımıyla homojenize edilmiştir. Uygulama yüzeyine her bir karışımdan 20 g tartılarak eşit genişlikte alanlara uygulanmıştır.

Tablo 4. Sim–kuvars karışım oranları ve yüzey özellikleri

Sim/Kuvars Oranı	Gözlemler	Sonuç
5/95	Parıltı çok az, yüzeyde kuruluk	Olumsuz
10/90	Parıltı düşük, yüzeyde kuruluk	Olumsuz
15/85	Parıltı belirginleşti, yüzey kuruluğu azaldı	Kısmen uygun
20/80	Parıltı belirgin, yüzey kuruluğu yok	Optimum oran
50/50	Simlerin büyük kısmı kuvars ile bağlanmadı	Olumsuz

Denemeler sonucunda, 5/95 ve 10/90 oranlarında parıltı efektinin oldukça düşük kaldığı ve yüzeyde kuruluk oluştuğu gözlenmiştir. 15/85 ve 20/80 oranlarında efekt belirginleşmiş, yüzey kuruluğu azalmıştır. 50/50 oranında ise simlerin büyük kısmının kuvars ile bağlanmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre optimum karışım oranı 20/80 olarak belirlenmiştir.

Optimum oranla hazırlanan karışım üretim denemelerine uygulanmış ve istenilen efekt elde edilmiştir. Robot teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalarda herhangi bir zorluk yaşanmamış, karışımın akışı stabil bulunmuştur. Üretilen deneme plakalarında yüzey kuruluğuna rastlanmamıştır. Uygun numuneler kesilerek daha önce kullanılan yöntemle kimyasal dayanım testleri uygulanmıştır. Referans numune ile karşılaştırıldığında efektte solma meydana gelmemiş, yüzey parlaklığında ise yalnızca referans numuneye benzer düzeyde bir kayıp gözlenmiştir. TS EN 14617-10 standardında yer alan prosedürlere göre yapılan testlerde kimyasal dayanım sınıfı C4 olarak belirlenmiştir.

Denemelerin başarılı sonuç vermesi üzerine, sim katkılı yeni tasarımlar geliştirilmiş ve robot teknolojisi kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Üretimde 20/80 oranında sim-kuvars karışımı kullanılmış, 50 plaka üretimi planlanmış ve %82 kalite oranı elde edilmiştir. Başarılı bu denemenin ardından yeni tasarımların geliştirilmesine yönelik çalışmalara devam edilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar

Yapılan deneysel çalışmalar, mühendislik taşlarında kararlı ve dayanıklı bir metalik efekt elde etmenin; kullanılan efekt malzemesi türü, tane boyutu ve koruyucu yöntemlerin dikkatli bir şekilde seçilmesini gerektirdiğini göstermiştir. Çinko, bakır ve bronz ile yapılan ilk denemelerde geçici bir metalik parlaklık elde edilmiş olsa da yüzey oksidasyonu uzun vadeli görsel kararlılığı önemli ölçüde azaltmıştır. Test edilen malzemeler arasında silikon metali gümüş benzeri bir efekt, pirinç alaşımları ise altın benzeri bir efekt sağlamıştır; ancak her ikisi de EN 14617-10 standardında yer alan prosedürlere göre yapılan asit–baz dayanım testlerinde kimyasal olarak kararsız bulunmuş ve parlaklıklarını yitirmiştir. Metal dolguların dayanımını artırmak amacıyla farklı akrilik ve epoksi reçine sistemleriyle kaplama denemeleri yapılmış, ancak bu yöntemlerde ya metalik parlaklık kaybolmuş ya da üretim sürecine uyumsuzluk gözlenmiştir.

Buna paralel olarak, dekoratif simlerle yapılan deneyler, ciddi oksidasyon sorunları olmadan istenilen parıltı efektini sağlamak için alternatif bir yol sunmuştur. Farklı üreticilerden ve farklı tane boyutlarında temin edilen simler karşılaştırıldığında, orta boyutlu (8'') simlerin parlaklık ve yüzey homojenliği açısından en iyi sonucu verdiği; küçük boyutlu (5'') simlerin yetersiz efekt

sağladığı, büyük boyutlu (11'') simlerin ise istenmeyen kaba bir görünüm oluşturduğu tespit edilmiştir. Simlerin hafifliği ve elektrostatik özelliklerinden kaynaklanan dozajlama ve uygulama sorunlarını gidermek için sim–kuvars karışımları denenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda %20 sim–%80 kuvars oranı optimum bulunmuş; bu karışım, homojen dağılım, robotik uygulama sırasında stabil akış ve yüzeyde kuruluk olmadan güçlü bir görsel efekt sağlamıştır. Ayrıca, optimize edilmiş karışımı içeren numunelerde gerçekleştirilen kimyasal dayanım testlerinde efekt kaybı gözlenmemiş ve EN 14617-10 standardına göre C4 dayanım sınıfı elde edilmiştir. Pilot ölçekli üretim denemeleri de yöntemin uygulanabilirliğini doğrulamış ve sim bazlı tasarımlarda %82 A kalite oranına ulaşılmıştır. Bu metot ile 14 adet yeni tasarım gerçekleştirilip Lotte Chemical ürün portföyüne eklenmiştir.

Bu bulgular, oksidasyon ve kimyasal bozunmaya karşı hassasiyetleri nedeniyle geleneksel metal tozlarının sınırlılıklarını ortaya koyarken, sim–kuvars karışımlarının mühendislik taşlarında kalıcı ve estetik bir metalik efekt sağlamak için güçlü ve uygulanabilir bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Patentler: Çalışmaya ilişkin patent yoktur.

Teşekkürler: Herhangi bir finansman sağlanmamıştır.

Referanslar:

1. Toncelli, M. (1987). *Process for the formation of blocks of any material by means of the contemporaneous action of vibrations, compression and vacuum intended for cutting into slabs and apparatus adapted to carry out the said process* (U.S. Patent No. US 4,698,010 A). U.S. Patent and Trademark Office.
2. Santos, J. P. L., Rosa, L. G., & Amaral, P. M. (2011). Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones. *Construction and Building Materials, 25*(1), 171–174.
3. Cambria Co. LLC. (2022). *Metallic stone slabs, systems, and methods* (US patent publication No. US 2022/0363600 A1). U.S. Patent and Trademark Office.
4. European Committee for Standardization (CEN). (2020). *EN 15388: Agglomerated stone — Slabs and cut-to-size products for vanity and kitchen tops*. Brussels: CEN.
5. European Committee for Standardization (CEN). (2012). *EN 14617-10: Agglomerated stone — Test methods — Part 10: Determination of chemical resistance*. Brussels: CEN

MÜHENDİSLİK TAŞI PARLATMA ATIKLARININ ALTERNATİF HAMMADDE OLARAK YENİDEN KULLANILMASI

AYŞE GÜL TUNCER BAŞOĞLU [*1], HAKAN ÖMÜR [1], NURCAN TOPÇU[1], OYA ÜSKÜP KORCAN[1]

[1,]Lotte Chemical Turkey Yüzey Tasarımları, Research and Development Department, Manisa, TÜRKİYE.

Özet

Bu çalışmada, mühendislik taşı üretimindeki cilalama hattından çıkan atıkların farklı endüstriyel sektörlerde alternatif hammadde olarak değerlendirilmesiyle yenilikçi bir atık yönetimi yaklaşımı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Parlatma atığının diğer endüstriyel proseslerde yeniden kullanıma uygunluğunu değerlendirmek için TG-DTA, XRF, XRD, helyum piknometresi, Eluat, partikül boyut dağılım analizleri ve SEM görüntülemesi yapılmıştır. Sonuçlar, atığın %62 inorganik madde (%98,8 SiO_2), %30 nem ve %8 organik madde içerdiğini, ağır metal içeriğinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ve bu nedenle tehlikesiz atık olarak sınıflandırıldığını göstermektedir.

Atık malzemenin yüksek silisyum dioksit (SiO_2) içeriği, tuğla ve çimento üretimi gibi silika gerektiren endüstriyel süreçlerde etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bu proje ile parlatma atıklarını yeni üretim döngülerine entegre ederek bertaraf maliyetlerini düşürmeyi ve çevresel etkiyi en aza indirerek atık yönetimini sürdürülebilir geri kazanım modeline dönüştürülmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelime: Mühendislik taşı parlatma atığı, Kuvars yüzey atığı, Endüstriyel yan ürünlerin yeniden kullanımı, Geri dönüşüm, Sürdürülebilir atık yönetimi

1. Giriş

Mühendislik taşı, diğer bir deyişle kuvars yüzeyler, genellikle mutfak tezgâhı, yer ve duvar kaplaması olarak kullanılan, mekanik özellikleri yüksek, su emmeyen, kolay temizlenebilen bir yapı malzemesidir. İçeriği yaklaşık %90-94 oranında doğal kuvars ve diğer mineralleri içeren polimerik matris kompozitlerdir [1]. Kompoze taşlarda kuvars taneleri arasındaki boşluk reçine ve dolgu malzemesi ile doldurularak kürlendirilir. Kürlendirilen plakalar parlatma hattında aşındırıcı elmaslar ve su yardımıyla parlatılır [2]. Parlatma işlemi sonucunda yüzeyden uzaklaşan malzeme suyla birleşerek parlatma atığını meydana getirir; bu atıklar, literatürde belirtildiği üzere, taş tozu ve sudan oluşan çamur formundaki atıklar ile blok, moloz veya kırık levha gibi katı atıklar olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir [3]. Bu çamur formundaki fazla sulu atık filtrepresler yardımıyla fazla suyu alınarak su, tekrar sisteme geri beslenmektedir. Kalan kek parlatma atığını oluşturmaktadır. Bu tür artıklar tehlikesiz atık olarak sınıflandırılmakta ve çoğunlukla düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Atıkların artışını önlemek için yeniden kullanım ve geri dönüşüm gibi alternatif yöntemlerin uygulanması önem taşımaktadır.

Parlatma atığının farklı yerlerde alternatif hammadde olarak kullanılabilirliği ile alakalı çalışmalar mevcuttur. Elyaf takviyeli çimento matrisli kompozit levhaların üretiminde mermer atığının

kullanılmasının yüksek mekanik özellik sağladığı bulunmuştur [4]. Mermer atık çamurunun kimyasal, fiziksel, mineralojik ve morfolojik analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler piyasadaki mikronize kalsit ($CaCO_3$) özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar farklı endüstrilerde alternatif hammadde olarak kullanılabileceğini göstermiştir [5]. Başka bir çalışmada mermer atık tozlarının beton harcında mineral katkısı olarak kum muadili olabileceği gösterilmiştir [6]. Bir diğer çalışmada kurutulmuş atık mikronize mermer tozları doğal kauçuk kompozit formülünde farklı oranlarda karıştırılarak mekanik özellikleri geliştirilmiştir [7]. Granit ve mermer taş işletmelerinden temin edilen atık taş çamuru vakum altında titreşimli sıkıştırma yöntemi ile yapay taş üretmek için kullanılabileceği belirtilmiştir [8]. Bir diğer çalışmada da, beton kaldırım taşı üretiminde çimento ve kumun kısmen yerine kullanılmak üzere seramik tezgah parlatma atığının değerlendirilmesini incelemektedir [9].

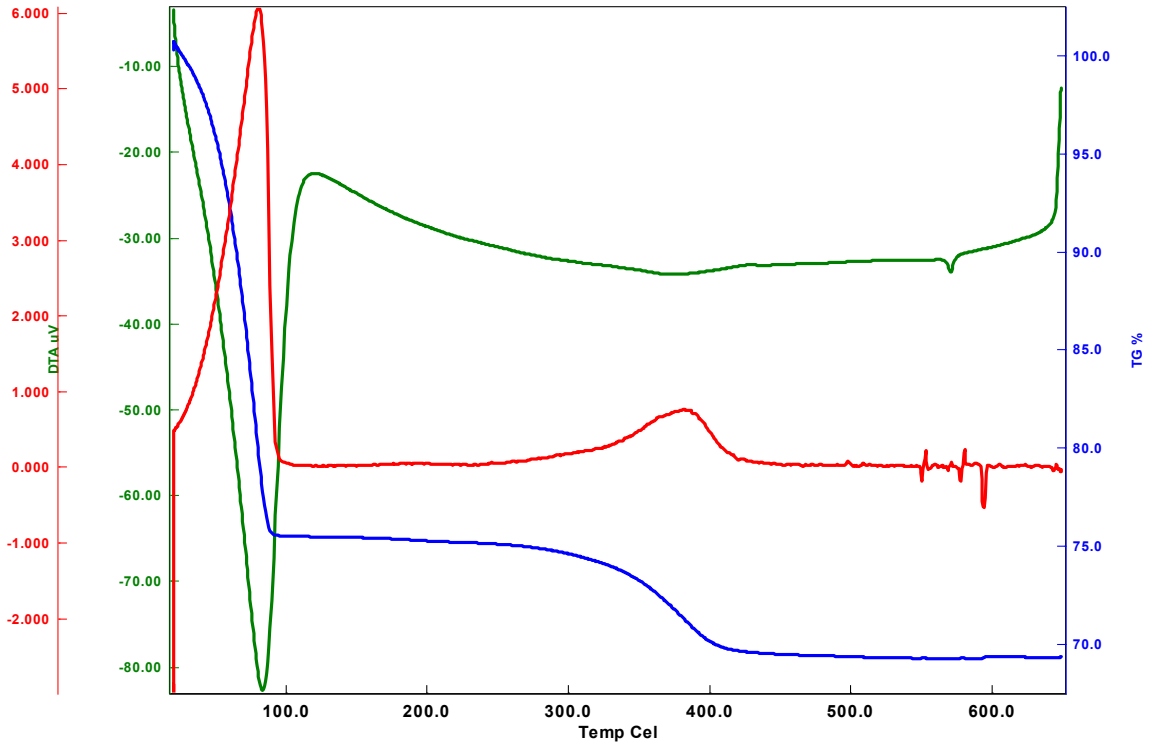
Bunlar genellikle doğal taş madenlerinin işleme atıkları, yapay taş kırıkları, diğer inorganik malzemelerin atıklarının kullanılmasına yönelik çalışmalar olmasına rağmen, doğrudan mühendislik taşı yüzey atıklarının değerlendirilmesine yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Köpük beton, derz dolgu, tuğla, kiremit, sıvı yapı kimyasalları, mermerit, beton, kauçuk, sodyum silikat, çimento, seramik ve cam sektörleri, silika içerikli hammaddeleri kullanabilecek bazı sektörlerdir. Bu çalışmada özellikle parlatma atığının karekterizasyonu yapılıp çimento ve tuğla sektörlerinde kullanılabilirliliği değerlendirilmiştir. Çimento ve tuğla sektörlerinde denemeleri yapılmış parlatma atıklarının hem alternatif hammadde olarak kullanılması yenilikçi bir çözüm olacak hem de atık olarak doğaya terk edilen kuvars kaynağının ekolojik olarak değerlendirilmesi örnek bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

2. Malzeme ve Metot

Bu çalışmada, filtrepres çıkışından alınan parlatma atığının fiziksel, kimyasal, mineralojik ve çevresel özelliklerini karakterize etmek amacıyla kapsamlı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Nem miktarı, organik ve inorganik madde içeriği, tane boyut analizi, gerçek ve yığın yoğunluğu ölçülmüştür. Öncelikle nem, organik ve inorganik içeriğini belirlemek için TG-DTA (Termogravimetrik-Diferansiyel Termal Analiz) analizi, Celal Bayar Üniversitesi-DEFAM tarafından yapılmıştır. Bu analiz sonucu Şekil 1'de gösterilmektedir.



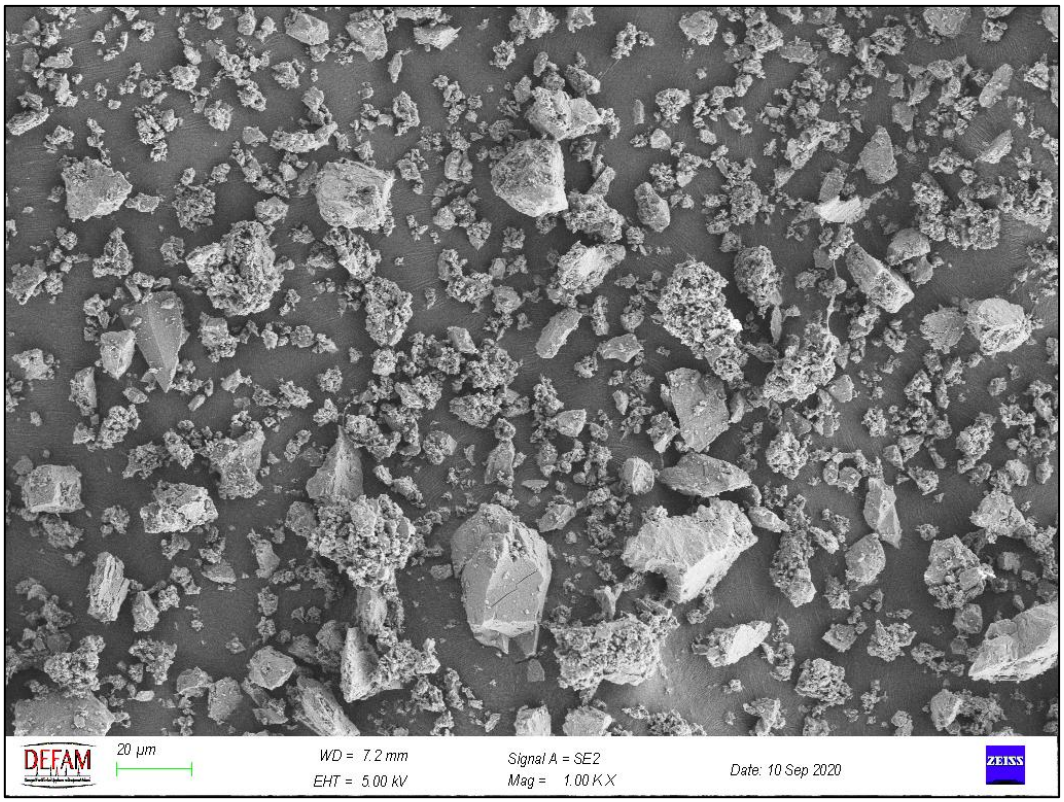
Şekil 1. Parlatma hattı atığın TG/DTA analizi sonucu

Şekil 1'de TG garfiğine göre 100°C'ye kadar olan ağırlık kaybının (ağırlıkça %24) atık bünyesinde bulunan nem miktarı olduğu söylenebilir. 280-410°C arasında ikinci bir ağırlık kaybı görülmektedir. Yaklaşık %7'lik ağırlık kaybının atık bünyesindeki polyester reçine miktarı olduğu düşünülmektedir. Analiz sonucunda geriye kalan kütle miktarı yaklaşık %69 olarak gerçekleşmiştir. DTA eğrisinde ise 570°C'deki pik kuvarsın alfa-beta faz dönüşümü ile ilgili olabilir. Bu sonuçlara göre numunenin 100°C'de nemini kaybettiği ve 550°C'de ise organik madde içeriğini kaybettiği tespit edilmiştir.

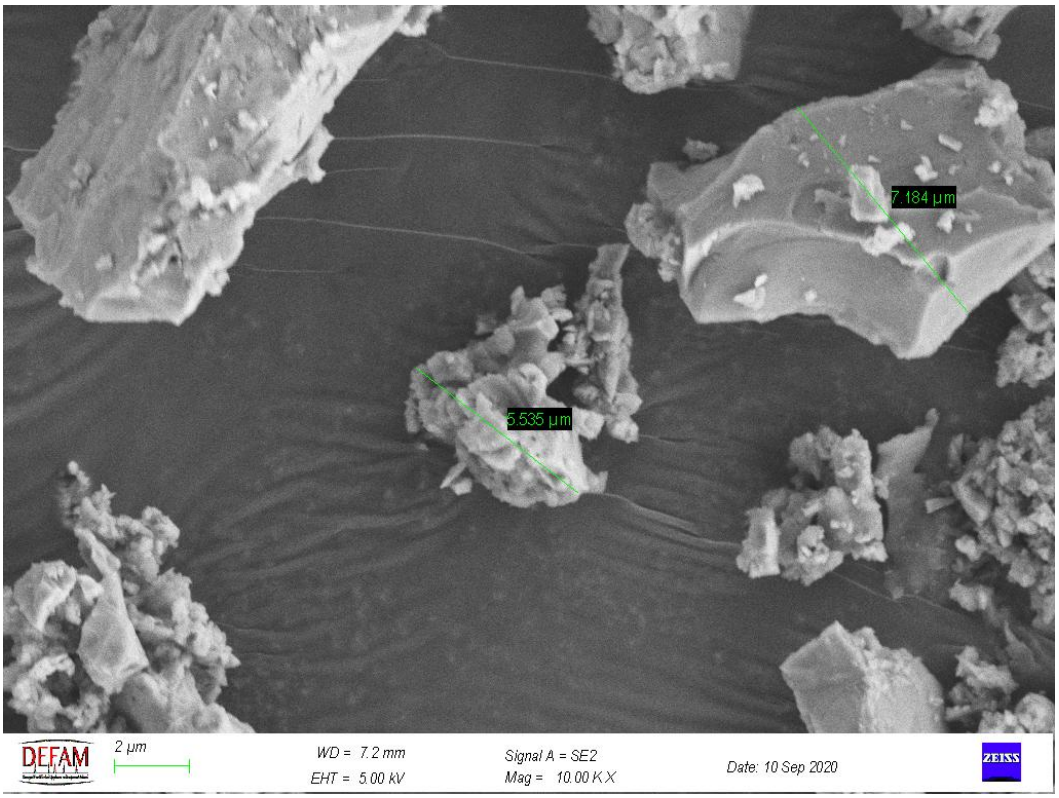
100°C sıcaklıkta etüv (Ovenlab) içinde, 100'er gr olarak 5 farklı bölgeden alınmış olan ıslak atık numuneleri 90 dakika süre boyunca kurutulmuştur. Nem yüzdesi ağırlıkça %30 olarak tespit edilmiştir. Kurutulmuş numuneler ise 50'şer gr olarak 3 farklı kroze içinde, TG/DTA analiz sonucundan ortaya çıkan 550°C sıcaklıkta kül fırını (Nüve furnace MF 110) içinde 2 saat boyunca bekletilmiştir. 2 saat sonunda uzaklaşan organik madde miktarı kütle farkından hesaplanarak ortalaması alınmıştır. Bu sonuçlara göre de organik madde içeriği %8 iken inorganik madde içeriği %62'dir. Geriye kalan %30'u sudur.

Retsch AS 200 elek cihazı kullanılarak tane boyut dağılım analizi yapılmıştır. Tane boyut dağılımının %66,1'i 106 µm altında %33,9'u 106 µm üstündedir. 106 µm altında kalan kısmın tane boyutu Malvern mastersizer hydro2000 cihazı ile ölçülmüş olup d90'ı 89, d50'si 24 ve d10'u 3 µm'dur.

Nemi uzaklaştırılmış parlatma atıklarının morfolojik yapısının incelenmesi ve tane boyutu dağılımını görselleştirmek için taramalı elektron mikroskobu üzerinden görüntüleri alınmıştır. Bu analiz Celal Bayar Üniversitesi DEFAM tarafından yapılmıştır. Tane dağılımının iri ve ince partiküllerden oluşan geniş bir dağılıma sahip olduğu Şekil 2 ve 3'te görülmektedir.



Şekil 2. Parlatma atıklarının 1000x büyütmedeki SEM görseli



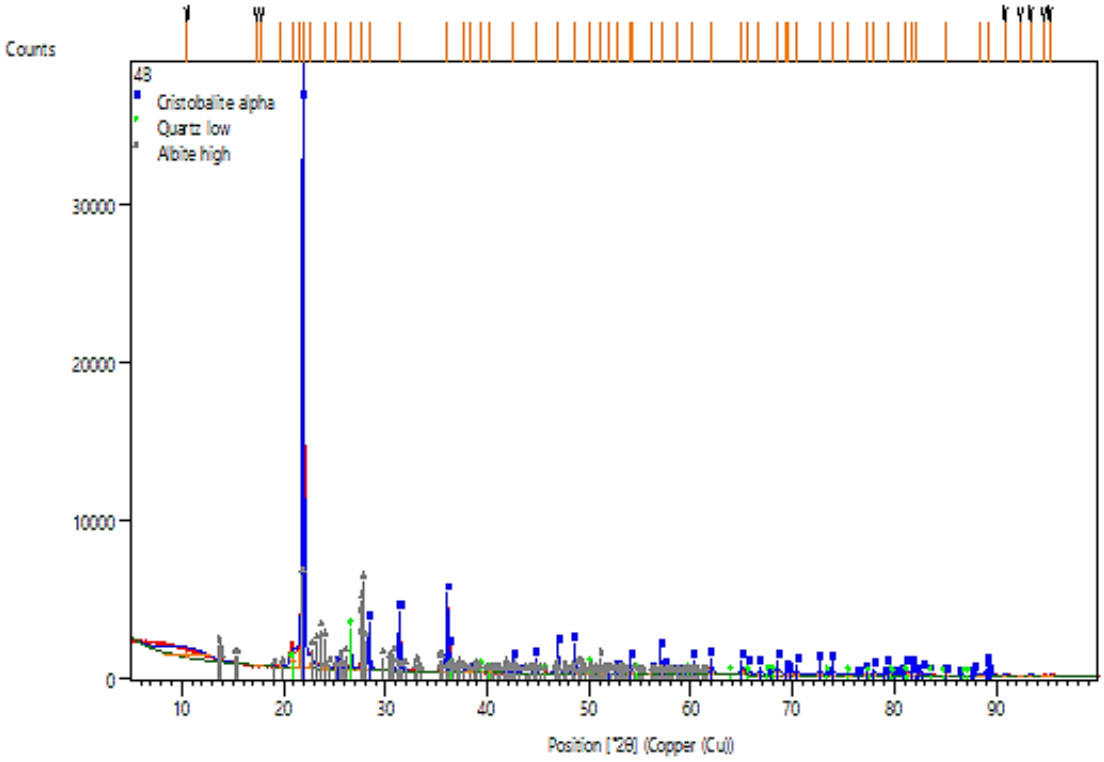
Şekil 3. Parlatma atıklarının 10000x büyütmedeki SEM görseli

Yaş atık ile nemi uzaklaştırılmış atığın yığın yoğunluğu ölçülmüş, ayrıca nemi uzaklaştırılmış atığın gerçek yoğunluğu da belirlenmiştir. Nemi uzaklaştırılmış numunenin gerçek yoğunluğu, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı tarafından helyum piknometresi kullanılarak 2,105 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. Yaş atığın yığın yoğunluğu 1,5 g/cm³, nemi uzaklaştırılmış atığın yığın yoğunluğu ise 0,917 g/cm³ olarak ölçülmüştür.
Atık numunesinin kimyasal ve mineralojik içeriğini belirlemek amacıyla analizler yapılmıştır. Nemi uzaklaştırılmış numune üzerinde yapılan XRF analizi (ODTÜ Merkezi Laboratuvarı) sonucunda Tablo 1'de de görüldüğü gibi atığın ağırlıkça %98,8'i silisyum dioksit içerdiği, kalan kısım da diğer oksitleri içerdiği görülmektedir.

Tablo 1. XRF analizi sonuçları

Bileşik	**Ağırlıkça %**
SiO_2	98,787
Al_2O_3	0,608
TiO_2	0,112
Na_2O	0,218
Fe_2O_3	0,054
CaO	0,136
K_2O	0,048
SO_3	0,014
Cl	0,009
ZrO_2	0,007
Co_2O_3	0,007

Ayrıca, XRD analizi (İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi) ile parlatma atıklarının kristal yapısı belirlenmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi silisyum dioksit bileşiğine ait kuvars, kristobalit fazları ile az miktarda albit fazı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Parlatma atığının XRD pattern grafiği

Parlatma atığının kimyasal özelliklerini belirlemek için Eluate testi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü tarafından gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'deki analiz sonuçlarına göre, atık numunelerdeki ağır metal içerikleri sınır değerlerin altında bulunmuştur. Bu doğrultuda, söz konusu atık numuneler "tehlikeli olmayan atık" sınıfında değerlendirilmektedir.

Tablo 2. Eluate test sonuçları

Parametre	Ölçülen Konsantrasyon	ADDDY* Ek 2B/C Sınır Değerleri	
		Ek 2B	Ek 2C
Arsenik (As)	<0,01 mg/L	0,2 mg/L	2,5 mg/L
Baryum (Ba)	0,048 mg/L	10 mg/L	30 mg/L
Kadmiyum (Cd)	<0,01mg/L	0,1 mg/L	0,5 mg/L
Toplam Krom (Cr)	0,012 mg/L	1 mg/L	7 mg/L
Bakır (Cu)	0,022 mg/L	5 mg/L	10 mg/L
Civa (Hg)	<0,01 mg/L	0,02 mg/L	0,2 mg/L
Molibden (Mo)	<0,01 mg/L	1 mg/L	3 mg/L
Nikel (Ni)	0,152 mg/L	1 mg/L	4 mg/L
Kurşun (Pb)	<0,01 mg/L	1 mg/L	5 mg/L
Antimon (Sb)	<0,01 mg/L	0,07 mg/L	0,5 mg/L
Selenyum (Se)	<0,01 mg/L	0,05 mg/L	0,7 mg/L
Çinko (Zn)	<0,01 mg/L	5 mg/L	20 mg/L
Klor (Cl)	55 mg/L	1500 mg/L	2500 mg/L
Florür (F)	0,88 mg/L	15 mg/L	50 mg/L
Sülfat (SO4)	114 mg/L	2000 mg/L	5000 mg/L
Çözünmüş Organik Karbon (DOC)	13,9 mg/L	80 mg/L	100 mg/L
Toplam Çözünmüş Katı Madde (TDS)	390 mg/L	6000 mg/L	10000 mg/L
Toplam Organik Karbon (TOC)	%4,68	%5	%6
pH	7,76	>6	>6

3. Sonuçlar ve Tartışma

Yapılan analizler sonucunda Eluate testi sonuçlarına göre parlatma atıkları "tehlikeli olmayan" sınıfında değerlendirilmiştir. Bu durum, literatürde farklı taş atıkları için yapılan çalışmalar [5,8,9] ile benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla çevresel açıdan herhangi bir risk oluşturmadan kullanılabileceği doğrulanmıştır.

Bilindiği üzere çimentonun temel hammaddeleri klinker ve kil olup, üretim sürecinde demir cevheri, boksit ve kum gibi yardımcı malzemeler de kullanılmaktadır. Bu kapsamda, klinker üretiminde ihtiyaç duyulan kumun (silika kaynağı) parlatma atıkları ile karşılanabileceği düşünülmüştür. Nitekim parlatma atıklarının %30'u su iken %62'si inorganik malzemelerden oluşmakta olup, yapılan kimyasal analizler bu inorganik kısmın büyük oranda (%98,8) silisyum dioksit (SiO_2) içerdiğini ortaya koymuştur. Üretici firmalarla iş birliği içinde yürütülen denemelerde, söz konusu atıkların klinker üretiminde kullanımı denenmiştir. Denemeler sonucunda, parlatma atıklarının klinker üretiminde hammadde olarak değerlendirilebileceği ortaya konmuş ve uygulamaya alınmıştır.

Benzer şekilde, tuğla sektörü için gerçekleştirilen çalışmalarda da üretici firmalarla iş birliği yapılmıştır. Yapılan denemelerde, parlatma atıklarının %5 oranında tuğla hamuruna katılmasının ürünün renk özellikleri ve diğer fiziksel nitelikleri üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, parlatma atıklarının tuğla üretiminde kullanılabilirliği kanıtlanmış ve uygulamaya geçirilmiştir.

Parlatma atıklarının hammadde olarak değerlendirilmesi, bertaraf maliyetlerinin azaltılması ve çevresel faydaların sağlanması adına önemli katkılar sunacaktır. Yüksek oranda kuvars içeren bu atıkların geri kazanılması ve doğaya depolanmasının önlenmesi, sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda kaynakların verimli kullanımı ve daha yeşil bir dünya görüşünün desteklenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

References:

1. Lam Dos Santos, J. P., Rosa, L. G., Amaral, P. M., Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones, Constr Build Mater. 2011, 25(1), 171–174.
2. Tuncer Başoğlu, A.G. (2022). (Yüksek lisans Tezi). Farklı tür ve oranlardaki toz dolgu/reçine kullanımının kompoze taşların mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. YÖK Ulusal Tez Merkezi. 2022, (Tez No. 748465)
3. Marras, G., Careddu, N, Sustainable reuse of marble sludge in tyre mixtures, Resources Policy. 2018, 59, (77–84)
4. Soydan, A.M, Sarı, A., ve Akdeniz, R., Bilecik yöresi mermer atıklarının "Fiber-Sement" üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Dergipark. 2018, 8(2):191-199
5. Marras, G., Bortolussi A., Peretti R., ve Careddu, N., Characterization methodology for re-using marble slurry in industrial applications, Energy Procedia. 2017, 125, (656-665)
6. Corinaldesi, V., Moriconi, G., ve Naik, T.R., Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, Construction and Building Materials. 2010, 24(1):113-117
7. Ahmed, K., Nizami, S.S., Raza, N.Z., ve Mahmood, K., The effect of silica on the properties of marble sludge filled hybrid natural rubber composites, Journal of King Saud University-Science. 2013, 25(4):331-339
8. Barani, K., Esmalli, H., Production of artificial stones labs using waste granite and marble stones sludge samples. Journal of Mining and Environment. 2016, 7(1):135-141
9. Penteado, C.S.G., de Carvalho, E.V., ve Lintz, R. C. C., Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing, Journal of Cleaner Production. 2015, 1-7.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE SHEAR PROPERTIES OF COMPOSITE LAMINATES

AHMET ÇETİN *[1]

[1] Adıyaman University, Engineering Faculty, Mechanical engineering Department, Adıyaman, TURKEY.

Abstract

The present study aims to address the reliable characterization of in-plane shear in carbon/epoxy laminates using the ASTM D7078 V-notched rail configuration. The present study proposes and validates a finite element (FE) model intended to support design-level estimation of the in-plane shear modulus (G_{12}) and localization of shear damage. The model employs S4R shell elements in Abaqus/CAE with a four-ply [0/90/90/0] layup (approximately 0.325 mm per ply), reference-point connectors, and a Static General step with NLgeom enabled. Orthotropic lamina properties were derived for the on-axis laminate (E_1 = 145 GPa, E_2 = 8.32 GPa, ν_{12} = 0.256, G_{12} = 2.90 GPa). For experimental validation, [0/90/90/0] laminates were fabricated by vacuum bagging using 300 g/m² T700/HT (12k) unidirectional reinforcement and MGS L160/LH160 epoxy, then tested under the standard rail-shear setup. The force-displacement response of the FE model replicated the initial slope of the experimental data, with divergence occurring in proximity to the onset of experimental nonlinearity at approximately 600 N. When peak loads were evaluated across a comparable range (approximately 1.2–1.5 kN), the FE model anticipated displacements that were approximately 15–25% lower than the measured values. Field contour plots revealed a distinct shear band across the central strip connecting the V-notch tips, and the predicted fracture locus matched the post-test damage images. The findings of this study suggest that the proposed shell-based model can serve as a direct input for determining G_{12} at small displacements and for accurately localizing shear damage in V-notched rail-shear specimens.

Keyword: Composite laminates, V-notched rail-sliding, Shell finite elements (S4R), Shear modulus,

1. Introduction

The Composite materials are engineering materials obtained by combining at least two different phases that are compatible with each other on a macro scale [1, 2]. They possess high specific strength, rigidity, and designable anisotropy [1, 2]. Within this extensive class of materials, fiber-reinforced composites represent the most widely used subgroup in engineering, owing to their high specific mechanical performance [2]. The combination of the load-carrying capacity of the fibers with the load transfer and environmental resistance of the matrix, results in the attainment of property combinations that would otherwise be unattainable with individual components [1, 2]. This set of properties has extensive application in a variety of fields, including aerospace, automotive, wind energy, and sports equipment [3-6]. The application requirements necessitate the systematic selection of layer orientation of composites (e.g., 0/90/90/0) and material parameters according to target conditions in the design [1, 2].

It is imperative to acknowledge that composite structures are subjected to fundamental loads, including tension, compression, bending, torsion, and impact, under operating conditions [7]. In

multi-axial loading conditions, in-plane and interlaminar stress components develop concomitantly, a situation, which particularly highlights shear components [7]. For instance, in the context of bending, considerable interlaminar shear stresses are known to develop at free edges. Misalignment of displacements in the direction of fibers facilitates load transfer through shear at the interface, thereby determining the threshold for delamination initiation [8, 9]. Consequently, the shear response is pivotal in the initiation and propagation of damage in composites; matrix-dominant behavior, load transfer at the fiber-matrix interface, and interlaminar delamination are directly related to shear stress. The safety factors and life prediction models employed in design are sensitive to parameters such as shear modulus and characteristic shear strength [10]. In laminates exhibiting a symmetrical configuration, such as [0/90/90/0], the transfer of load between different fiber orientations and the accumulation of interfacial stress occur through shear. Consequently, the accurate measurement and modelling of these phenomena are imperative. The estimation of energy absorption and residual load-carrying capacity is contingent upon the realistic capture of shear behavior [11].

However, it should be noted that shear tests are more laborious than tensile/bending tests [12, 13]. This is due to the complexity of the fixtures (Iosipescu, short beam shear, rail-shear), the non-homogeneous nature of the stress field, and the difficulty of measuring deformation [14, 15]. The conditions under which the specimens are held, the specimen tolerances, and the compatibility of the device can all have a significant effect on the results, as a result, the literature contains only a limited number of shear studies [12, 13]. This is particularly evident in the Iosipescu (ASTM D5379) and V-notched rail-shear (ASTM D7078) setups [12, 13, 16, 17]. It has been determined that notch geometry sensitivity, gripping friction, and load axis misalignment produce local stress concentrations, which weaken the "pure shear" assumption. Short beam shear (ASTM D3846) provides nominal interlaminar shear strength (ILSS), although this method results in a combined stress state with bending and interfacial pressure [14, 18]. Consequently, direct comparison of results from different standards is limited. The utilization of 45°-rosette strain gauges, digital image correlation (DIC), or small-range extensometers in deformation measurement necessitates calibration and fixture compatibility adjustments [14, 15]. Furthermore, preparation details such as substrate material and adhesive thickness can also increase scatter. Cumulative uncertainties have been shown to reduce the repeatability of experiments, thus serving to emphasize the importance of validation studies conducted in conjunction with numerical models [12, 13, 16, 17]. Numerical analyses, in particular the Finite Element Method, have been demonstrated to serve as a powerful complementary tool for composites [15-17]. The use of numerical analyses allows for the modelling of anisotropic material definitions and complex layer sequences, the performance of parameter scans at low cost, and the visualization of stress-strain fields in great detail [15-17]. When calibrated with experimental data, they provide rapid predictions in the design space and reduce the number of physical samples required [16, 17].

However, it should be noted that shear experiments are more laborious than tensile or bending tests [19]. This is due to the complexity of the fixtures (Iosipescu, short beam shear, rail-shear), the tendency for the stress field to be non-homogeneous, and the difficulty of strain measurement [20]. The conditions under which the specimens are held, the specimen tolerances, and the compatibility of the device can all have a significant effect on the results; as a result, the literature contains only a limited number of shear studies [19, 21]. The repeatability of results is contingent on the meticulous standardization of fixtures and measurement procedures [19]. Moreover, it is imperative to acknowledge that the "nominal" shear stress definitions yielded by divergent standards and configurations are not directly comparable [22]. The aforementioned limitations render the reliable acquisition of shear modulus and strength values a challenging endeavor, which are indispensable for design applications [23]. Consequently, the prevailing approach entails the

interpretation of experimental findings in conjunction with numerical analyses to collectively address sources of uncertainty [21].

The objective of this study is to ascertain and cross-validate the shear behavior of the [0/90/90/0] symmetric laminate through experimental, and numerical means. Initially, force-displacement curves will be obtained from the experiments. Subsequently, simulations will be conducted under the same loading and boundary conditions as the model established in Abaqus/CAE. The numerical curves will then be directly compared with the experimental curves, and similarity metrics will be reported. The points of agreement and disagreement will be discussed, along with their possible causes (material parameters, contact/boundary conditions, damage initiators). This will allow us to evaluate the reliability of numerical shear analysis in generating design predictions.

2. Materials and Methods

2.1. Production of composite plates

The manufacturing of composite plates was undertaken using the vacuum bagging method, with the objective of achieving a [0/90/90/0] stacking arrangement. The fabrication process incorporated a 300 g/m² unidirectional (UD) carbon fabric (T700/HT, 12k) to provide reinforcement. The fabrics were cut to dimensions of 50 x 40 cm, with a cutting allowance, such that a minimum of five test specimens could be obtained according to the V-notch rail-shear (ASTM D7078) standard [24]. The matrix consisted of MGS L160 epoxy and LH160 hardener, which were mixed in a container at a weight ratio of 100:25 until homogeneous. The mechanical and physical properties of the fiber and matrix are presented in Table 1 [25, 26]. After preliminary preparations, the mold surface was treated with a release agent, and the fabric layers were impregnated with epoxy resin using a squeegee and brush. The perforated release film and breather were then placed on top of the stacked fabrics, and the vacuum bag was closed in order to complete the bagging process (see Figure 1). To prevent leakage, a sealing tape was applied between the mold glass and the bag. The curing process was conducted at ambient temperature and an approximate partial pressure of 1 atm (vacuum) for 24 hours in accordance with the stipulated instructions provided within the matrix system. Following the curing process, the bag was detached and the resulting plates were meticulously cut using a water jet, with particular attention paid to the sensitivity of the V-notch areas. The dimensions of the sample were prepared in accordance with the specifications outlined in ASTM D7078 (see Figure 2) [24].

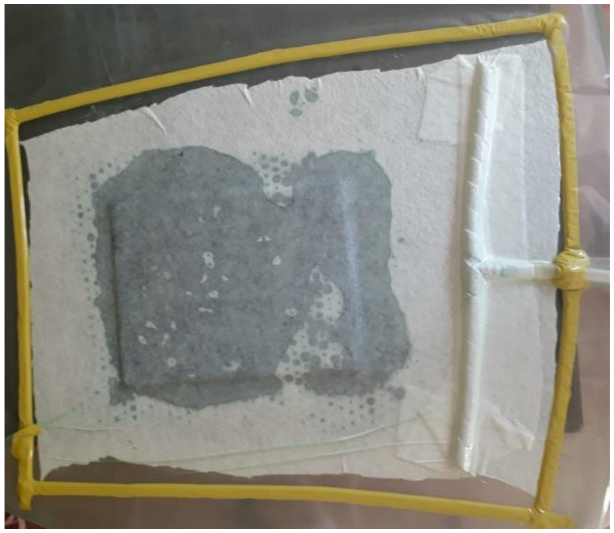


Figure 1. Vacuum bagging setup and layer arrangement

Table 1. Fiber and matrix material properties

Property	Carbon Fiber (T700S)	Epoxy (MGS L160 + LH160)
Density (g/cm³)	1.80	1.18–1.20
Elastic Modulus E (GPa)	230	3.2–3.5
Shear Modulus G (GPa)	≈19–20	≈1.19–1.30
Tensile Strength σt (MPa)	4900	70–80
Compressive Strength σc (MPa)	≈1400*	80–100
Shear Strength τ (MPa)	≈154	≈35

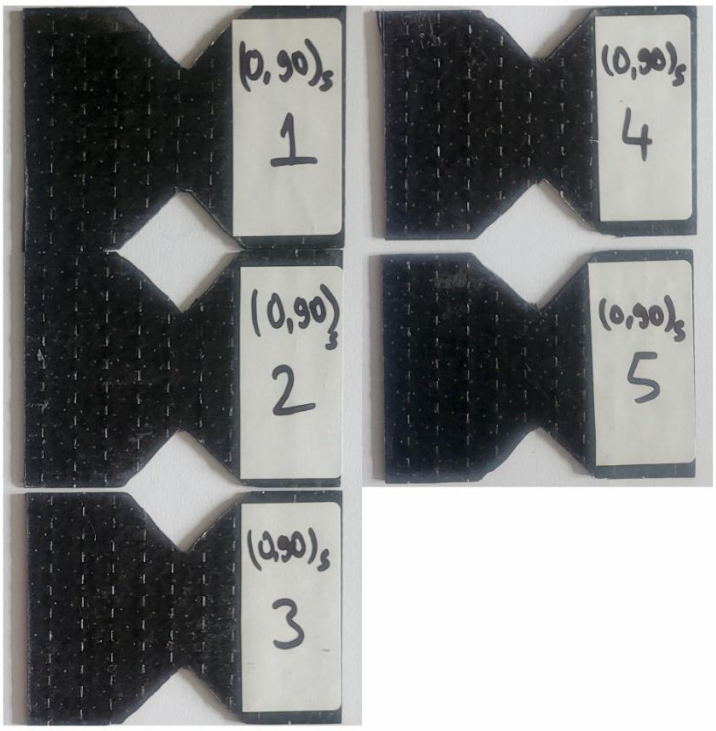


Figure 2. ASTM D7078 V-notched rail-shear test samples

2.2. Shear test and procedure

The shear behavior was examined in accordance with the ASTM D7078 standard [24] using a V-notched rail-shear fixture on an Instron 8801 (10 kN) universal testing machine (see Figure 3). V-notched [0/90/90/0] layered composite specimens were clamped to the rails by surface compression in accordance with the standard, alignment and notch symmetry were checked prior to testing to ensure the repeatability of the fixture-specimen setup. All experiments were conducted within a controlled laboratory environment at ambient temperature. The loading was applied with displacement control, and the machine's load cell and head displacement were recorded simultaneously. Six specimens (n=6) were subjected to rigorous testing for each condition, with the objective of ensuring statistical reliability. After the experiment, load-displacement curves were plotted. The invalidity of tests was determined in instances of open-jaw slip, substantial axial misalignment, or fracture initiation outside the gauge region.

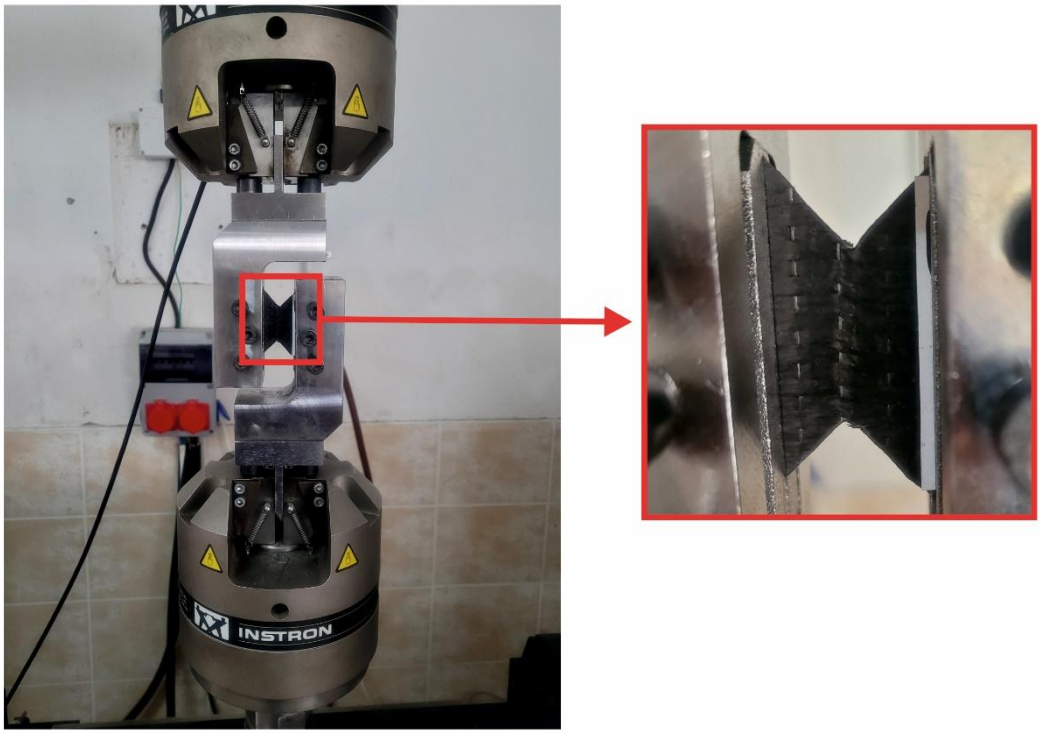


Figure 3. ASTM D7078 V-notched rail-shear test fixture test setup

2.3. Material Modelling for Numerical Model

The UD laminate was assumed to be an orthotropic elastic laminate in the local 1–2–3 axes, (1: fiber direction). The elastic constants were initially calculated using the rule of mixtures (ROM), where the fiber volume fraction is considered.V_f V_f The mass fraction measured by the burn-off test was calculated using densities based on w_f, as shown in Equation 1 [27, 28]. The carbon fiber density used in the calculation was obtained from Table 1.

$$V_f = \frac{\left(\frac{w_f}{\rho_f}\right)}{\left(\frac{w_f}{\rho_f}\right)+\left(\frac{w_m}{\rho_m}\right)} \quad (1)$$

The basic elastic constants and strength properties of the composite plate were calculated using the equations presented in 2-11, with V_f determined as 0.60 from Equation 1 and the elastic constants and strength values of carbon fiber and epoxy presented in Table 1.

The equations providing the elastic properties of the basic on-axis laminate are as follows [27, 28]:

$$E_1 = E_f V_f + E_m(1 - V_f) \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f(1 - V_f)} \quad (3)$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_m(1 - V_f) \quad (4)$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_m V_f + G_f(1 - V_f)} \quad (5)$$

The equations providing the strength values of the basic on-axis laminate follow [27, 28],

$$X_1 = \sigma^f_{max} V_f + \sigma^m_{\varepsilon^f_{max}} (1 - V_f) \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{G_{12}}{\left(1+\left(\bar{\emptyset}/\gamma^m_y\right)\right)} \quad (7)$$

$$Y_1 = E_2 \left[\left[\frac{d}{s}\frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{d}{s}\right)\right](\varepsilon^1_m)_{ult}\right] \quad (8)$$

$$Y_2 = E_2 \left[\left[\frac{d}{s}\frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{d}{s}\right)\right](\varepsilon^2_m)_{ult}\right] \quad (9)$$

$$S_{12} = \frac{1}{\frac{d}{s}\left(\frac{G_m}{G_m}-1\right)+1} \quad (10)$$

$$\frac{d}{s} = \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{1/2} \quad (11)$$

2.4. Setting up the finite element model

The numerical model of the V-notched specimen was created in Abaqus/CAE as a deformable Shell (Planar), part type according to ASTM D7078 dimensions, with the cross-section defined using Composite Layup. The laminate consists of four layers in a [0/90/90/0] orientation, with a layer thickness of 0.325 mm. The definition of each layer is given by the orthotropic elastic constants specified in 2.2.1, in conjunction with the maximum stress/fail-stress criterion for damage initiation. The analysis was conducted utilizing the shell approach, with the element type designated as S4R (reduced integration), selected. In the outer regions, a regular mesh was utilized, while local refinement was applied at the notch roots and in the gauge region. It was established that both extremities of the specimen were kinematically coupled to a reference point (RP). The left RP was fixed ("Encastre"), while displacement-controlled conditions were applied to the right RP in the loading direction. The solution was executed in the Static General step with the NLgeom=ON option. Within the model, the effects of fixture compatibility and friction were not considered, rather, the plane stress assumption was adopted to validate the shell approach, as opposed to the plane strain assumption.

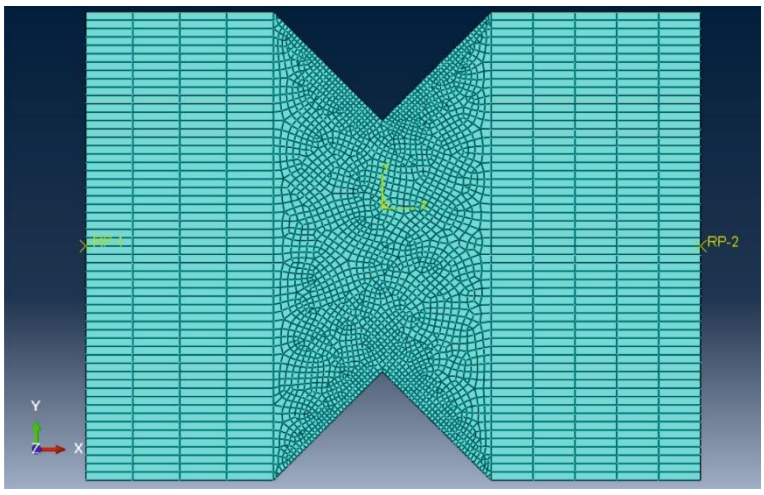


Figure 4. Boundary mesh distribution in the Abaqus/CEA numerical model

3. Results and Discussion

The material properties of the UD carbon fiber composite laminate were calculated using the formulations given in equations 2-11 and the mechanical properties of carbon fiber and epoxy (see Table 1). These are presented in Table 2. The material was defined as an orthotropic laminate in the Abaqus/CAE material library, utilizing the properties listed in this table in the process.

Table 2. Abaqus/CEA material definition properties

Category	Property	Symbol	Value	Unit
Elastic	Longitudinal elasticity	E_1	145	GPa
Elastic	Transverse elasticity	$E_2 = E_3$	8.32	GPa
Elastic	Poisson's ratio	v_{12}	0.256	-
Elastic	In-plane shear modulus	G_{12}	2.90	GPa
Failure stress	Tensile strength	X_1	2300	MPa
Failure Stress	Longitudinal compression strength	X_2	2500	MPa
Failure stress	Tensile strength	Y_1	33	MPa
Failure stress	Transverse compression strength	Y_2	118	MPa
Failure stress	Shear strength	S_{12}	33	MPa

Figure 5a presents the shear force–displacement curves for the five experiments that were deemed to be valid. The curves reach peak load at ~1.0–1.2 mm displacement after a distinct linear-elastic initial stage, followed by post-peak softening. Peak loads are in the range of ~1.2–1.5 kN. As illustrated in Figure 5b, the experimental curve is presented alongside the numerical solution (FE) under identical boundary and loading conditions. Within the linear region, the initial slope (stiffness) of the FE curve corresponds to that of the experimental curve. At approximately 600 N, non-linearities become apparent in the experimental curves, resulting in a divergence from the FE. This discrepancy is attributed to the elastic shell model's inability to accurately represent matrix cracks and local displacements caused by interlaminar shear within the laminate. When comparing solutions up to the same maximum load threshold, the FE displacement is approximately 15–25% lower than the experimental value. This discrepancy can be attributed to (i) the neglect of fixture compatibility/friction, (ii) the partial representation of the three-dimensional stress state at notch roots in the shell approach, and (iii) the exclusion of post-damage softening from the model.

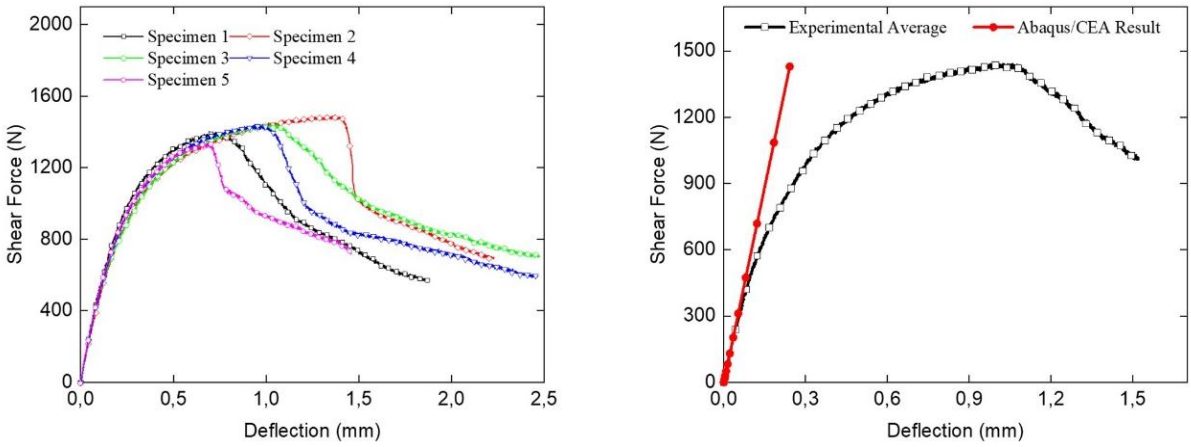


Figure 5. a) Experimental shear force-displacement curves (n=5) b) Experiment-FE shear force-displacement comparison

The shear stress contour in Figure 6a shows a "shear band" that increases and decreases with an almost linear gradient along the centerline between the V-notches. Maximum shear occurs in the central gauge band connecting the notch peaks. Local elevations are observed in small triangular regions at the notch

roots, but their volumetric effects are limited. The displacement magnitude contours in Figure 6b also corroborate the aforementioned band: while the clamp blocks exhibit near-rigid movement, a substantial deformation accumulation is observed in the central region characterized by opposing shear. This numerical prediction exactly aligns with the damage morphology observed in the post-test photograph in Figure 7 (the matrix crack/interface slip in the gage mid-band, the fiber stranding, and local delamination traces). Consequently, it has been confirmed that the matrix-dominant shear mode is localized at the center of the gauge in the [0/90/90/0] laminate, and that fracture initiation and propagation occurred in this region.

From a design perspective, the model–experiment agreement has two outcomes: first, accurate capturing of elastic stiffness allows for reliable G12 estimation in the small displacement region; second, the accurate indication of the fracture location and mode by the field contours shows that localized stress concentrations can be reduced by targeted design interventions (e.g. local reinforcement, geometry softening at the notch root, interface modification). To quantitatively capture post-peak behavior, cohesive zone definitions for damage evolution (energy-based softening) and necessary interfaces can be added in the next step, in addition to the maximum stress damage initiation criterion. Thus, nonlinearity above 600 N and the 15–25% displacement difference can be reduced.

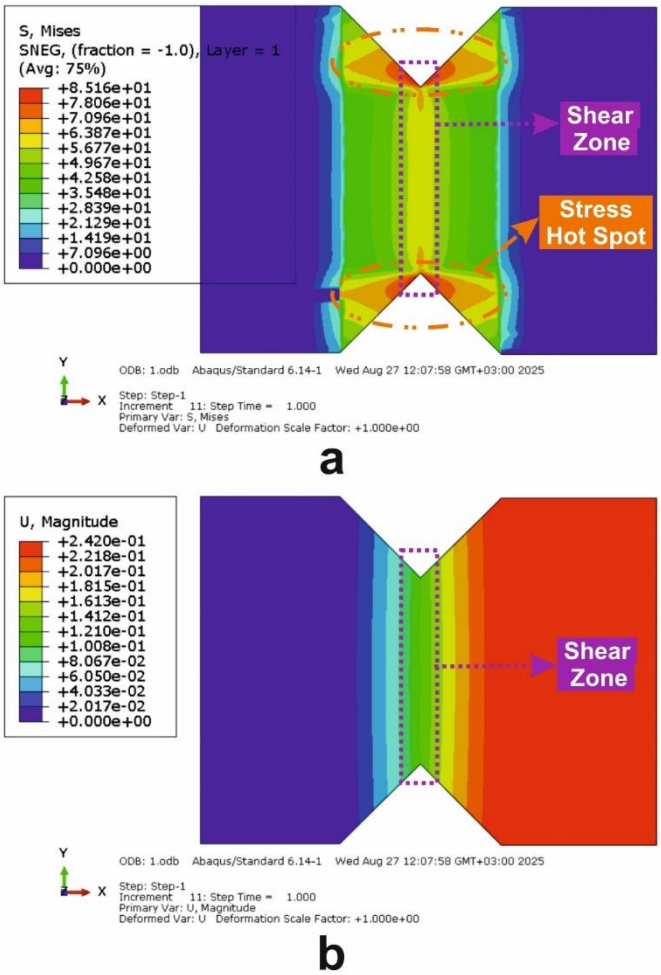


Figure 6. a) FE shear stress (τ) contour-shear band, b) FE displacement magnitude contour-deformation accumulation

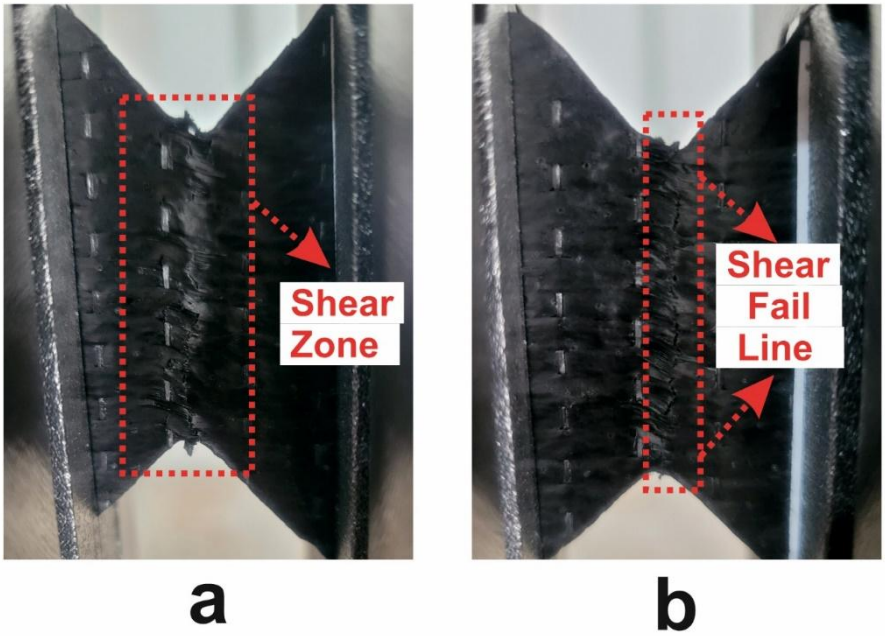


Figure 7. a) Shear and deformation during the experiment, b) Shear damage after the experiment

4. Conclusions

The proposed S4R shell-based FE model has been validated as consistent with experiments in terms of stiffness (initial slope) and damage location/mode. While the experimental curves demonstrated a maximum of approximately 1.2–1.5 kN at 1.0–1.2 mm and exhibited softening, the model predicted a relative displacement of approximately 15–25% at the same load because it excluded damage evolution. The observed discrepancies can be attributed to three factors: firstly, the neglect of fixture compatibility/friction, secondly, the partial representation of the 3D stress state at notch roots using a shell approach, and thirdly, the exclusion of post-peak softening from the model. FE field contours were found to correctly indicate the shear band on the V-notch peak-peak axis and fracture morphology, thus confirming the localization of damage in the measurement region. Consequently, the model can be employed directly for the reliable estimation of G12 in the small displacement range, and for interventions aimed at reducing local stress concentrations in the design. In the subsequent phase, it is anticipated that the nonlinear behavior observed at approximately 600 N, in conjunction with the post-peak separation, will be quantitatively integrated through the incorporation of cohesive zone/energy-based damage evolution definitions.

References

1. Daniel, I. M.; Ishai, O., Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford University Press: 2006.
2. Mallick, P. K., Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition. CRC Press: 2007.
3. Soutis, C., Fibre reinforced composites in aircraft construction. Progress in Aerospace Sciences **2005,** 41 (2), 143-151.
4. Koronis, G.; Silva, A.; Fontul, M., Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. Composites Part B: Engineering **2013,** 44 (1), 120-127.

5. Verma, A. S.; Yan, J.; Hu, W.; Jiang, Z.; Shi, W.; Teuwen, J. J. E., A review of impact loads on composite wind turbine blades: Impact threats and classification. Renewable and Sustainable Energy Reviews **2023,** 178, 113261.
6. Amiri, A.; Krosbakken, T.; Schoen, W.; Theisen, D.; Ulven, C. A., Design and manufacturing of a hybrid flax/carbon fiber composite bicycle frame. **2018,** 232 (1), 28-38.
7. Nosier, A.; Maleki, M., Free-edge stresses in general composite laminates. International Journal of Mechanical Sciences **2008,** 50 (10), 1435-1447.
8. McCarthy, E. D.; Soutis, C., Determination of interfacial shear strength in continuous fibre composites by multi-fibre fragmentation: A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **2019,** 118, 281-292.
9. Blackman, B. R. K.; Brunner, A. J.; Williams, J. G., Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem. Engineering Fracture Mechanics **2006,** 73 (16), 2443-2455.
10. Alam, P.; Mamalis, D.; Robert, C.; Floreani, C.; Ó Brádaigh, C. M., The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - A review. Composites Part B: Engineering **2019,** 166, 555-579.
11. Shabani, P.; Li, L.; Laliberte, J.; Qi, G., Compression after impact (CAI) failure mechanisms and damage evolution in large composite laminates: High-fidelity simulation and experimental study. Composite Structures **2024,** 339, 118143.
12. Stojcevski, F.; Hilditch, T.; Henderson, L. C., A modern account of Iosipescu testing. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **2018,** 107, 545-554.
13. Adams, D. O.; Moriarty, J. M.; Gallegos, A. M.; Adams, D. F., The V-Notched Rail Shear Test. **2007,** 41 (3), 281-297.
14. Chuaqui, T. R. C.; Sebastian, E.; Sahadevan, V.; Rhead, A. T.; Butler, R., Edge treatment of short beam shear tests for improved assessment of structural strength. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **2020,** 137, 105991.
15. Daiyan, H.; Andreassen, E.; Grytten, F.; Osnes, H.; Gaarder, R. H., Shear Testing of Polypropylene Materials Analysed by Digital Image Correlation and Numerical Simulations. Experimental Mechanics **2012,** 52 (9), 1355-1369.
16. Gude, M.; Hufenbach, W.; Andrich, M.; Mertel, A.; Schirner, R., Modified V-notched rail shear test fixture for shear characterisation of textile-reinforced composite materials. Polymer Testing **2015,** 43, 147-153.
17. Hussain, A. K.; Adams, D. F., Analytical evaluation of the two-rail shear test method for composite materials. Composites Science and Technology **2004,** 64 (2), 221-238.
18. Pahr, D. H.; Rammerstorfer, F. G.; Rosenkranz, P.; Humer, K.; Weber, H. W., A study of short-beam-shear and double-lap-shear specimens of glass fabric/epoxy composites. Composites Part B: Engineering **2002,** 33 (2), 125-132.
19. Morton, J.; Ho, H.; Tsai, M. Y.; Farley, G. L., An Evaluation of the Iosipescu Specimen for Composite Materials Shear Property Measurement. Journal of Composite Materials **1992,** 26 (5), 708-750.
20. Lecomte-Grosbras, P.; Paluch, B.; Brieu, M.; Saxcé, G. D.; Sabatier, L., Interlaminar shear strain measurement on angle-ply laminate free edge using digital image correlation. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **2009,** 40 (12), 1911-1920.
21. Liu, G.; Zhang, L.; Guo, L.; Wang, Q.; Liao, F., A modified V-notched beam test method for interlaminar shear behavior of 3D woven composites. Composite Structures **2017,** 181, 46-57.
22. Rosselli, F.; Santare, M. H., Comparison of the short beam shear (SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **1997,** 28 (6), 587-594.

23. Tretiak, I.; Kawashita, L. F.; Hallett, S. R., Predicting short beam shear strength reduction in carbon/epoxy laminates containing voids. Composite Structures **2022,** 290, 115472.
24. ASTM D7078/D7078M-20e1: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Rail Shear Method. 20e1 ed.; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2020.
25. Fibers, T. C. T700S Carbon Fiber — Technical Data Sheet; Toray Industries, Inc.: 22 April, 2025.
26. Chemicals, H. S. MGS® L160 Laminating Resin — Technical Information (with LH160 hardener); Hexion: 2006.
27. Kaw, A. K., Mechanics of Composite Materials. 2nd ed. ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2006.
28. Daniel, I. M.; Ishai, O., Engineering Mechanics of Composite Materials. 2nd ed. ed.; Oxford University Press: New York, 2006.

YUKSEK ENTROPILI SUPER ALASIMLARIN MEKANIK OZELLIKLERINE AL TI ORANININ ETKISI

ISMAIL CAN OZCELIK*[1], KURSAT ICIN[1], SEFA EMRE SUNBUL[2]

[1] Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey
[2] Gaziantep University, Gaziantep, Turkey

Özet

Bu çalışmada, üç farklı Al–Ti oranına sahip yüksek entropili süper alaşımlar (HESA1, HESA2, HESA3) ark ergitme yöntemi ile üretilmiş ve mekanik özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir. Çekme testi sonuçları, Al ve Ti oranlarındaki değişimlerin alaşımların çekme dayanımı, süneklik ve elastik modülü üzerinde belirgin etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Yüksek Al içeriğine (%3,6 at.) ve düşük Ti içeriğine (%5,5 at.) sahip HESA1, 842,76 MPa nihai çekme dayanımı (UTS) ve %23,13 toplam uzama ile çalışmadaki en düşük dayanım ancak en yüksek süneklik değerine ulaşmıştır. Orta düzey Al (%2,8 at.) ve Ti (%6,3 at.) içeren HESA2, 964,67 MPa ile en yüksek çekme dayanımına sahip olurken sünekliği %21,23 olmuştur. En düşük Al (%2,0 at.) ve en yüksek Ti (%7,1 at.) oranına sahip HESA3 ise 948,37 MPa çekme dayanımı ve %17,11 süneklik göstermiştir. Elastik modül tüm numunelerde 18–19 GPa aralığında ölçülmüş, bu değerler yüksek entropili alaşımların tipik rijitlik özellikleriyle uyumlu bulunmuştur. Nanoindentasyon testleri, Ti oranındaki artışın sertliği yükselttiğini, Al oranındaki artışın ise plastik deformasyon kapasitesini geliştirdiğini göstermiştir. HESA1, daha derin yer değiştirme ve daha düşük sertlik sergilerken; HESA3, en az yer değiştirme ile en yüksek sertliğe ulaşmıştır. HESA2, bu iki uç değer arasında dengeli bir davranış göstermiştir. Mikro ölçekli mekanik testler ile makro ölçekli çekme testleri arasında kısmi farklılıklar gözlemlenmiş, bunun alaşımların mikroyapısal heterojenliği ve çok fazlı yapısından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Kimyasal bileşim ile mekanik davranış arasındaki güçlü korelasyon, yüksek entropili süper alaşımların tasarımında element oranlarının kritik önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 - Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında 223M568 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek entropili süper alaşımlar, Mekanik özellikler, Çekme dayanımı, Alüminyum, Titanyum

HADDELENMIS BORAKS TAKVIYELI AL METAL MATRIS KOMPOZITLERDE ISIL ISLEM PARAMETRELERININ KOROZYON DIRENCINE ETKISI

SUAT ONAL[*1]

[1]Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye, Turkey

Özet

Bu çalışmada, haddelenmiş boraks takviyeli Al metal matris kompozitlerin korozyon direnci üzerine ısıl işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Numuneler 500 °C'de 90 dakika çözeltileme işlemine tabi tutulmuş ve ardından farklı yaşlandırma sürelerinde (4, 8 ve 12 saat) bekletilmiştir. Yapılan korozyon testleri sonucunda, yaşlandırma süresinin korozyon performansında belirleyici bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Özellikle 8 saatlik yaşlandırma süresinde en yüksek korozyon direncine ulaşılmış, 12 saatlik sürede ise mikro yapısal değişimlere bağlı olarak kısmi bir düşüş meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, boraks takviyeli Al metal matris kompozitlerde optimum yaşlandırma süresinin seçilmesinin, malzemenin korozyon dayanımını artırmada kritik bir etken olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Isıl işlem, Korozyon direnci, Metal matrisli kompozit, Yaşlandırma

FARKLI HAV YÜKSEKLİĞİNDEKİ POLYESTER HALILARIN SIKIŞTIRMA VE GERİ DÖNME PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

BETÜL TURAN*[1], GÜLBİN FİDAN[2]

[1] Dokuteks Tekstil (KOZA Halı Tasarım Merkezi), Gaziantep, TÜRKİYE.
[2] Gaziantep Üniversitesi, Naci Topçuoğlu MYO, Gaziantep, TÜRKİYE.

Özet

Halı yüzeyi üzerine uygulanan yükün kaldırılması sonrasında hav ipliklerinin ilk kalınlıklarına dönme eğilimi rezilyans olarak tanımlanır ve rezilyans, halı kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Halı yüzeyi sürekli bir yürüme trafiğine maruz kaldığı için yüksek bir rezilyans davranışı göstermesi beklenir. Halı kalitesi hav sıklığı, zemin örgüsü gibi halı yapısal özelliklerinin yanı sıra, iplik doğrusal yoğunluğu, filament inceliği, hav materyali, hav yüksekliği gibi hav iplik özelliklerine bağlıdır. Bu çalışma, son yıllarda hav ipliği olarak kullanımı oldukça artan polyester hav ipliklerinin sıkıştırma ve geri dönme testi sonrasında gösterdiği performansın incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu bağlamda, 12, 16 ve 20 mm lanset kullanılarak 6, 8 ve 10 mm hav yüksekliğine sahip polyester halı numuneleri, wilton tipi yüz-yüze dokuma metodu ile üretilmiştir. Çalışma sonucunca yapılan istatistiksel analizler, hav yüksekliğinin sıkıştırma ve geri dönme davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Polyester, Sıkıştırma ve geri dönme, Rezilyans, Hav ipliği, Hav yüksekliği

EVALUATION OF LOW PRESSURE INJECTION MOLDING PROCESS FOR RAPID MANUFACTURING

OMER EYERCIOGLU[1], ONUR GEBOLOGLU[*1]

[1]Gaziantep University, Engineering Faculty, Gaziantep, Turkey

Abstract

Powder Injection molding (PIM) is a manufacturing technology to produce parts with complex shapes from metal and ceramic powders[1] There are two principle methods of PIM, high pressure injection molding (HPIM) -which is used widely in the industries- and low pressure injection molding (LPIM) which is less common [2]. The LPIM is a method of injection molding, which lower temperatures (60-70 ◦C) and much lower pressures (<0.7 MPa) are used in comparison with a HPIM, which temperature is typically in the range of 130 to 190 ◦C and pressure is from 1.4 to 60 MPa [3].The feedstock viscosity in LPIM process should be as low as 10 Pa s, because low viscosity leads to the greater moldability at low pressure, therefore the mold deformations and costs of tooling will be minimized.Ceramic and polymer metal matrix composites (PMMC) materials have special qualities including high strength, hardness, and resilience to harsh environments, which make them appropriate for a variety of applications in sectors like electronics and aerospace.In this study,property of ceramics and PMMC which are physical, mechanical, and other behaviors has produced with metallic molds will be experimentally tested using the LPIM approach.

Keywords: LPIM, PIM , PMMC

OTOMOTIV FREN DISKLERININ HARMONIK VE TRANSIENT ANALIZLERI SONLU ELEMANLAR YONTEMI ILE TERMOMEKANIK DAVRANISIN INCELENMESI

CEVAT OZARPA[1], ZEHRA ASMA[2], SEYIT ALI KARA[*2]

[1]Ankara Medipol University, Ankara, Turkey
[2]Karabuk University, Karabuk, Turkey

Özet

Bu çalışmada, otomotiv fren disklerinin titreşim, gerilme ve ısıl davranışlarını bütüncül olarak incelemek amacıyla harmonik ve transient analizler entegre şekilde gerçekleştirilmiştir. Harmonik analiz ile diskin ilk altı doğal frekansı ve mod şekilleri belirlenmiş; ilk iki modun sırasıyla 750,7 Hz ve 750,97 Hz civarında olduğu tespit edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü mod şekilleri 915,67 Hz ve 934,42 Hz'de, beşinci ve altıncı modlar ise sırasıyla 1024,3 Hz ve 1630,4 Hz'de gerçekleşmiştir. Frekans cevabı eğrileri, en belirgin rezonansın yaklaşık 1,33–1,35 kHz bandında oluştuğunu ve bu bölgede maksimum gerilme genliğinin ≈7,96 MPa, şekil değiştirme genliğinin ise ≈2,88×10^{-6} mm/mm seviyelerine ulaştığını göstermiştir. Transient analiz sonucunda ise ani frenleme koşullarında Von Mises gerilmesinin maksimum ≈0,19 MPa seviyelerine ulaştığı, maksimum şekil değiştirmenin ≈1,98×10^{-6} mm/mm olduğu ve başlangıçta ≈2,27 mm/s² değerine çıkan ivmenin kısa sürede sönümlenerek 0,25 s sonrasında ihmal edilebilir seviyelere indiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yalnızca rezonans frekanslarının optimize edilmesinin yeterli olmadığını, ısıl-mekanik etkileşimlerin eş zamanlı yönetilmesinin zorunlu olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, geometrik iyileştirmeler, düşük ısıl genleşme katsayılı ve yüksek termal iletkenlikli malzeme seçimi ile yüzey kaplamalarının kullanımına yönelik tasarım önerileri geliştirilmiştir. Çalışmanın bütüncül yaklaşımı, tasarım aşamasında olası NVH (Noise, Vibration, Harshness) ve termal güvenlik problemlerinin önceden öngörülmesini sağlayarak, maliyetli prototip denemelerinin ve saha testlerinin azaltılmasına katkı sunmaktadır. Literatürde genellikle modal veya termal analizlere ayrı ayrı odaklanan çalışmaların aksine, bu çalışmada her iki yaklaşımın entegre olarak ele alınması, fren diski tasarımında hem akustik konforu hem de termal güvenliği artırmaya yönelik yenilikçi bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Smart polymer composite, FDM, Flexural properties, Optimization, Carbon black reinforced composites

KALSINASYON ISLEMININ ELEKTROSPINNING YONTEMIYLE SENTEZLENEN YUKSEK ENTROPILI OKSIT NANOFIBERLERIN FAZ DONUSUMLERI VE KRISTALLESME DAVRANISI UZERINE ETKISI

MERVE ESRANUR YALCIN[1], SUMRAN BILGIN*[1], SEFA EMRE SUNBUL[2], KURSAT ICIN[1], UMIT ALVER[1], SULTAN OZTURK[1]

[1] Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey
[2] Gaziantep University, Gaziantep, Turkey

Özet

Yüksek entropi oksit nanofiberler, özellikle enerji depolama uygulamaları olmak üzere birçok alanda umut vadeden malzemeler arasındadır. Bu çalışmada, (CoCuMgNiZn)O kompozisyonuna sahip nanofiberleri elektrospinning yöntemi kullanarak sentezlemek ve ardından kalsinasyon işlemleriyle kristal faz dönüşümlerini ve morfolojik değişimlerini sistematik olarak incelemek amaçlanmıştır. Metal asetat öncülleri PAN/DMF bazlı çözeltilere eşmolar oranlarda eklenerek elektrospinning yöntemiyle fiber üretimi gerçekleştirilmiştir. Eğrilmiş fiberlerin termal davranışı diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere dayanarak, fiberlere 400-1000 °C sıcaklık aralığında atmosferik koşullarda 3 saat boyunca ısıl işlem uygulanmıştır. Kalsinasyon sonrası yapısal dönüşümler XRD, FT-IR, SEM, TEM, EDS ve XPS analizleri kullanılarak ayrıntılı olarak karakterize edilmiştir. DSC analizinde sırasıyla 475 °C ve 520 °C'de α fazı ve β fazı dönüşümleri gözlenmiş ve bu sıcaklıklarda kaya tuzu tipi kristal yapıların oluşmaya başladığı belirlenmiştir. SEM ve TEM görüntüleri düşük sıcaklıklarda amorf yapının korunduğunu, yüzeyde kristalleşme ve parçacık oluşumunun ise artan sıcaklıkla birlikte arttığını göstermiştir. 1000 °C'de gerçekleştirilen tavlama işlemi kristalin fazların tam olarak oluştuğunu ve polikristalin yapıların geliştiğini doğrulamıştır. XPS sonuçları ise tüm metal bileşenlerin +2 oksidasyon durumunda olduğunu ve hedeflenen çok bileşenli oksit matrisine entegre olduğunu göstermiştir. Bulgular, kalsinasyon koşullarının nanofiberlerin yapısal bütünlüğünde ve kristalin faz oluşumunda belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek entropili oksit, Nanofiber, Elektrospinning, Kalsinasyon sıcaklığı

SEMANTIC SEGMENTATION AND DOMAIN ADAPTATION FOR ROBUST IDENTIFICATION OF SHEET METAL PARTS

GUL SIGINDI*[1], ALI KILIC[1], SADETTIN KAPUCU[1]

[1]Gaziantep University, Engineering Faculty, Gaziantep, Turkey

Abstract

The domain gap between synthetic CAD images and real production photographs remains one of the major challenges in applying deep learning–based methods for sheet metal part identification. While CAD models provide abundant, easily generated training data, their visual characteristics differ significantly from real-world images due to variations in texture, illumination, perspective, and manufacturing imperfections. To mitigate these differences, semantic segmentation is employed to remove background clutter and environmental noise, thereby aligning CAD-based and real images to a considerable extent. This preprocessing step substantially improves the reliability of models when transferred to industrial settings. However, residual discrepancies caused by fine-grained surface patterns, lighting variations, and geometric distortions still prevent full generalization across domains. To address these limitations, domain adaptation strategies are essential. Techniques such as adversarial learning, transfer learning, and style transfer enable models trained on synthetic CAD datasets to better adapt to real-world conditions, ultimately enhancing classification accuracy and robustness. By bridging the remaining domain gap, these methods contribute to the development of scalable and efficient recognition systems capable of operating under practical industrial constraints. Such systems hold strong potential for improving automation and quality control in modern manufacturing environments, where the accurate and timely identification of sheet metal parts is critical.

Keywords: Adversarial learning, Deep learning, Domain adaptation, Domain gap, Sheet metal parts, Semantic segmentation, Transfer learning

SURFACE ENHANCEMENT OF ADDITIVELY MANUFACTURED MICRO CHANNELS VIA ABRASIVE FLOW MACHINING AFM PROCESS

OMER EYERCIOGLU[1], MEHMET ALI AKELOGLU[*1]

[1]Gaziantep University, Engineering Faculty, Gaziantep, Turkey

Abstract

Additive manufacturing (AM) has revolutionized modern production by enabling the fabrication of highly complex geometries and micro-scale features, such as channels with diameters below 1 mm, that are difficult or impossible to achieve using conventional subtractive or formative methods. Various AM techniques—including polymer-based processes such as Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), and Multi Jet Fusion (MJF), as well as metal-oriented processes such as Selective Laser Melting (SLM) and Electron Beam Melting (EBM)—allow the production of functional components across a wide range of materials, from thermoplastics and composites to titanium and nickel alloys. Despite these advantages, a common drawback is the inherent surface roughness generated by the layer-by-layer build process. In micro-channels, this roughness significantly impacts component performance by altering fluid flow behavior, increasing pressure losses, reducing fatigue life, and promoting stress concentrations. Post-processing is therefore critical for ensuring the reliability and applicability of AM-produced parts. However, conventional surface finishing techniques are limited in their ability to access and uniformly treat complex internal passages. Abrasive Flow Machining (AFM) emerges as an effective non-traditional finishing method, where an abrasive-laden semi-solid medium is extruded through the component's internal features, selectively removing asperities and enhancing surface quality. This technique is applicable to both polymeric and metallic AM components, offering improvements in flow efficiency, mechanical durability, and functional performance. The present study focuses on the use of AFM to refine the inner surfaces of additively manufactured micro-channels, demonstrating its potential to bridge the gap between design freedom offered by AM and the stringent surface quality requirements of industrial applications in fluidics, biomedical devices, and aerospace systems.

Keywords: Additive manufacturing (AM), Micro channels, Surface roughness, Abrasive flow machining (AFM)

OPEN END IPLIK EGIRME YONTEMI ILE GERI DONUSUMLU PAMUK KARISIMLI HAVLU HAV IPLIGI URETIMI VE OZELLIKLERININ INCELENMESI

YUSUF SENEL[1], HATICE DEMIRAL[1], YUSUF SENEL[1], EKIN UNLU[1], HALIL IBRAHIM CELIK[*2]

[1]Biska Tekstil San Tic Ve A S, Turkey
[2] Gaziantep Universitesi, Tekstil Muhendisligi Bolumu, Gaziantep, Turkey

Özet

Tekstil endüstrisi, yüksek hammadde tüketimi ve atık üretimi nedeniyle küresel ölçekte çevresel baskı oluşturan sektörlerden biridir. Bu nedenle sürdürülebilirlik, geri dönüşüm ve atık yönetimi kavramları tekstil alanında stratejik bir önem kazanmıştır. Özellikle pamuk gibi yoğun su ve enerji kullanımı gerektiren doğal liflerin geri dönüşüm yoluyla yeniden üretim süreçlerine kazandırılması, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de döngüsel ekonomi hedeflerinin desteklenmesi açısından kritik görülmektedir. Havlu kumaşlar, günlük yaşamda hijyen ve konfor amaçlı kullanılan, yüksek su emme kapasitesiyle öne çıkan tekstil ürünleridir. Bu kumaşların kalitesi ve performansı büyük ölçüde hav ipliklerinin yapısına bağlıdır. Hav ipliklerinden beklenen başlıca özellikler; yüksek emicilik, uygun mukavemet, yeterli düzgünsüzlük seviyeleri ve kullanım ömrü boyunca dayanıklılıktır. Dolayısıyla hav ipliklerinde geri dönüşümlü pamuk liflerinin kullanımı, hem performans özelliklerinin korunması hem de sürdürülebilir üretim açısından araştırılması gereken bir konudur. Bu çalışma kapsamında open-end iplik eğirme yöntemi ile %100 virgin pamuktan referans iplik üretilmiş, ayrıca üç farklı oranda geri dönüşümlü pamuk–virgin pamuk karışımlarından hav iplikleri hazırlanmıştır. Üretilen ipliklerin kalite parametreleri, düzgünsüzlük özellikleri ve emicilik performansları incelenerek havlu üretiminde geri dönüşümlü pamuk kullanımının etkileri araştırılmıştır. Çalışma, hem akademik literatüre katkı sağlamayı hem de sürdürülebilir tekstil üretiminde geri dönüşümlü pamuk liflerinin kullanım potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Geri dönüşümlü pamuk, Kompakt ring iplik, Havlu hav ipliği, Emicilik

A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR ENHANCING JUTE-POLYPROPYLENE INTERFACE USING A PINE RESIN ADDUCT

MESUT TOZAN*[1], AMMAR TARIK DİNÇER[1], METE KAYIHAN[1], MUSTAFA BAKKAL[1]

[1]Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Istanbul, TÜRKİYE.

Abstract

Composite materials, offering both high performance and lightweight properties, find use in many sectors. As their application and usage volumes expand yearly, the development of sustainable composites becomes increasingly critical. While developing sustainable composites is complex, bio-based resins and natural fibers are promising alternatives to traditional reinforcements like carbon, aramid, and glass fibers, which cause significant environmental damage. Although natural fibers improve a composite's environmental profile, they present challenges. Their hydrophilic nature, derived from their cellulosic structure, negatively affects mechanical and thermal properties and creates compatibility issues with the matrix, especially in humid environments. To improve this compatibility, various modifications are applied. This study proposes a novel bio-based adduct from pine resin to act as a compatibilizer. We hypothesize a chemical mechanism by which this adduct can improve both interfacial adhesion and moisture resistance in jute-polypropylene composites.

Keywords: Sustainability, Rosin, Maleic anhydride, Jute

1. Introduction

Composite materials obtained by reinforcing a polymer matrix with fibers can offer properties such as higher strength and modulus, corrosion resistance, and lighter weight compared to traditional materials. With the increasing interest, the production volumes of composite materials are also rising. These increasing consumption volumes bring with them questions of recycling and life cycle, encouraging scientists to work in this field to develop more sustainable composite materials. Beyond just encouragement, efforts are being made to set limits for use through climate agreements and European Union directives. Developing sustainable composite materials is necessary for sustainable growth, ensuring energy security, and reducing the carbon footprint [1].

Synthetic fibers, such as carbon, aramid, and glass fibers have widely been used as reinforcements because of their high strength, durability, and lightweight nature. However, the environmental impacts of these fibers are widespread and substantial, as they are non-biodegradable and can stay in the environment for hundreds of years [2]. Natural fibers are seen as a good alternative for use as reinforcement material since on average 17% less energy is required to produce natural composites than synthetic counterparts [3].
Although natural fibers reduce the environmental impact of composite materials, they create a negative effect on their mechanical and thermal properties. Furthermore, because natural fibers exhibit hydrophilic property due to their cellulosic structure, certain problems arise in their

compatibility with the matrix and in their subsequent use in humid environments. Various modifications and additives are applied to natural fibers to make them more compatible in composites. These modifications can be applied directly to the fiber or can be added during the mixing process.

In this project, solution proposals will be presented for the problems of poor interfacial bonding and poor wetting encountered in the use of jute fiber in composite materials. Poor interfacial bonding is a problem encountered between the polar jute fiber and the nonpolar polypropylene matrix. Poor wetting occurs due to the lack of chemical bonding between the reinforcement and the matrix. Furthermore, potential application areas will be proposed for pine resin obtained naturally from pine trees in this project. This study also serves as the result and summary of the research conducted and constitutes a preliminary report for our future work.

2. Materials and Methods

Maleopimaric Acid

Maleopimaric acid is formed by the reaction of levopimaric acid, obtained from rosin, with maleic anhydride. It is produced via the well-known Diels-Alder reaction in organic chemistry. The combination of these two molecules results in maleopimaric acid, a new molecule that is larger, more stable, and more functional than levopimaric acid.

Its structure contains both acid (-COOH) and anhydride functional groups. These groups allow the molecule to react with the hydroxyl (-OH) groups on alkali-treated jute; the acid group undergoes an esterification reaction, while the anhydride group undergoes a similar acylation reaction. Due to its excellent adhesion to surfaces, it is a preferred component in applications such as coatings and inks. It is also more stable against oxidation and heat than pure rosin.

Maleic Anhydride

Maleic anhydride is an organic compound with the formula $C_4H_2O_3$ and has a white crystalline structure. It contains both an anhydride group and an alkene group in its structure. This electron-poor compound is one of the most potent dienophiles in organic chemistry.

Maleic anhydride acts as a coupling agent in composite materials where the fiber and reinforcement are incompatible. For example, Maleic anhydride can be grafted onto a polypropylene chain, resulting in maleic anhydride grafted polypropylene (MAgPP) [4]. While the polypropylene end of this long polymer chain bonds with the matrix, the polar anhydride ring forms strong chemical bonds with the hydroxyl (-OH) groups on the surface of the fibers.

Rosin

Rosin, known as "kolofan" in Turkish, is a solid form of natural resin obtained by purifying the gum resin that is distilled from pine trees. The main application areas of rosin include adhesives, inks, and paints. It contains 90% resin acids and 10% neutral compounds such as terpenes [5]. The acids in its content include abietic acid, pimaric acid, and their isomers.

Levopimaric acid is an isomer of pimaric acid with the chemical formula $C_{20}H_{30}O_2$. Thanks to the carboxyl (-COOH) functional group it contains, levopimaric acid can undergo esterification reactions, and thanks to the conjugated carbon-carbon (C=C) double bond it contains, it can also undergo Diels-Alder addition reactions.

Jute Fiber

Jute is a natural, lignocellulosic fiber obtained from the stems of plants belonging to the Corchorus genus. As a biodegradable and renewable resource, it has become a significant alternative in the search for environmentally friendly materials. The chemical composition of jute fiber consists of cellulose, hemicellulose, and lignin. Cellulose is the main structural component of jute fiber and the primary element providing its strength. Hemicellulose plays a significant role in moisture absorption. Lignin is a rigid and amorphous polymer that binds cellulose and hemicellulose together, imparting hardness and rigidity to the fiber.

With the growing interest in natural fiber-reinforced composites, jute fiber stands out due to its advantages over synthetic fibers, such as low density, low cost, and sustainability. However, despite these benefits, there are some technical obstacles to the use of jute fiber in composite materials. The most significant of these are jute's hydrophilic nature and the weak fiber-matrix interfacial bond. Overcoming these technical barriers will ensure that its advantages can be fully exploited.

Certainly, there are some existing practices to overcome these technical challenges. Foremost among these is the treatment of jute fibers with a sodium hydroxide (NaOH) solution for a specific temperature, duration and concentration. This process is known as alkali treatment in textile literature and has been proven to reduce the problem of interfacial bonding [6]. Alkali treatment removes impurities such as hemicellulose and pectin from the fiber surface. The fiber, which separates into finer fibrils, becomes rougher and enhances mechanical interlocking with the polymer matrix.

3. Results and Discussion

The fundamental challenge in developing high-performance jute-polypropylene composites lies in the inherent chemical incompatibility between the hydrophilic, polar jute fiber and the hydrophobic, non-polar polypropylene matrix. This incompatibility leads to a weak fiber-matrix interface, poor stress transfer, and consequently, suboptimal mechanical properties. This study proposes a novel molecular bridge—a maleopimaric acid (MPA) adduct derived from pine rosin—to overcome this challenge. The hypothesized mechanism of action for this adduct is twofold, addressing both interfacial adhesion and moisture resistance.

Mechanism of Interfacial Bonding

The proposed mechanism relies on the unique bifunctional structure of the maleopimaric acid adduct, which is synthesized via a Diels-Alder reaction between levopimaric acid from rosin and maleic anhydride. This new molecule possesses distinct functional groups capable of interacting with both the fiber and the matrix.

Covalent Bonding with Jute Fiber

The surface of the jute fiber is rich in cellulose, which contains abundant hydroxyl (-OH) groups. A critical prerequisite is the alkali (NaOH) treatment of the jute fibers. This process not only removes impurities like hemicellulose and pectin but, more importantly, increases the reactivity of these surface hydroxyl groups [7]. The MPA adduct is hypothesized to form strong, stable covalent linkages with these activated hydroxyl groups through two potential pathways:

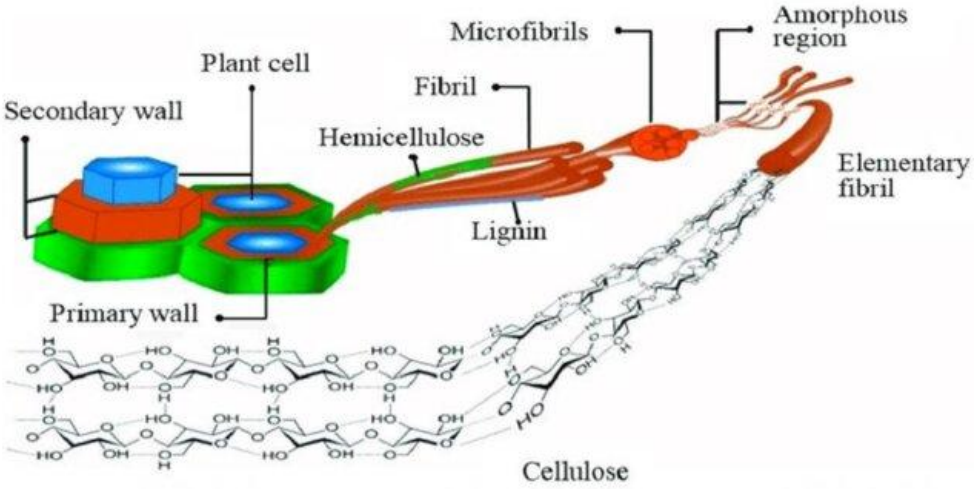


Figure 1: Jute fiber macro/microstructures [8].

Esterification
The carboxylic acid (-COOH) group present on the MPA molecule can undergo an esterification reaction with the hydroxyl groups on the jute surface.

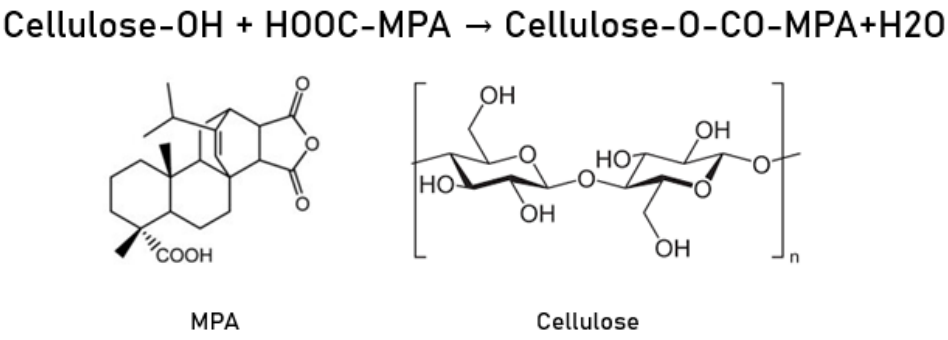


Figure 2: Esterification reaction between MPA and Cellulose (Jute).

Acylation
Simultaneously, the highly reactive anhydride ring within the MPA structure can undergo a similar acylation reaction with the same hydroxyl groups.

This covalent grafting would firmly anchor the adduct molecules onto the fiber surface

Physical Interaction with Polypropylene Matrix
The main body of the MPA adduct is the large, sterically bulky, and non-polar hydrocarbon structure derived from the original levopimaric acid ($C_{20}H_{30}O_2$). This part of the molecule is chemically like the non-polar polypropylene matrix. It is proposed that this non-polar "tail" of the anchored adduct will physically interact with the long polypropylene chains. This interaction would occur through van der Waals forces and molecular entanglement, creating strong physical adhesion.

Discussion

A major drawback of natural fibers is their hydrophilic nature, which leads to significant moisture absorption in humid environments. This absorption causes fiber swelling, weakening of the interface, and degradation of mechanical properties. The rosin-based core of the MPA adduct is inherently hydrophobic. By covalently grafting this adduct onto the jute surface, a hydrophobic shield is effectively created around the fiber. This shield is expected to repel water molecules, thereby reducing the overall moisture uptake of the composite. While alkali treatment alone does little to improve moisture resistance, the addition of the MPA adduct is hypothesized to directly address this critical issue.

Outlook and Future Work

The conceptual framework presented here provides a strong scientific rationale for using a pine resin adduct as a multifunctional compatibilizer in jute-PP composites. It proposes a clear chemical mechanism for improving both interfacial adhesion and moisture resistance. To validate these hypotheses, future work should focus on the experimental synthesis and characterization of the maleopimaric acid adduct, followed by the fabrication of jute-polypropylene composites. Subsequent testing—including tensile and flexural tests (e.g., per ASTM D638, D790), water absorption tests (e.g., per ASTM D570), and microstructural analysis via Scanning Electron Microscopy (SEM) of the fracture surfaces—will be essential to quantitatively assess the effectiveness of this novel bio-based coupling agent.

4. Conclusions

This study presents a conceptual framework for improving the performance of jute-polypropylene composites through the use of a novel, bio-based coupling agent derived from pine resin. The primary obstacle in these composites is the poor interfacial adhesion between the hydrophilic jute fibers and the hydrophobic polypropylene matrix. To address this, we hypothesize the use of a maleopimaric acid adduct, formed from the reaction of rosin and maleic anhydride.

The proposed mechanism suggests that the adduct's functional groups—specifically its acid and anhydride components—will form strong covalent bonds with the hydroxyl groups present on the surface of alkali-treated jute fibers. Simultaneously, the adduct's non-polar rosin body is expected to establish strong physical adhesion with the non-polar polypropylene matrix through molecular entanglement and van der Waals forces.

This molecular bridge is anticipated to yield a dual benefit: a significant improvement in the composite's mechanical properties due to enhanced stress transfer across the interface, and a reduction in moisture absorption owing to the inherent hydrophobic nature of the rosin backbone. This theoretical work lays the foundation for future experimental studies to validate the potential of this sustainable adduct as a high-performance compatibilizer for natural fiber composites.

References

1. Mohanty, A. K., Vivekanandhan, S., Pin, J. & Misra, M. (2018). Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. Science, 362(6414), 536-542. https://doi.org/10.1126/science.aat9072

2. Maiti, S., Islam, M. R., Uddin, M. A., Afroj, S., Eichhorn, S. J. & Karim, N. (2022). Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review. Advanced Sustainable Systems, 6(11). https://doi.org/10.1002/adsu.202200258
3. Banik, N., Dey, V. & Sastry, G. R. K. (2017). An overview of lignin & hemicellulose effect upon biodegradable bamboo fiber composites due to moisture. Materials Today: Proceedings, 4(2), 3222–3232. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.208
4. Mohanty, S., Nayak, S. K., Verma, S. K. & Tripathy, S. S. (2004). Effect of MAPP as a Coupling Agent on the Performance of Jute–PP Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 23(6), 625-637. https://doi.org/10.1177/0731684404032868
5. Mahendra, V. (2019). Rosin Product Review. Applied Mechanics and Materials, 890, 77–91. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.890.77
6. Gassan, J., Bledzki, A. K. (1999). Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres. Composites Science and Technology, 59(9), 1303-1309. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00169-9
7. Roy, A., Chakraborty, S., Kundu, S. P., Basak, R. K., Majumder, S. B., Adhikari, B. (2012). Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alkali treatment as demonstrated by utilisation of the Weibull distribution model. Bioresource Technology, 107, 222-228. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.073
8. Jute fiber macro/microstructures, https://hubpages.com/education/Jute-Fibers-Properties-Manufacturing-Process-and-Good-Washing-of-Jute. Last accessed on 30 March 2020.

EFFECT OF RECYCLING GLASS FIBER REINFORCED ELIUM THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS ON MECHANICAL PROPERTIES

Berfin CEVLANİ[1], Mete KAYIHAN*[1], Mustafa BAKKAL[1]

[1]Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Faculty, Gümüşsuyu, İstanbul, TÜRKİYE

Abstract

Thermoplastic materials are of vital importance for sustainable manufacturing because they are recyclable. In this study, the effect of mechanical and/or chemical recycling on the mechanical properties of glass fiber reinforced Elium thermoplastic composites that have been previously damaged in various ways is discussed. In mechanical recycling, materials are ground into powder or granules to produce new products, while polymer matrices are separated by chemical processes to recover the reinforcement fibers. Through chemical recycling, the polymer matrix is separated via solvent-based dissolution and precipitation, thereby preserving and recovering the reinforcement fibers and polymer matrix. After all recycling processes, the materials are remanufactured using resin transfer molding. Then, samples are prepared and subjected to tensile, three-point bending and impact tests. As a result of the tests, it was revealed that although a large decrease in the tensile strength of the material was observed in the first recycling, these mechanical properties improved to a certain point as the recycling process continued, and then no further increase was observed.

Keywords: Glass fiber, Elium, Thermoplastic, Recycling, Mechanical properties

1. Introduction

The recycling of composites is an extremely important and topical issue, particularly due to the increasing use of composites in the aerospace, wind turbine and automotive industries [1]. Composites typically consist of a polymer matrix (thermoset or thermoplastic) and a reinforcement material (usually glass or carbon fiber) [2]. The bonding of these two components makes them excellent building materials but also makes them difficult to recycle. Unlike traditional materials (plastics, metals), separating these components and purifying each is an energy-intensive and complex process.

The primary motivations for recycling are due to environmental, economic and legal concern. The main goals of recycling are reducing the amount of material going to landfill, improving life cycle analysis, and reducing the carbon footprint, reusing valuable recovered materials (especially carbon fiber) and increasing the circular economy goals [3].

Thermoplastics are materials that melt when heated and solidify when cooled. Therefore, they can be directly recycled by mechanical grinding and remelting (reprocessing) [4]. To determine the performance of recycled materials and their potential applications, industry requires a series of mechanical tests. These tests allow the materials to be compared to their original state. Tensile

testing is often used to measure the strength and stiffness of recycled fibers or laminates made from recycled material [5].

This study aims to recycle the continuous glass reinforced Elium thermoplastic composite materials via mechanical recycling. As a result of this recycling, the gain of mechanical properties of the material was monitored. This study is innovative and important for the sustainable production of novel thermoplastic composite materials in industry.

2. Materials and Methods

The material produced is a thermoplastic polymer blend containing 8 continuous layers of biaxial E-glass glass fibers, Elium® 151SO, and 21% Elium® A10® [6]. This material was produced using the Light RTM method in vacuum.

Many composite recycling methods work by burning (pyrolysis) or chemically dissolving (solvolysis) the resins in the composite part, allowing the fibers to be recovered and reused. This is quite laborious, as you pay a portion of the cost during the process. Composite parts made from Elium resin were recycled after various mechanical and fatigue tests. First, they were ground, then reprocessed with ABS, a different thermoplastic, to complete the recycling process. Figure 1 represents the main steps of the recycling process.

Figure 1: The main steps of recycling process.

Grinding steps

The composite part after mechanical tests have been grinded and cut into smaller pieces to reduce the size of the scrap into particles. A grinding mill (Wanner C 13.20 s) was selected to grind the flat plaques and obtain the composite of the Elium® GF (glass fiber) composite part. The grinding machine has been given in Figure 2.

Figure 2: Grinding machine.

Compounding steps

The commercial Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) polymer was introduced in hopper for melting and impregnate the fiber which has 40 MPa tensile strength. The extruded filament was cooled in air condition and at the end of the line it was cut using a pelletizer device to obtain the cylindrical pellets (3mm diameter) ready for injection. The formulation used for the compound contained 45% ABS: 55% Elium® composite (weight %) being the fiber content (% weight) because of maximum tensile strength. The injection machine has been given in Figure 3. Also the finished specimen has been given in Figure 4.

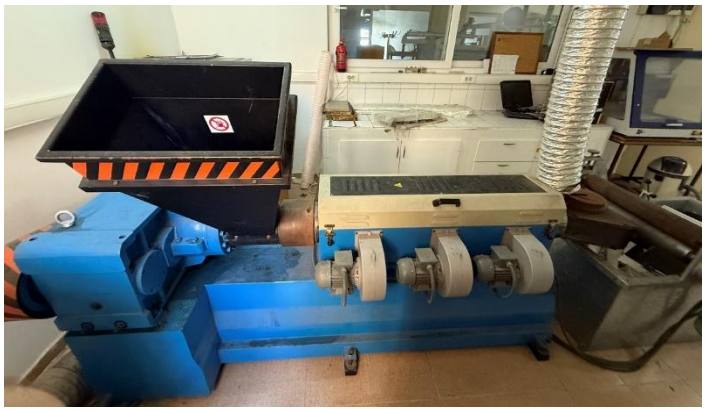


Figure 3: The injection machine.

Figure 4: Test specimen.

3. Results and Discussion

While the pure ABS material used had a strength of 40 MPa, the composite material used came out at 61.5 MPa. When recycled again (2nd time), the strength dropped to 57 MPa. When recycled once more (3rd time), it was observed that the tensile strength remained almost unchanged (56.5 MPa). When these results are followed, the decrease in mechanical properties stays limited after the 3rd recycling. Also, Charpy impact test has been done after all recycling. The detailed table has been given in Table 1.

Table 1. Mechanical tests.

Specimen	Tensile Stress (MPa)	Elongation at break (%)	Charpy Impact Strength (kJ/m^2)
First recycling	61.5	15.3	12
Second recycling	56.9	20.8	14
Third recycling	56.5	22.1	15
Virgin ABS	40	50	35

4. Conclusions

Recycling thermoplastic composite materials is a highly anticipated endeavor in the industry. In this study, continuous glass fiber-reinforced thermoplastic composite materials were ground into small pieces by grinding, then ABS was melted and added by injection molding, increasing the strength of the ABS and recycling the Elium GF material. After the materials were recycled, there was virtually no loss of strength after the third recycling cycle. This way, the loss may not be evident after the third recycling cycle.

Acknowledgments:

We are thankful for the support received from the Istanbul Technical University Scientific Research Projects Coordination Unit number of MGA-2025-46690 and EU Horizon 2020 Program under the RECOTRANS project with the Grant Agreement number of 76873.

References:

1. Bakkal, M., Kayihan, M., Timur, A., Parlar, Z., Guleryuz, C. G., Yücel, A. H., Palabıyık, İ. M., & Gülmez, T. (2023). Fatigue behavior and self-heating mechanism of novel glass fiber reinforced thermoplastic composite. Advanced Composite Materials, 32(6), 899–915. https://doi.org/10.1080/09243046.2023.2175764
2. Allagui, S., Mahi, A. E., Rebiere, J., Beyaoui, M., Bouguecha, A., & Haddar, M. (2021). Thermoplastic Elium Recycling: Mechanical Behaviour and Damage Mechanisms Analysis by Acoustic Emission. In Applied condition monitoring (pp. 53–61). https://doi.org/10.1007/978-3-030-76517-0_7
3. Yan, S., & Abdin, Y. (2025). Fatigue Behavior of Elium®-Based Thermoplastic Composites Fabricated by Liquid Composite Molding–A Review. Composites Part B: Engineering, 112159.
4. Türker, Y. S., Öztürk, F., & Öz, Y. (2024). Review of recycling methods of thermoplastic composite materials. Polymer-Plastics Technology and Materials, 63(12), 1693-1713.
5. Ozturk, F., Cobanoglu, M., & Ece, R. E. (2024). Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 37(9), 3084-3116.
6. Arkema Group (2021). "Elium® Resin: A Breakthrough in Recyclable Composites." Retrieved from Arkema Official Website.

ENHANCING IRRIGATION SCHEDULING ACCURACY THROUGH MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING A CASE STUDY ON EVAPOTRANSPIRATION AND SOIL WATER CONTENT MODELING

KAAN ARIK*[1], BILAL EROL[2], AKIN DELIBASI[3], CEM ERTAL[4]

[1]Qatar Sakarya University Of Applied Sciences, Turkey
[2]Yildiz Technical University, Turkey
[3]University College London, United Kingdom
[4]Topraq Agricultural Technologies Industry And Trade Inc, Turkey

Abstract

Water is the most essential resource for sustaining life, and its demand is rapidly increasing due to the growing global population. Agriculture, the primary consumer of freshwater resources, lies at the center of the water scarcity crisis. To ensure sustainable water availability for future generations, it is crucial to manage existing water resources efficiently and wisely. The limited availability of freshwater and the rising demand for agricultural production highlight the necessity of well-planned irrigation scheduling. Evapotranspiration and soil water content represent two of the most crucial factors for effective irrigation scheduling. Accurate irrigation scheduling requires knowledge of plant water consumption, represented by evapotranspiration (ETo). ETo is the total amount of water lost through soil evaporation and plant transpiration. This process is influenced by multiple factors, including temperature, solar radiation, humidity, and wind speed. Among the various methods developed to estimate ETo, the FAO Penman-Monteith equation is the most widely used, offering a standardized approach for calculating hourly or daily evapotranspiration based on climatological measurements. Soil Water Content (SWC), on the other hand, quantifies the volume of water within a unit volume of soil. SWC can be measured through traditional laboratory methods, or through advanced remote sensing techniques. Accurate SWC and ETo estimations are vital for optimizing irrigation practices, ensuring efficient water use, and supporting sustainable agriculture. Deriving mathematical models to estimate ETo and SWC based on physical principles is inherently challenging. It requires a deep understanding of the environment and considerable effort to account for complexities such as nonlinearities and variable interactions. In contrast, learning algorithms offer a significant advantage by extracting features directly from raw data, as they do not require manual adjustments once trained. This capability not only enhances the accuracy of ETo and SWC predictions but also makes these algorithms practical and efficient tools for irrigation scheduling and adapting to varying environmental conditions. These algorithms have gained increasing attention in recent years for their ability to provide accurate and automated solutions for irrigation scheduling. These methods improve prediction accuracy, simplify irrigation planning, and adapt effectively to different agricultural conditions. In this study, we focused on improving the accuracy of evapotranspiration (ETo) and soil water content (SWC) predictions to support efficient irrigation scheduling. Using daily meteorological data collected, we evaluated the performance of advanced machine learning and deep learning models, including Long Short-Term Memory (LSTM), XGBoost, a hybrid STLF+LSTM model, and Prophet. These models were used to forecast critical parameters such as ETo and SWC, which

play a key role in agricultural water management. By comparing model performance based on metrics such as mean squared error (MSE), we investigate the performance of each algorithm. For SWC predictions, the models achieved mean squared error (MSE) values of 0.0016 (LSTM), 0.0012 (XGBoost), 0.0052 (STLF+LSTM), and 0.26 (Prophet). For ETo estimation, LSTM achieved the lowest MSE of 0.0004, followed by XGBoost (0.0020), STLF+LSTM (0.007), and Prophet (0.23). The LSTM model demonstrated superior performance, particularly in ETo forecasting, with parameters set to 100 epochs, a batch size of 32, and 'relu' activation. Results indicate that while XGBoost is a reliable alternative for low data complexity, LSTM excels in capturing temporal dependencies for short-term forecasting. The Prophet model performed better in long-term predictions but was less effective for short-term applications. This study highlights the potential of selecting appropriate models to enhance the accuracy of agricultural forecasting and support sustainable irrigation practices. The results demonstrate the potential of these techniques to automate irrigation scheduling and improve water resource management in agriculture, emphasizing the importance of selecting the most suitable model for specific scenarios.

Keywords: LSTM model applications, Hybrid machine learning models, Evapotranspiration forecasting, Precision irrigation management

INVESTIGATION OF HOT PRESS JOINING OF GLASS FIBER REINFORCED PA66 AND AISI 304

BURAK KILIC*[1], ALI TANER KUZU[1], MURAT VURAL[3]

[1]Istanbul Technical University, Turkey

Abstract

This paper presents the process of joining randomly oriented glass fiber reinforced polyamide with AISI 304 stainless steel, using a hot press technique. The effect of temperature, pressure and compression time, which are the three main parameters of hot press joining, on the shear strength between the composite and metal interface was observed. The hybrid materials were joined with the temperature of the heating block at 260, 270 and 280 °C, pressure of 2, 4 and 6 bar and compression time of 15 and 30 seconds. Even if the most important parameter on shear strength is pressure, it is seen that the interaction between pressure and temperature should be taken into account when choosing the optimum process parameters. When the heating block temperature is 270 °C, there is a linear relationship between shear strength and pressure. However, the maximum shear strength was measured at the middle value of 4 bar when the heating tool temperature was 280 °C. This can be explained by the bulging of the composite from the contact zone due to the low viscosity of the polyamide at high temperatures.

Keywords: Hot press joining, Fiber reinforced polymers, GFRP, GFRP composite, AISI 304

COMPREHENSIVE PROFIT OPTIMIZATION FOR E COMMERCE FIRMS UNDER RESOURCE CONSTARINTS

HAVVA ABUKAN*[1], YUNUS EROGLU[2], ZULAL KENGER[2]

[1]Gaziantep University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Department Of Industrial Engineering, Gaziantep, Turkiye
[2]Gaziantep University, Department Of Industrial Engineering, Gaziantep, Turkiye

Abstract

The rapid evolution of e-commerce, driven by digital transformation, has increased the need for firms to make strategic decisions under operational and financial constraints. To maintain profitability and competitive advantage, companies must navigate limitations in inventory, advertising budgets, warehouse capacity, and profitability targets through data-driven planning. This study introduces a linear programming (LP) model that addresses profit maximization in a multi-product, multi-firm e-commerce environment under real-world constraints. The model considers ten independent firms, each offering nine products across three categories. Audio, Input, and Control. For each product, parameters such as unit cost, selling price, advertising efficiency, stock availability, and product volume are incorporated. Firm-level constraints include total advertising budget, warehouse capacity, and minimum profit thresholds. The model is based on operational data from a real e-commerce company to reflect current digital business dynamics. It was implemented in Python using the Pulp optimization library and solved via the Simplex algorithm. The results reveal differentiated firm-level strategies based on resource profiles and product characteristics. Some firms prioritized high-margin products, while others allocated larger advertising budgets to responsive products to enhance sales. This model enables data-driven, constraint-aware decisions and provides a scalable optimization framework adaptable for future strategic extensions.

Keywords: E-commerce, Profit maximization, Linear programming, Optimization, Advertising strategy, Inventory constraints, Simplex method

CEMENT POWDER EFFECT ON THE STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF AL 5 5ZN 2 5MG 1 5CU ALLOY ALUMIX 431

AYSE NUR ACAR*[1]

[1]Cukurova University, Turkey

Abstract

Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu alloy (Alumix 431) alloy is a lightweight alloy and has high strength. Due to these properties, this alloy is used widely in industrial areas such as aerospace, etc.. Easy and cheaper production method (powder metallurgy) and traditional additive products (metal, glass, cement powders etc.) are applicable for producing aluminium-based alloys and improving and enhancing of these properties of this alloy. It has been examined the effect of Portland limestone cement on the structural property, surface morphology of this alloy. A homogenous powder mixture consisted of Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu alloy and 15wt% Portland limestone cement was prepared. This homogeneous mixture was pressed to 0.6 ton shock pressure and pressed green sample sintered at 800°C temperature in a furnace for a hour, then cooled to room temperature in same place. The physical properties of these green and sintered composite materials, including of water absorption measurements, weight loss measurements, were performed. Surface topography and structural properties were characterized using scanning electron microscopy images, energy-dispersive X-ray spectroscopy spectra. On the sintered material, increases in diameter and height were observed. Crystal phases among Portland limestone cement and Alumix 431 alloy occurred. Water absorption values were recorded as 3.73 % for green composite material, 8.84 % for sintered composite material.

Keywords: Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu alloy, Portland Limestone-Cement, Powder metallurgy, Structural property, Surface morphology

Introduction

Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu alloy which is Alumix 431 alloy, is one of the Aluminium -7xxx series alloys. This alloy consists of Al, Mg, Zn and Cu and has low density, high strength, corrosion resistance and also applied on the aerospace and automotive industry [1]. Powder metallurgy method is one of the manufacturing of aluminium derived alloys with different additives (such as metal, glass powder *etc*.) in order to enhance physical and chemical properties of these alloys [2, 3]. Authors prepared mixture consisting of alumimum with at proportions of 2-8% glass powder and pressed on 520 MPa pressure. These green mixture compacts were sintered at 605°C temperature for 2 hous. They obtained that the strength of composite sample increased with glass adding in the aluminium matrix, owing to decreasing of porosity and increasing of relative density [2].Portland Limestone cement (PLC), applied in this study in order to produce aluminium-PLC composite material has a important a role on the low depletion, energy storage for manufacturing

of clinker and reducing of CO_2 gases. On this study, It has been investigated the effect of Portland limestone cement on the structural property, surface morphology of this alloy.

Material and Method

The chemical compositions of Alumix 431 powder was given in [3, 4] and the chemical composition of Portland limestone cement obtained from was given as 5.00% (±0.12) of SiO_2, 1.28% (±0.04) of Al_2O_3, 2.77% (±0.03) of Fe_2O_3, 0.29% (±0.01) of TiO_2, 3.24% (±0.16) of SO_3, 60.84% (±0.014) of CaO, 0.40% (±0.02) of MgO, 1.03% (±0.02) of K_2O and 25.15% (±1.73) of other substances [5].Alumix 431 powder was blended with 15% (wt) of PLC powder because of obtaining a homogeneous Alumix 431 -PLC powder mixture. This homogeneous mixture was pressed under 0.6 ton shock pressure and pressed sample sintered at 800°C temperature in furnace for 1 hour and then, sintered sample cooled to room temperature in the same place. Green and sintered Alumix 431-15PLC composite samples were prepared. The physical properties of these composite materials were investigated. Dimensional changes of these samples were measured, water absorption test was experimented to samples waited in pure water for 24h Weight gain/loss measurements of green and sintered composite samples immersed in 3.5% sea salt solution were performed for 5, 30 min, 1, 24 and 48 h waiting time. Morphological and microstructural properties of these composite samples were examined using Scanning Electron Microscope (SEM) images, and Energy Dispersive Spectrometry (EDS) by FEI Quanta 650 Field Emission SEM device. Also, porosity measurements of these samples were calculated by ImageJ Image Processing and Analysis in Java from their SEM images

Results and Discussion

Particle shape of Alumix 431 obtained from Ecka Granule in Germany is irregular shape that showed the compactibility of this powder [3, 6]. Particle size distribution of this sample presents normal distribution and mean particle size distribution (D_{50}) of this powder 156.0 µm [3, 6].

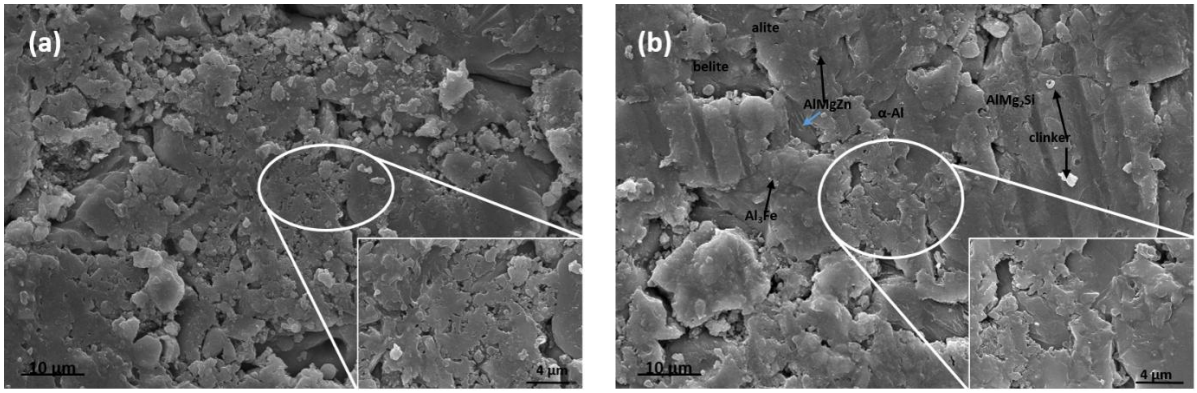


Figure 1. The SEM images of Alumix 431-15PLC green (a) and sintered (b) composite samples

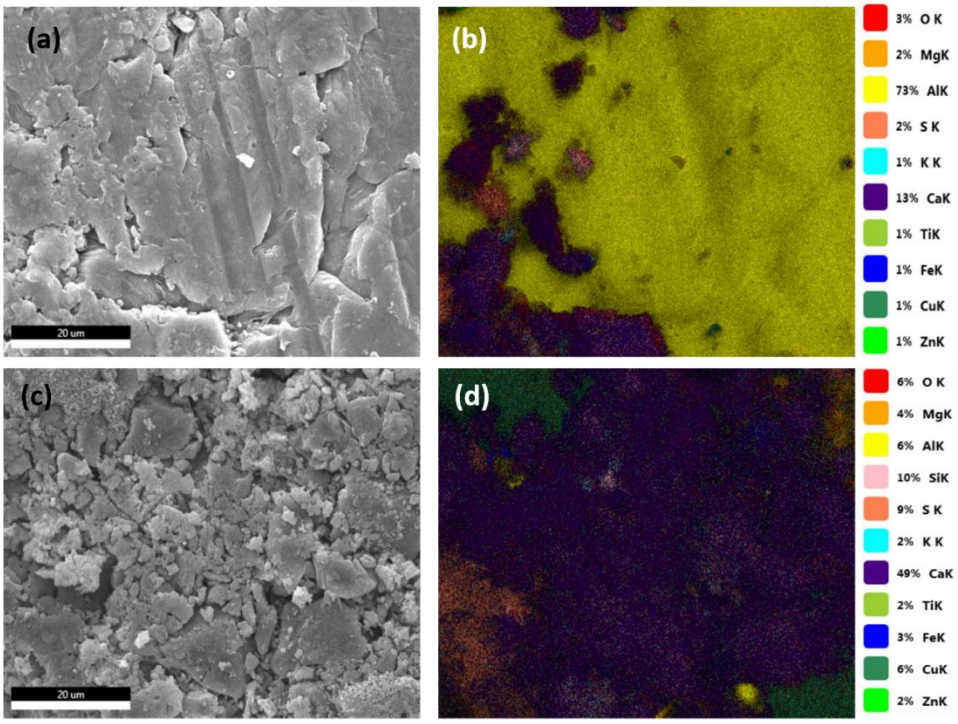


Figure 2. The SEM Images of Alumix 431-15PLC green (a) and sintered (c) composite samples and EDS Mapping Images of Alumix 431-15PLC green (b) and sintered (d) composite samples

In order to obtain homogeneous melting and enable better wetteability among matrix and reinforcement particles, sintering was happened at 800°C temperature selected [7]. This sintering temperature allows on obtaining a denser structure because of plastic flow. However, the amount of the plastic flow was not adequate for filling up all the porosity in sintered composite sample. Figure 1 and 2 shows the SEM images and EDS Mapping images of green and sintered Alumix431 -15PLC composite samples, respectively. It is observed that microstructure of sintered composite sample still has a porous structure [8] see in Figure 1(c), according to the Figure 1(a). Few agglomeration and pores are appeared due to formation of accumulation of particle and insufficient blending of matrix and reinforcement particles. Insufficient mixing can be caused to decrease the strengthening mechanism of sintered composite sample. It can be considered that this can be related to high viscous of matrix or reinforcement materials.[9]. This sintering temperature is also important for needed energy for calcination which is endothermic reaction of PLC powder [10]. On the Figure 1 (b), the grain structure of composite sample shows the finer grains with existence of α-Al, Al_3Fe, Al Mg_2Si intermetallics, alite, belite and clinker phases because of matrix and reinforcement materials [11-13]. Portland limestone cement consisting of abundantly of calcite (60.84 %), silicate (5.00%), hematite (2.77 %) and aluminate (1.28%) enables much stable chemical composition for composite sample and decreases detrimental effects [14]. The elements (Ca, Si, Fe, S and Al) appeared on the EDS mapping images of sintered composite sample see in Figure 2 (c and d). From Figure 2, EDS mapping images of both green and sintered composite samples show the presence of all elements in the Alumix 431 and PLC. As major elements for green composite sample, it was recorded that Al and Ca elements were 73.0% and 13.0% , respectively (see in Figure 2(b)). But for sintered sample, it was determined that were 6% for Al and Cu, 4 % Mg and 49% Ca as main elements, respectively (see in Figure 2(d)). Also, the existence of Fe and O demonstrates the transfer of Fe besides of occurring of an oxide layer [15]. In addition, the wettability among matrix and reinforcement particles enhances owing to existence

of Mg element [9] (4% from Figure 2(d). This leads to less porosity on the sintered composite sample [9] This will be presented on the porosity measurements of green and sintered composite samples see in Table 2.

Dimension changes of green and sintered Alumix431-PLC composite samples were compared. Increases in diameter, height and therefore volume of sintered samples were observed according to green sample. For increase in diameter, height and in volume were recorded as 12.35%, 7.81% and 30.58%,respectively. These dimensional increased can be related to particle, neck growths and formation of 3D framework [16].

Table 1. The Water absorption and Calculated porosity (%) values of green and sintered Alumix431 -15PLC composite samples

	Water absorption (%)	**Calculated porosity (%)**
Alumix 431-15PLC (green)	3.73	7.73
Alumix 431-15PLC (sintered)	8.84	5.44

Table 1 gives the water absorbtion and calculated porosity (%) values of green and sintered Alumix 431-15PLC composite samples. Water absorbtion value of sintered composite sample has higher than that of other sample. On the sintered composite sample, increasing of water absorption can be based on larger pores owing to because of high surface area [17]. Porosity value of sintered composite sample is low according to the green sample. It can be related to occurring of cement powder having larger particle size and accumulating of PLC powder [17]. There are pores among particles. These pores are closed throughout sintering stage to produce sintered product. Closing of pore is incomplete and some residual porosity will remain [18]. Decreasing of porosity can be related to grain growth of calcium aluminate and magnesium spinel crystals which fills the pores and cavities in the matrix [19]. Calcium aluminate is occurred at high temperature that characterized with a network structure because of aluminum, alumina and calcium oxide content in the green sample [19].

Table 2. The Weight gain/Loss of Green and Sintered Alumix-431 -15 PLC composite samples

	Alumix 431-15PLC (green)	Alumix 431-15PLC (sintered).
Dry weight (g)	0.0407	0.0871
% change (5 min)	0.737	4.937
% change (30 min)	-0.490	-0.547
% change (1 h)	-0.735	-0.440
% change (24 h)	4.444	2.210
% change(48 h)	0.236	0.324
%Total change (5 min-48h)	4.177	6.544

In order to estimate corrosion test of PM parts, applied the standart technique is immersion weight gain/loss method [20]. Table 2 shows dry weights, % weight changes of these samples immersed in 3.5% sea salt solution for 5, 30 min, 1, 24 and 48 h waiting time. Weight gain of these samples can be related to the formation of dense Al_2O_3 protective film that protect further oxidation [21]. Least weight gain can be based on low porosity and permeability and thus penetrating and accumulation of chlorine ions of sea salt solution [22]. Increasing of weight gain was mainly occurred pores because of ettringite formation, as sulfate ions react chemically with hydrated calcium aluminate in the existence of calcium hydroxide [23]. Weight losses can be caused to breakdown of the cement paste matrix, the loss of cement hydrated products, free and binded water that related to breakdown of $Ca(OH)_2$ [23]. Weight loss values of these samples can be related to existence of reactive fine particle clinker, also. When in contact with water, these clinker particles react that caused to occurring of extra hydrate products [24]. These hydrates accumulate in the pores and decrease porosity of composite sample. Therefore block the penetrating of chlorine and sodium ions. This process increases the pH solution [24]. This results to weight gain in the composite samples.

Conclusion

On this study, PLC effect on the structural and morphological properties of Alumix 431 was examined. Following experimental results are briefly given:

-PLC powder in the structure of sintered matrix alloy has homogeneous distribution and agglomeration due to good bonding between PLC powder particles and matrix alloy.
-Increases on all dimension of sintered composite sample determined,
-porosity of green and sintered composite sample decreased.
-Water absorption of green and sintered composite samples increased.
-Weight gain on the these samples were recorded.

If higher pressure and higher sintering temperature is applied, pores closes, physical properties can be enhanced. Experimental studies such as thermal properties, corrosion resistance are needed to investigate the industrial usability of these materials.

Acknowledgement: This study was not supported by any project.

Also, author thankful to Assoc. Prof. Dr. Dogan Kaya, Prof. Dr. Abdul Kadir Eksi and Prof. Dr.Ahmet Ekicibil for their valuable recomments.

References:

[1] S. Toros, F. Ozturk, I. Kacar, Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys, Journal of materials processing technology 207(1-3) (2008) 1-12.
[2] D. Kumar, C. Loganathan, R. Narayanasamy, Effect of glass in aluminum matrix on workability and strain hardening behavior of powder metallurgy composite, Materials & Design 32(4) (2011) 2413-2422.
[3] A.N. Acar, R.N. Mutlu, D. Kaya, A.K. Ekşi, A. Ekicibil, Fe addition influence on the mechanical and thermophysical behaviours of PM Alumix 431 alloy, Journal of Molecular Structure 1232 (2021) 130031.
[4] A.N. Acar, D. Kaya, A.K. Ekşi, A. Ekicibil, The impact of glass powder on surface and morphological properties of Alumix 431 alloy, The International Journal of Materials and Engineering Technology 7(1) (2024) 32-37.
[5] A.N. Acar, Kaya Dogan, Eksi Abdul Kadir, Ekicibil A., Corrosion, Hardness, and Thermal Analysis of Martensitic Stainless Steel Composites with Glass and Cement Additives.
[6] A.N. Acar, R.N. Mutlu, A.K. Ekşi, A. Ekicibil, B. Yazıcı, Effect of temperature and pressure on mechanical, surface and electrochemical properties of Al-1.5 Cu-5.5 Zn-2.5 Mg (Alumix-431), Anti-Corrosion Methods and Materials 65(6) (2018) 558-571.
[7] S. Singh, A. Gupta, V.S. Sharma, R. Harichandran, Production and high temperature wear characterization of AA 7075/Al2O3/Graphite hybrid nanocomposites by enhanced stir and ultrasound assisted casting method, Materials Research Express 6(12) (2019) 125072.
[8] C.-H. Chen, J. Chiou, K.-S. Wang, Sintering effect on cement bonded sewage sludge ash, Cement and Concrete Composites 28(1) (2006) 26-32.
[9] N. Singh, R. Belokar, R. Walia, Experimental investigation on microstructural and mechanical attributes of Al 7075-T6/SiC/CR/MoS2 based green hybrid composite via advanced vacuum-sealed bottom pouring stir casting, Silicon 14(13) (2022) 7643-7665.
[10] S. Telschow, F. Frandsen, K. Theisen, K. Dam-Johansen, Cement Formation A Success Story in a Black Box: High Temperature Phase Formation of Portland Cement Clinker, Industrial & engineering chemistry research 51(34) (2012) 10983-11004.
[11] L. Li, S. Ji, Q. Zhu, Y. Wang, X. Dong, W. Yang, S. Midson, Y. Kang, Effect of Zn concentration on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si-Zn alloys processed by gravity die casting, Metallurgical and Materials Transactions A 49(8) (2018) 3247-3256.
[12] P.V. Kumar, G.M. Reddy, K.S. Rao, Microstructure, mechanical and corrosion behavior of high strength AA7075 aluminium alloy friction stir welds–Effect of post weld heat treatment, Defence Technology 11(4) (2015) 362-369.
[13] P.E. Stutzman, J.W. Bullard, P. Feng, Quantitative imaging of clinker and cement microstructure, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology2016.
[14] M.S. Kırgız, Strength gain mechanism for green mortar substituted marble powder and brick powder for Portland cement, European Journal of Environmental and Civil Engineering 20(sup1) (2016) s38-s63.
[15] M. Chegini, A. Fallahi, M. Shaeri, Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on wear behavior of Al-7075 alloy, Procedia Materials Science 11 (2015) 95-100.

[16] Y. Nakagoshi, Y. Suzuki, Dimensional change behavior of porous MgTi2O5 in reactive sintering, Ceramics international 43(7) (2017) 5541-5546.
[17] M.I.I. Ramli, M.A.A.M. Salleh, M.M.A.B. Abdullah, I.H. Aziz, T.C. Ying, N.F. Shahedan, W. Kockelmann, A. Fedrigo, A.V. Sandu, P. Vizureanu, The influence of sintering temperature on the pore structure of an alkali-activated kaolin-based geopolymer ceramic, Materials 15(7) (2022) 2667.
[18] F.O. Aramide, Effects of sintering temperature on the phase developments and mechanical properties ifon clay, Leonardo Journal of Sciences 26 (2015) 67-82.
[19] E. Ewais, N. Khalil, M. Amin, Y. Ahmed, M. Barakat, Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement, Ceramics international 35(8) (2009) 3381-3388.
[20] S. Narayan, R. Ananthanarayanan, R.N. Deo, Corrosion behaviour of sinter forged aluminium composites during hot deformation, The Journal of Corrosion Science and Engineering 18(26) (2016) 1-20.
[21] Y. Yu, D. Zhou, L. Qiao, P. Feng, X. Kang, C. Yang, Highly porous Co-Al intermetallic created by thermal explosion using NaCl as a space retainer, Materials 17(17) (2024) 4380.
[22] G. Rajamanickam, R. Vaiyapuri, Investigations on self compacting concrete using fly ash and light expanded clay aggregates, Zastita Materijala (2025).
[23] G.B. Bekkeri, K.K. Shetty, G. Nayak, A. Kumar KA, Durability performance of concrete incorporated with alkali-activated artificial aggregates, Emergent Materials (2024) 1-23.
[24] L. Kherraf, S. Kherraf, N. Khaldi, M. Belachia, Mechanical Strengths, Durability, and Corrosion Resistance of Concrete with Recycled Sand, Ecological Chemistry and Engineering 32(1) (2025) 113-137.

SYNTHESIS AND ELECTROCHEMICAL PERFORMANCE INVESTIGATION OF SB DOPED Na0.66MnO2 CATHODE MATERIAL

YUNUS EMRE UYANIK*[1], ERDINC OZ[2]

[1]Ataturk University, Graduate School Of Natural Sciences, Department Of Physics, Turkey
[2]Ataturk University, Faculty Of Science, Department Of Physics, Turkey

Abstract

Enhancing the Structural Stability of Na0.66MnO2 Cathodes via Antimony Doping Sodium-ion batteries (SIBs) are a promising alternative to lithium-ion batteries (LIBs) for energy storage systems due to their abundant and low-cost raw materials. A significant challenge hindering the widespread adoption of SIBs is the poor structural stability of cathode materials, particularly over extended cycling. This study focuses on enhancing the cycling stability of Na0.66MnO2, a high-capacity cathode material. Phase transitions and volume changes that occur during electrochemical cycling are the primary causes of capacity decay in this material. To overcome this issue, we aimed to fortify the crystal structure of Na0.66MnO2 by doping the Mn sites with low levels of antimony (Sb). Our comprehensive experimental investigations demonstrate that Sb doping is highly effective at preserving structural integrity during de/sodiation processes. Characterization techniques such as SEM, XPS, and XRD were used for morphological and chemical analysis, confirming that the doped samples maintain a significantly more stable structure throughout cycling compared to pristine Na0.66MnO2. Electrochemical tests reveal that antimony-doped Na0.66MnO2 exhibits a remarkably higher capacity retention rate over long cycles. Within this study, the capacity retention results over 200 charge/discharge cycles were investigated. These findings indicate that doping the Mn sites with antimony is an effective strategy to improve the long-term performance of Na0.66MnO2 -based cathodes. This work represents a crucial step toward accelerating the commercialization of sodium-ion batteries.

Keywords: Sodium-ion batteries, Na0.66MnO2, Renewable energy, Cathode material, Structural stability, Antimony doping

SOME FORMULAS AND IDENTITIES FOR KAPPA BERNSTEIN POLYNOMIALS

AYSE KARAGENC[1], MEHMET ACIKGOZ[2], SERKAN ARACI[*3]

[1]Cappadocia University, Turkey
[2]Gaziantep University, Turkey
[3]Hasan Kalyoncu University, Turkey

Abstract

The κ-calculus originated by Kaniadakis as κ-statistics, preserving the classical framework of statistical mechanics while explaining power law tailed distributions in Kaniadakis demonstrated that κ-statistics are consistent with special relativity and defined the corresponding κ-entropy. He also presented the theoretical foundations and mathematical formalism of κ-mathematics, providing a new framework for differentiation and integration within κ-calculus. This approach paves a way to study new families of special polynomials the classical exponential function, with the κ-deformed exponential function, exp_κ (t)=(√(1+κ^2 t^2)+κt)^(1⁄κ) "with" lim┬(κ→0)⁡〖 〖exp〗_κ (t)〗 =e^t. Recently, Duran et. al. have introduced new families of special polynomials such as κ-Bernoulli polynomials (of order α), κ-Euler polynomials (of order α), Bivariate κ-Bell polynomials and κ-Stirling numbers of the second kind, via Kaniadakis calculus perspective. Also they derived both p-adic integral and determinantal representation. More recently, Karagenc et. al. have presented the generating function of κ-Bernstein polynomials that are parallel to that of classical Bernstein polynomials given by Acikgoz and Araci. In this presentation, by making use of the generating function for the κ-Bernstein polynomials, we provide not only new but also interesting explicit formulae, identities, and derivaties. We construct new relations for κ-Bernstein polynomials among falling factorials, κ-Stirling numbers of the second kind, higher order κ-Bernoulli polynomials, κ-Euler polynomials and power functions, providing closed form representations as well as several summation formulas.

Keywords: Kaniadakis calculus, Bernstein polynomials, Generating function, κ-exponential function, κ-Bernstein polynomials.

PROBABILISTIC HERMITE POLYNOMIALS ASSOCIATED WITH CERTAIN APPLICATIONS

BURCU DOGRUER DOGAN[1], MEHMET ACIKGOZ[2], SERKAN ARACI[*3]

[1]Gaziantep University, Graduate School of Natural & Applied Sciences,Turkey
[2]Gaziantep University, Turkey
[3]Hasan Kalyoncu University, Turkey

Abstract

The historical development of Hermite polynomials reveals an evolution of mathematical understanding shaped by the contributions of several prominent mathematicians. The conceptual origins of these polynomials date back to Pierre-Simon Laplace in 1810, who introduced related expressions in a form that was significantly different from their modern structure. Although Laplace's formulations were not clearly recognizable as Hermite polynomials at the time, they laid the groundwork for further exploration in this area. In 1859, Russian mathematician Pafnuty Chebyshev conducted a detailed study of polynomials that share essential characteristics with what are now known as Hermite polynomials. Despite the depth of his work, Chebyshev's contribution remained largely unnoticed by the mathematical community. The turning point came in 1864 when French mathematician Charles Hermite introduced these polynomials as a new discovery. Although not historically accurate, Hermite's work played a key role in formalizing the theory. In 1865, he further extended the concept by defining multidimensional Hermite polynomials. Because of these significant contributions, the polynomials were named after him. His work unified prior insights and laid a foundation for modern applications in mathematical physics and probability. In this paper, we derive the probabilistic Hermite polynomials and establish new relationships between these polynomials and the Stirling numbers of the second kind, probabilistic Stirling numbers of the second kind, and derivative relation in terms of probablistic Hermite polynomials. By making use of their generating functions, we derive explicit identities. In special cases, the obtained results reduce to classical one. Additionally, by choosing appropriate random variable, we obtain new identities including Bernoulli numbers of negative order, falling factorial and Bell polynomials.

Keywords: Probabilistic Hermite polynomials, Bernoulli polynomials, Bell polynomials, Random variable, Generating functions

EMPIRICAL VALIDATION OF AN INTEGRATED MCDA LCA DECISION FRAMEWORK FOR 3D PRINTING ADOPTION IN HIGHER EDUCATION FACILITIES MANAGEMENT

MUHAMMAD TUSKHEER ABID[*1]

[1]Hamad Bin Khalifa University, Qatar

Abstract

Higher education facilities management often faces challenges in selecting suitable applications for 3D printing, with conventional approaches relying on limited evaluation criteria and subjective judgment. This can lead to inefficient allocation of resources and restrict the broader adoption of cost-saving and sustainable technologies. This study presents the empirical validation of an integrated decision framework that combines Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and Life Cycle Assessment (LCA) to guide systematic adoption of 3D printing in university facilities management. The integrated framework includes both technical and economic assessment using MCDA, and an environmental evaluation using LCA. It is applied to approximately 30 commonly used facility components within a university setting. Components are assessed across a range of quantitative criteria, such as material properties, geometric complexity, manufacturing feasibility, demand patterns, lifecycle cost, lead time, and stakeholder requirements. Environmental metrics within the LCA include carbon emissions, material and energy consumption, waste generation, and end-of-life impact. Validation involves comparing framework outcomes to traditional procurement processes, using performance benchmarking to measure selection accuracy, evaluation efficiency, cost minimization, and reductions in environmental impact. Results demonstrate that the integrated MCDA-LCA approach identifies optimal 3D printing candidates more effectively, improves cost optimization, and advances sustainability targets over current practices. This research establishes a replicable and practical methodology for facilities managers seeking to implement 3D printing with greater confidence and accountability. The findings contribute to evidence-based decision-making in higher education, allowing facility managers to balance operational efficiency with environmental responsibility. Other institutions aiming to improve maintenance processes and sustainability within their facilities operations can adapt the proposed framework, which supports informed technology adoption..

Keywords: MCDA-LCA integration, 3D printing adoption, Higher education facilities, Life cycle assessment, Sustainable decision-making, Additive manufacturing, 3D printing

SEQUENTIAL REBALANCING FRAMEWORK FOR STOCHASTIC U-SHAPED DISASSEMBLY LINES

LANA MANLA ALI[1], EREN ÖZCEYLAN[1], SÜLEYMAN METE[1]

[1] Gaziantep University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Gaziantep, Turkiye

Abstract

In dynamic remanufacturing environments, disassembly lines face challenges and disruptions. These could be, fluctuations in product demand or supply, changes in product design, task failures, etc. This impose the need for the line to be re-balanced. Existing studies typically treat rebalancing as a one-time adjustment, repeatedly re-optimizing from an initial configuration without considering how decisions evolve over time. In contrast, this paper highlights that previous configurations influence future ones, and that the rebalancing process should be considered as sequential and observed over multiple periods of time. A framework is proposed to demonstrate how demand-driven rebalancing costs evolve and when line stabilization occurs, offering a practical guideline for horizon planning and more resilient decision-making.

Keyword: Disassembly Line, Rebalancing, Demand-driven, Sequential, Multiple-period.

1. Introduction

The need for efficient end-of-life (EoL) product recovery systems has become a core requirement over the past few years. Manufacturers are facing increasing pressures to create sustainable and efficient systems. With different strategies that could be adopted, the reuse of EoL products emerged as an important approach contributing to both, the reduction of environmental pollution and manufacturing costs. The disassembly process plays a critical role in the product recovery systems, where disassembly enables the extraction of the valuable and hazardous components and materials out of a certain product. However, organizing this disassembly process is challenging, and here where the line balancing problem comes into the line.

The disassembly line balancing problem "DLBP" is a wildly studied problem in the literature, where it involves assigning disassembly tasks to workstations in such a way that satisfy task precedence relations based on optimizing a one or more performance measure [16]. However, in dynamic remanufacturing environments, disassembly lines face challenges and disruptions. These could be, fluctuations in product demand or supply, changes in product design, task failures, etc. Such disruptions could impact the feasibility of the disassembly line where a line becomes no longer balanced under such conditions. This impose the need for the line to be re-balanced in order to make it feasible and efficient again. Several studies in the line rebalancing literature have explored rebalancing as a one-time adjustment, which means they rebalance/reoptimize an initial line repeatedly and assess its consequences without taking into consideration how rebalancing decisions are connected and influenced over time. In contrast, this paper highlights that previous configurations matter and influences future ones, and that the rebalancing process should be considered as sequential and observed over time.

The line rebalancing literature on assembly lines is rich, with various models and techniques introduced. Many studies such as [18-19], [3], [30], [31], and [10], considered various heuristics and meta-heuristics approaches in the context of rebalancing assembly lines. On the other hand, exact methods were also developed where the objectives where to minimize the costs associated with the rebalancing process, studies such as [9] who proposed a binary model to minimize the number of temporary workers due to demand fluctuations. [5] presented a model to minimize costs associated with workforce rearrangements and overload. [22-23] proposed models that aims to minimize equipment costs and line modifications. [27] presented a branch and bound and a mixed-integer programming (MIP) model to handle workstation failures. A paper of [32] addressed the two-sided assembly line layout in the rebalancing literature, while [28] considered a U-shaped layout proposing a genetic algorithm approach incorporating stochastic task times in their approach. [12] presented a comprehensive review, highlighting the lack of attention to uncertainty and different layout structures such as U-shaped and two-sided layouts with only few studies addressing it, showing a need for increased research in this area. Unlike assembly line literature, the rebalancing of disassembly lines is still a largely underdeveloped area, with only three studies addressing it. [4] introduced a predictive-reactive mixed-integer programming (MIP) model where rebalancing is triggered by task failures. [24] proposed a novel MIP model where rebalancing is supply-driven and the objective is to minimize the rebalancing costs as the supply of returned products vary. A recent paper of [29] applied a Q-learning based multi-objective genetic algorithm, considering task failures as a rebalancing trigger.

Despite these contributions, all existing studies still treat rebalancing only as a reactive one-time process, without considering the sequential nature and the dependency of configurations on each other over time. Therefore, this study proposes a sequential framework developed over multiple periods where each rebalancing step is based on the previous period's configuration and not just on an initial fixed line configuration. The proposed work fills a clear gap in the line rebalancing literature for the need to consider such a novel approach and provide other research and practitioners a guideline on sequential rebalancing. In addition, to add another layer for the study, we considered testing the framework on a U-shaped line layout incorporating stochastic task times in its concept.

2. Materials and Methods

Among different disassembly line layouts, the U-shaped line layout has gained a lot of attention due to its significant advantageous compared to other layouts [1], [6-7]. U-shaped lines are known for their flexibility and enhanced space utilization due to its bidirectional nature where tasks and operators can be assigned to both sides of the line. Figure 1 illustrates a comparison between task assignments solution for a traditional straight disassembly line vs. a U-shaped disassembly line. Both solved under the same parameters with a cycle time of 20 units for an 8-task example adapted from [21]. As shown in Figure 1(a), the straight line requires five stations to execute all tasks while satisfying precedence and cycle time constraints. In contrast, in Figure 1(b), the U-shaped line achieves the same objectives using only four stations, highlighting one of the other key advantageous of the U-shaped layout, which is the enhanced station utilization. In this paper, we are considering adopting the U-shaped line for testing the proposed framework. We are assuming that tasks could be assigned on both sides of the line as shown in Figure 1(b), where a task is assigned either to the entrance (top) or exit (down) side of the line, while still respecting the precedence relations among the other tasks.

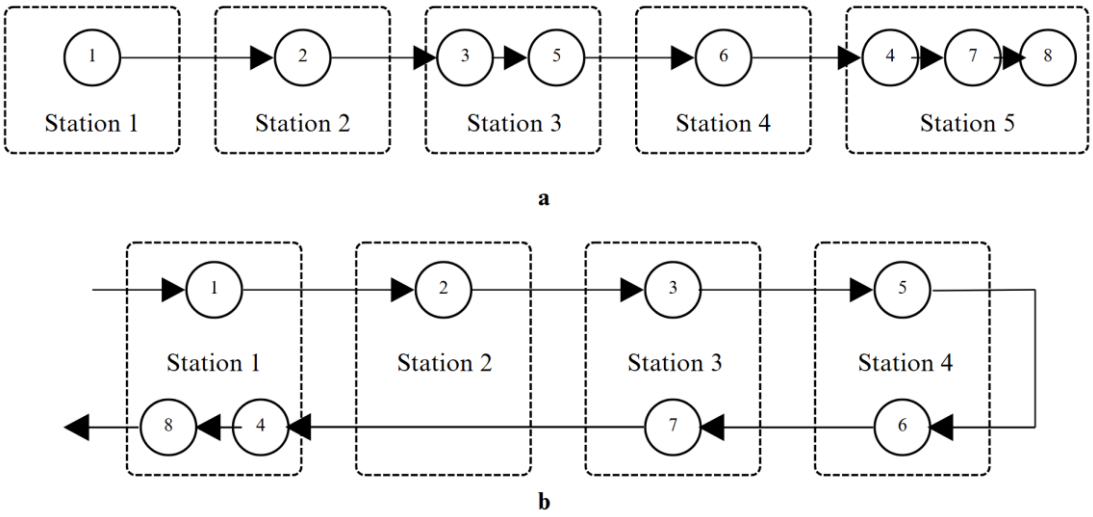


Figure 1. Traditional (a) and U-type disassembly line (b) with a cycle time of 20 units

2.1 Sequential Rebalancing Framework

Nowadays, the need for more flexible and responsive remanufacturing environment is increasing as companies aims to remain responsive to customer demands. Changes in component and parts demanded can affect the balance of the line. Thus, it is more practical to rebalance the line rather than rebuilding it from zero to accommodate such changes. Line rebalancing in this context refers to the process of adjusting the task-to-station assignment of the disassembly line in order to adapt to the changes that caused the line to be disrupted such as changes in supply/demand, product design, task durations, or cycle time. In this study, demand fluctuations are the driving reason for the rebalancing. As demand changes, the required cycle time changes accordingly; higher demand leads to more tight cycle times, while lower demand allows for longer cycle time durations. Thus, in this paper, cycle time variations -which are demand-driven- are considered as our primary rebalancing trigger.

In this paper, our approach is to present a decision-support tool framework, that could guide companies to take informative decisions when demand of returned products changes. The adopted framework is demonstrated in Figure 2. Firstly, an initial line balance is established, as an input and a starting point. Then, rebalancing begins when demand changes. Two demand scenarios of high and low will be simulated as the line is rebalanced in response to the cycle time variations over four rebalancing periods for each scenario. Where increasing cycle times illustrates low demand and decreasing (tight) cycle times represent the high demand scenario. After the scenario generation phase, the sequential rebalancing starts based on the input embedded. In every rebalancing period, the line configuration must be tracked and kept in a memory so that the line could be tracked and linked over time as the process is sequential and not isolated, and every period is shaping the next. Thus, prior configurations are considered the starting point for the current and future configurations. Based on that, the line is rebalanced where the objective is to minimize the costs associated with rebalancing which involves:

- Station operating cost: a fixed cost value incurred for active stations in each rebalancing period.

- Task relocation cost: is incurred when a task is assigned to a different station than in the previous period.

Subject to task assignment (in our case respecting the U-shaped layout), precedence relations constraints and the chance-constrained cycle time which is expressed in Equation (1) where:

- μ_i is the mean of task i
- σ_i^2 is the variance of task i
- $z_{1-\alpha}$ is z-score for confidence level α
- W_m is a set of tasks assigned to station m
- CT_p is the updated cycle time in period p

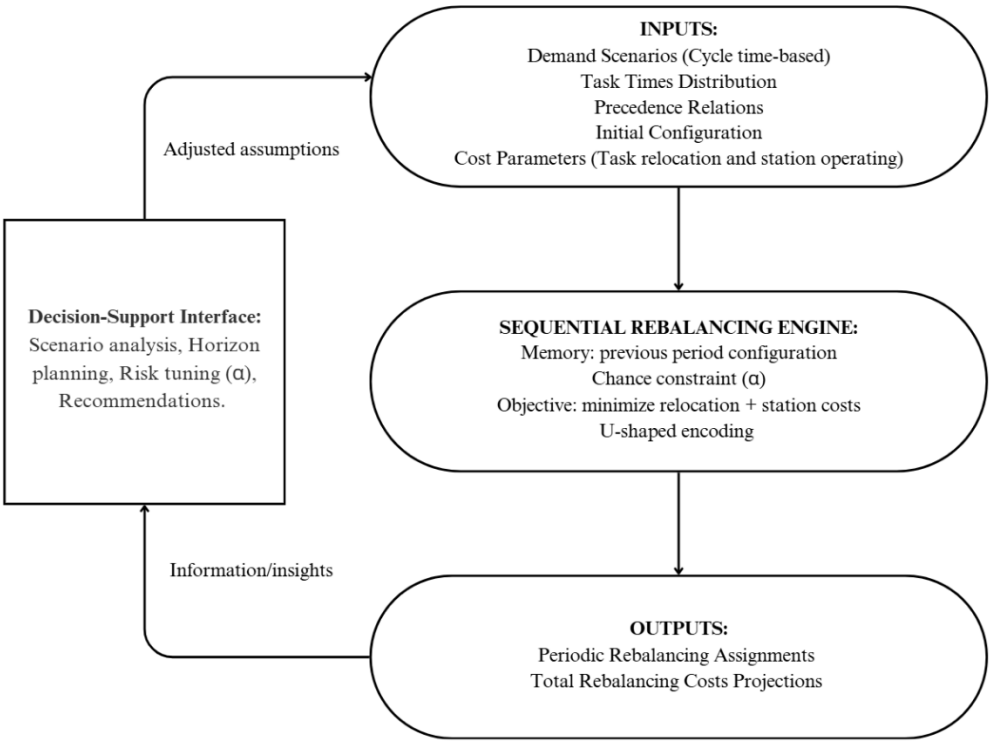


Figure 2. Decision-support framework adopted for the sequential rebalancing

The chance-constraint in Equation (1), requires that the probability of completing all tasks assigned to a workstation within the allowed cycle time is no less than a confidence level (1−α), [11].

$$P\left\{\sum_{i\in W_m}\mu_i + z_{1-\alpha}\sqrt{\sum_{i\in W_m}\sigma_i^2} \leq z_m \cdot CT_p\right\} \geq 1-\alpha \quad \forall m \qquad (1)$$

Outputs such as task assignments in each rebalancing period and the total rebalancing costs associated can be displayed, providing decision-makers informative data for better planning and analysis.

By addressing explicit costs and probabilistic feasibility conditions, the framework offers a tool and guideline for practitioners facing dynamic demand and uncertain task performance.

3. Results and Discussion

To demonstrate the efficacy of the framework adopted, an instance of 22 tasks from the literature obtained from [20] is coded in accordance to the framework in Figure 2 and solved via GAMS software. The deterministic task processing times are presented in Table 1. An initial U-shaped line balance was created with a cycle time of 50 units, and then the line was rebalanced assuming a change in demand. Four rebalancing periods are executed under high-demand (tightening cycle times) and low-demand (relaxing cycle times) scenarios.

Table 1. Deterministic task times for the 22-task instance

Task No.	Processing Time	Task No.	Processing Time
1	10	12	19
2	6	13	12
3	12	14	6
4	17	15	4
5	9	16	17
6	19	17	10
7	9	18	6
8	15	19	16
9	6	20	7
10	11	21	14
11	1	22	19

To incorporate stochasticity, the task times are assumed to be normally distributed and generated under two coefficients of variance (CV), a 0.1 for low and a 0.25 for high CV level, [26]. For the chance-constrained cycle time a three level of confidence are chosen as 0.90, 0.95, and 0.975 according to [8], [10], [11], and [14]. The resulting rebalancing costs are presented in Figure 3. For the high demand scenario, as cycle time decreases (e.g., 46 → 40 → 37→ 34) over four rebalancing periods, costs generally increased over time as tighter cycle times forced more frequent relocations and additional stations. This effect was clearer under higher variability (CV = 0.25), where the chance-constraint imposed stricter feasibility requirements, producing more conservative (and costly) solutions. In some cases, particularly at CV=0.25 and higher confidence levels (0.95 and 0.975) the solver could not find a feasible solution, reflecting the practical trade-off managers can face between reliability and cost in real-life.

In contrast, the low-demand scenarios showed an opposite trend, where the initial costs were relatively high but quickly dropped and stabilized in later periods in CV=0.1. This shows how sequential rebalancing actually help stabilizing the line over time and because every period is based on the previous period configuration, our solver tended to stick with the same configuration in later periods showing that at some points, no further reallocations are needed. In the high variability case CV= 0.25, initial costs appear to be elevated at the first period compared to the low variability case and then costs drops over time and slight stabilizations are obtained which are especially evident at $\alpha = 0.90$. Again, highlighting the framework's ability to capture the realistic "stabilization" behavior.

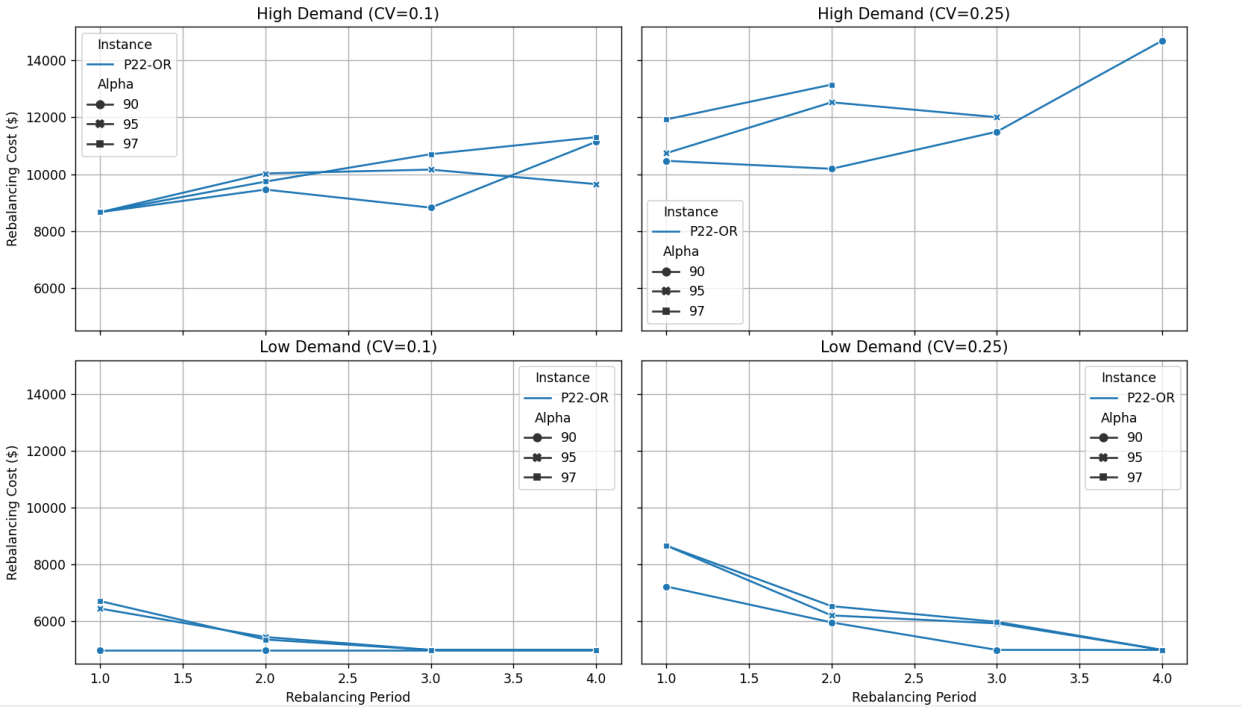


Figure 3. Rebalancing costs under different demand and CV scenarios

Overall, the results demonstrate how the framework allows practitioners to:

- Visualize how costs evolve across multiple periods, rather than just at one point in time.
- Assess the trade-offs between demand pressure, variability, and risk tolerance.
- Recognize when rebalancing is truly needed versus when the system can remain stable.

The proposed framework could be applied using either exact optimization methods or heuristic approaches, providing useful and actionable insights under diverse computational settings and practical needs.

4. Conclusions

This study proposed a sequential rebalancing framework for stochastic U-shaped disassembly lines that could guide companies to take informative decisions when demand of returned products changes, emphasizing the role of sequential rebalancing in capturing realistic dynamics over time. By incorporating demand scenarios, variability, and confidence levels, the framework demonstrates how rebalancing costs evolve and when line stabilization occurs, offering managers valuable insights into cost-risk trade-offs. Rather than a one-time optimization, the framework functions as a decision-support tool, guiding practitioners on when, and how rebalancing should be carried out, providing useful and actionable insights under diverse computational settings and practical needs.

References

1. Agrawal, S., & Tiwari, M. K. (2008). A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research, 46*, 1405-1429.

2. Agpak, K., & Gokcen, H., (2007). A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH* , vol.180, 1098-1115

3. Agpak, K. (2010), "An approach to find task sequence for rebalancing of assembly lines", *Assembly Automation, 30 (4)*, 378-387.

4. Altekin, F. T., & Akkan, C. (2012). Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines. *International Journal of Production Research, 50*, 4955-4976.

5. Altemeier, S., Helmdach, M., Koberstein, A. and Dangelmaier, W. (2009), "Reconfiguration of assembly lines under the influence of high product variety in the automotive industry – a decision support system", *International Journal of Production Research, 48 (21)*, 6235-6256.

6. Avikal, S., Jain, R., & Mishra, P. (2013). A heuristic for U-shaped disassembly line balancing problems. *MIT International Journal of Mechanical Engineering, 3*, 51-56.

7. Avikal, S., & Mishra, P. (2012). A new U-shaped heuristic for disassembly line balancing problems. *Internaional Journal of Science, 1*, 2277-7261.

8. Baykasoğlu, A. and Özbakır, L. (2007), "Stochastic U-line balancing using genetic algorithms", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 32,* 139-147.

9. Corominas, A., Pastor, R. and Plans, J. (2008), "Balancing assembly line with skilled and unskilled workers", *The International Journal of Management Science, 36*, 1126-1132.

10. Celik, E., Kara, Y. and Atasagun, Y. (2014), "A new approach for re-balancing of U-lines with stochastic task times using ant colony optimization algorithm", *International Journal of Production Research, 52 (24)*, 7262-7275.

11. Chiang, W.C. and Urban, T.L. (2006), "The stochastic u-line balancing problem: a heuristic procedure", *European Journal of Operational Research, 175 (3)*, 1767-1781.

12. Çimen, T., Baykasoglu, A. and Akyol, S.D. (2022). A detailed review and analysis of assembly line rebalancing problems. *Assembly Automation, 42,* 742-760.

13. Fathi, M., Nourmohammadi, A., NG, A. H. C., and Syberfeldt, A. (2019). An Optimization Model for Balancing Assembly Lines With Stochastic Task Times and Zoning Constraints. *IEEE Access, 7.*

14. Foroughi, A., Gökçen, H. and Tiacci, L. (2016), "The costoriented stochastic assembly line balancing problem: a chance constrained programming approach", *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice,23 (6)*, 412-430.

15. Güngör, A., & Gupta, S. M. (2001). A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. *International Journal of Production Research, 39*, 1427-1467.

16. Güngör, A., & Gupta, S. M. (1999). Disassembly Line Balancing. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Northeast Decision Sciences Institute* (pp. 193-195). Newport, RI.

17. Goksoy Kalaycilar, E., Batun, S., & Azizoğlu, M. (2022). A Disassembly Line Balancing Problem with Hazardous Task Failures. *IFAC PapersOnLine*, *55*(10), 458–465.

18. Gamberini, R., Grassi, A., Rimini, B., 2006. A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem. *International Journal of Production Research, 102*, 226-243.

19. Gamberini, R., Gebennini, E., Grassi, A., Regattieri, A., 2009. A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem. *International Journal of Production Research, 47 (8)*, 2141-2164.

20. Kalaycilar, E. G., Azizoğlu, M., & Yeralan, S. (2016). A disassembly line balancing problem with fixed number of workstations. *European Journal of Operational Research*, 592–604.

21. Li, Z., Kucukkoc, I., Tang, Q., & Zhang, Z. (2021). Models and two-phase bee algorithms for multi-objective U-shaped disassembly line balancing problem. *Optimization and Engineering, 24*, 591-622.

22. Makssoud, F., Battaïa, O. and Dolgui, A. (2014), "An exact optimization approach for a transfer line reconfiguration problem", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 72*, 717-727.

23. Makssoud, F., Battaïa, O. and Dolgui, D. (2015), "Rebalancing problem for assembly lines: new mathematical model and exact solution method", *Assembly Automation, 35*, 16-21.

24. Mete, S., Çil, Z.A., Celik, E. and Ozceylan, E. (2019), "Supply-driven rebalancing of disassembly lines: a novel mathematical model approach", *Journal of Cleaner Production, 213,* 1157-1164.

25. Özceylan, E., Kalayci, C. B., Güngör, A., & Gupta, S. M. (2018). Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions. *International Journal of Production Research, 57*, 4805-4827.

26. Silverman, F.N. and Carter, J.C. (1986), "A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages", *Management Science, 32 (4),* 455-463.

27. Sancı, E. and Azizoğlu, M. (2017), "Re-balancing the assembly lines: exact solution approaches", *International Journal of Production Research, 55 (20)*, 5991-6010.

28. Serin, F., Mete, S., and Çelik, E. (2019), An efficient algorithm for U-type assembly line re-balancing problem with stochastic task times. *Assembly Automation, 39 (4)*, 581-595.

29. Wang, K., Ma, X., Li, Y., Luo, Y., Li, Y., and Gao, L. (2025). An adaptive genetic algorithm based on Q-learning for energy-efficient e-waste disassembly line balancing and rebalancing considering task failures. *Journal of Manufacturing Systems, 80,* 1-19.

30. Yang, C., Gao, J., Sun, L., 2013. A multi-objective genetic algorithm for mixed-model assembly line rebalancing. *Computers & Industrial Engineering*, 65, 109-116.

31. Zha, J., Yu, J.J., 2014. A hybrid ant colony algorithm for U-line balancing and rebalancing in just-in-time production environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 93e102.

32. Zhang, Y., Hu, X. and Wu, C. (2018), "A modified multiobjective genetic algorithm for two-sided assembly line rebalancing problem of a shovel loader", *International Journal of Production Research, 56(9)*, 3043-3063.

TENSILE PROPERTIES Of GFRC AFTER SUNLIGHT CONDITIONING

EKREM TÜRKCANOĞLU[1], NURETTIN FURKAN DOĞAN[1], ZEYNAL ABIDIN OĞUZ[*2]

[1]Gaziantep University, Department of Mechanical Engineering, Gaziantep, Turkey
[2]Adıyaman University, Department of Mechanical Engineering, Adıyaman, Turkey

Abstract

In this study, we aimed to systematically investigate how different durations of accelerated ultraviolet (UV) exposure influence the tensile behavior of glass fiber reinforced epoxy composites, with the ultimate goal of providing a more reliable framework for predicting their long-term durability in outdoor applications. In this study, glass fiber reinforced epoxy composite plates were manufactured using the vacuum infusion method. The fiber layers were placed in a standard stacking sequence and fully impregnated with epoxy resin, followed by a curing process. For accelerated aging, the specimens were divided into three groups: the unaged control group, and two sets exposed to UV radiation for 450 and 900 hours, respectively. After aging, tensile tests were carried out on both the control and UV-exposed specimens to evaluate the effect of UV radiation on the mechanical performance of glass fiber composites. The test results revealed that UV exposure significantly influenced the mechanical performance of glass fiber reinforced composites. Compared to the unaged specimens (ultimate tensile strength 250 MPa), the laminates exposed to 450 h of UV radiation exhibited an improvement of about 7–8% in tensile strength and nearly 28% in tensile modulus, indicating a short-term post-curing effect. However, after 900 h of exposure, although the tensile strength further increased to nearly 16% above the control values (289 MPa), the fracture strain remained almost unchanged (3.2%) and the failure mode became more brittle. These findings emphasize that while short-term UV exposure can deceptively enhance tensile properties, prolonged exposure ultimately reduces ductility and damage tolerance, highlighting the necessity of protective measures for outdoor applications.

Keywords: Glass fiber, UV aging, Epoxy composite, Tensile test

1. Introduction

Composite materials have increasingly replaced traditional metallic and ceramic materials due to their high performance, low weight, and design flexibility. Fiber-reinforced polymer (FRP) systems, in particular, have found widespread use in defense, aerospace, automotive, wind turbine, marine, and civil engineering applications thanks to their high specific strength and stiffness, corrosion resistance, and cost efficiency [1]. Among these, glass fiber reinforced epoxy (GFRE) composites are among the most preferred systems in both academic and industrial fields due to their ease of production, low cost, and acceptable mechanical performance. The combination of the high tensile strength of glass fibers with the adhesion and processability of epoxy matrices results in structures that are both rigid and lightweight [2].

However, prolonged exposure of GFRE composites to outdoor conditions leads to significant degradation. Ultraviolet (UV) radiation, as one of the high-energy components of solar light, triggers photodegradation processes in the epoxy matrix, limiting the mechanical performance of

the material [3]. The effects of UV radiation on polymer matrices are typically explained by two main mechanisms: (i) chain scission**,** in which polymer chains are broken by UV photons, reducing molecular weight and softening the matrix, and (ii) oxidative cross-linking**,** which dominates during long-term exposure, leading to hardening, embrittlement, and weakening of interfacial bonds [3]. In addition, UV-induced photooxidative reactions cause surface color fading, microcrack formation, and fiber–matrix interfacial debonding, which further deteriorate structural integrity.

In this context, several studies have reported the responses of FRP composites to UV aging. Oğuz and colleagues [4–5] reported that UV exposure between 250–900 h significantly reduced both buckling and impact resistance in hybrid composites, while hardness values exhibited a bidirectional trend depending on exposure duration. For instance, short-term UV exposure increased hardness due to matrix embrittlement, whereas longer exposures caused a decline in hardness due to interfacial weakening. Similarly, in Charpy impact experiments, Oğuz [5] observed that UV aging reduced the impact resistance of intraply hybrid composites by 20–35%.

Comparable findings have also been reported internationally. Starkova et al. [6] demonstrated that short-term UV exposure increased ductility in glass/epoxy laminates, but prolonged exposure led to embrittlement due to oxidative cross-linking. Zhang et al. [7] reported that UV and moisture exposure in epoxy-based composites resulted in matrix degradation, interfacial debonding, and nonlinear variations in mechanical properties.

Collectively, these findings indicate that GFRE composites are highly susceptible to UV aging and exhibit non-monotonic changes in tensile properties depending on exposure duration, characterized by an initial increase in ductility followed by subsequent embrittlement. However, studies specifically focusing on the tensile behavior of glass fiber reinforced composites remain limited. Most prior research has concentrated on hybrid systems (glass–aramid, glass–carbon) or on buckling and impact properties. This highlights the necessity of systematic experimental investigations addressing the tensile behavior of GFRE laminates under UV aging.

The aim of the present study is to experimentally investigate the effects of accelerated UV aging (450 h and 900 h) on the tensile properties of GFRE composites manufactured via vacuum infusion. The originality of this research lies in quantifying the influence of different UV exposure durations on the tensile strength, elastic modulus, and elongation at break of GFRE laminates and comparing the results with findings previously reported in the literature.

2. Materials and Methods

The reinforcing phase employed in this study was plain-woven E-glass fiber fabric. Glass fibers, particularly E-glass, are among the most widely used reinforcements in polymer-matrix composites due to their combination of cost-effectiveness, balanced tensile properties, high specific strength, and satisfactory adhesion with epoxy matrices. Compared to carbon fibers, which provide higher stiffness but at a significantly greater cost, and aramid fibers, which offer excellent impact resistance but suffer from moisture sensitivity, E-glass provides a balanced solution especially for structural applications exposed to outdoor environments. The woven architecture

was selected instead of unidirectional fabrics to minimize anisotropy and to provide more uniform in-plane mechanical properties under tensile loading.

The polymeric binder was an epoxy resin system (MGSL 160) and its associated hardener (MGSH 160), both provided by Dost Kimya (Turkey). Epoxy resins are widely chosen for advanced composites because of their high tensile strength, excellent fiber adhesion, and relatively low shrinkage during curing. The resin and hardener were mixed in a stoichiometric ratio of 100:25 by weight, as recommended by the supplier. This proportion was selected to ensure complete cross-linking of the epoxy matrix, since deviations from the stoichiometric ratio often lead to either excess unreacted resin (causing brittleness) or excess hardener (causing plasticization and reduced stability). Table 1 summarizes the physical and mechanical properties of the fiber and matrix materials, serving as the baseline for evaluating the performance of the manufactured laminates under ultraviolet (UV) aging conditions.

Material	Property	Value / Range
E-glass fiber fabric (plain weave)	Areal density	202–210 g/m^2
	Thickness (per ply)	~0.15 mm
	Density	2.55 g/cm^3
	Tensile strength	2400–3500 MPa
Epoxy resin (MGS L160 / L285)	Density	1.13–1.17 g/cm^3
	Viscosity (25 °C)	600–900 mPa·s
	Tensile strength	70–80 MPa
	Flexural strength	110–140 MPa
Hardener (MGSH160 / H285)	Mixing ratio	100:25 (by weight)
	Pot life (25 °C)	30–40 min

Table 1. Physical and mechanical properties of raw materials used in composite fabrication.

Composite plates were produced using the vacuum infusion method. This technique was selected over hand lay-up because of its well-documented ability to improve resin distribution, reduce void content, and ensure repeatability of laminate quality. Prior studies on UV-aged hybrid and nanoparticle-reinforced composites [2] have emphasized that vacuum-assisted infusion provides a superior baseline compared to manual methods, which often introduce uncontrolled variability due to entrapped air and non-uniform resin flow.

Before infusion, glass fabrics were cut into 50 × 50 cm² square sheets to facilitate handling and repeatability. A 12-ply stacking sequence was prepared, with alternating orientations of 0° and 90°, ensuring balanced stiffness and strength in both principal in-plane directions. The lay-up was positioned onto a flat aluminum mold, which had been pre-cleaned to prevent contamination at the fiber–matrix interface. To promote uniform flow, auxiliary layers such as peel ply and flow mesh were applied above the fabric layers. The entire assembly was then sealed in a vacuum bag using a high-temperature adhesive tape to prevent leaks during infusion.

The resin–hardener mixture was mechanically stirred at controlled speed until complete homogeneity was achieved. Entrapped bubbles were carefully avoided, as air inclusions can significantly reduce the long-term fatigue resistance of composites. Once prepared, the mixture was introduced into the vacuum system. A negative pressure of approximately –0.7 bar (700 mmHg) was applied and held constant for 360 minutes, allowing gradual and uniform penetration of the resin into the fiber network. This extended infusion period minimized the probability of dry spots and voids. Maintaining stable vacuum conditions was essential, as fluctuations could result in non-uniform resin uptake and local weaknesses.

Figure 1 presents a schematic of the vacuum infusion process adopted in this study, illustrating the sequence of reinforcement lay-up, auxiliary materials, vacuum sealing, and resin infusion.

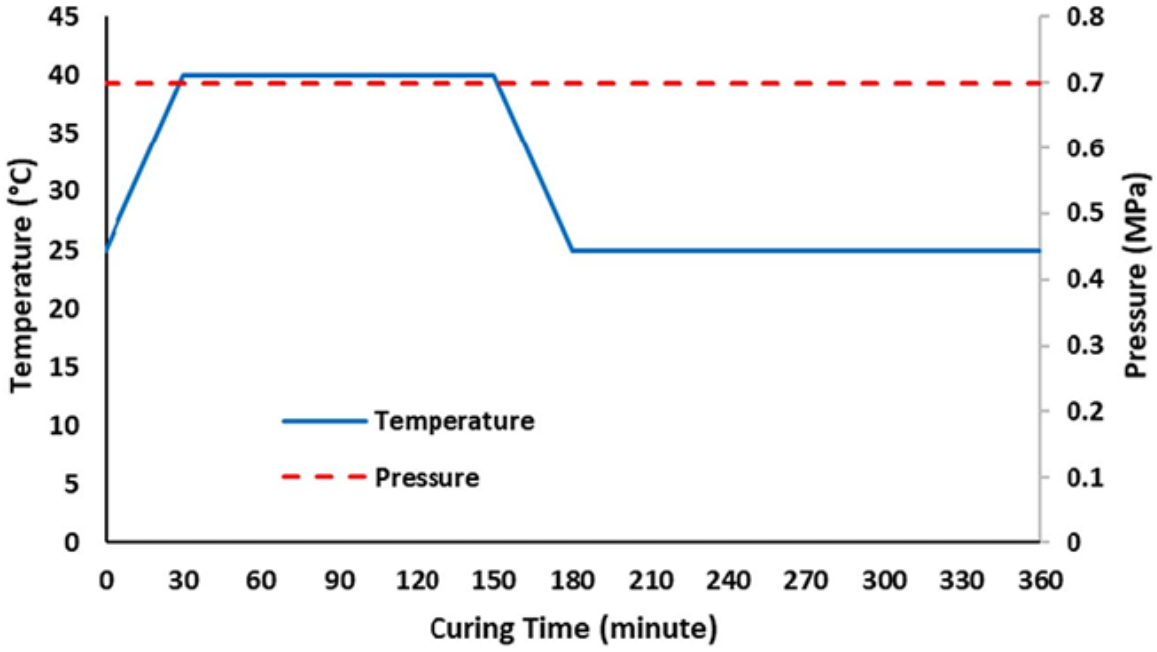


Figure1. Schematic representation for composite plate production.

Following infusion, the impregnated laminates were subjected to a two-step curing process. The initial cure was carried out at 40 °C for 120 minutes. This relatively low-temperature stage allowed sufficient cross-linking of the epoxy without inducing residual thermal stresses. Subsequently, the laminates were subjected to a 24-hour post-curing stage at ambient conditions. This extended curing was critical for completing polymerization, stabilizing the network, and minimizing dimensional changes. Such a dual curing schedule, combining mild heating and ambient stabilization, has also been recommended in prior research as a strategy to balance stiffness and toughness of the epoxy matrix, particularly for composites expected to undergo environmental degradation.

The rationale for adopting this curing schedule was to achieve laminates with adequate stiffness for structural loading while preventing over-curing, which can make the resin excessively brittle.

Earlier studies on UV-aged composites [4] have reported that incomplete curing leaves the polymer vulnerable to rapid UV degradation, while excessively cured matrices suffer from reduced impact resistance. Thus, the selected curing cycle provided a balanced and repeatable pathway.

Once fully cured, the laminates were cut into tensile test specimens using a CNC router. This approach was chosen over manual cutting techniques to ensure dimensional accuracy and to avoid machining-induced defects such as edge delamination, burrs, or surface cracks. Test specimens were prepared in strict accordance with ASTM D3039/D3039M, the standard test method for tensile properties of fiber-reinforced polymer composites. This standard prescribes specimen geometry, tabbing requirements, and surface finishing tolerances to minimize error sources during testing. Special care was taken to maintain edge smoothness and to ensure that specimens had parallel sides to avoid eccentric loading.

The prepared specimens were then subjected to accelerated ultraviolet (UV) aging under controlled laboratory conditions. Three exposure durations were selected: 0 h (control group, G0), 450 h (medium-term aging, G450), and 900 h (long-term aging, G900). These durations were chosen to simulate both short-term service environments and extended outdoor exposure. Shorter durations (450 h) were expected to highlight beneficial effects such as post-curing of the epoxy, while longer durations (900 h) were intended to reveal degradation phenomena including matrix micro-cracking, chain scission, and fiber–matrix debonding.

UV aging was conducted using a laboratory chamber equipped with UVA-340 lamps, which replicate the most damaging wavelengths of natural sunlight (around 340 nm). Specimens were placed at a fixed distance from the lamps, and exposure conditions were monitored to maintain consistency. Temperature and humidity were controlled to prevent additional environmental factors (e.g., hydrothermal degradation) from influencing the results.

At the conclusion of each UV exposure period, tensile tests were performed using a universal testing machine in accordance with ASTM D3039 standards. The parameters measured included ultimate tensile strength, maximum tensile force, strain at break, and tensile modulus. For each exposure condition (0 h, 450 h, 900 h), five specimens were tested to ensure statistical reliability and to minimize the effect of specimen-to-specimen scatter. Both group averages and representative specimens closest to the mean values were analyzed, providing complementary insights into statistical trends and single-specimen behavior. The results of these tests form the basis of the subsequent Results and Discussion section. Figure X presents the universal testing machine used in this study.

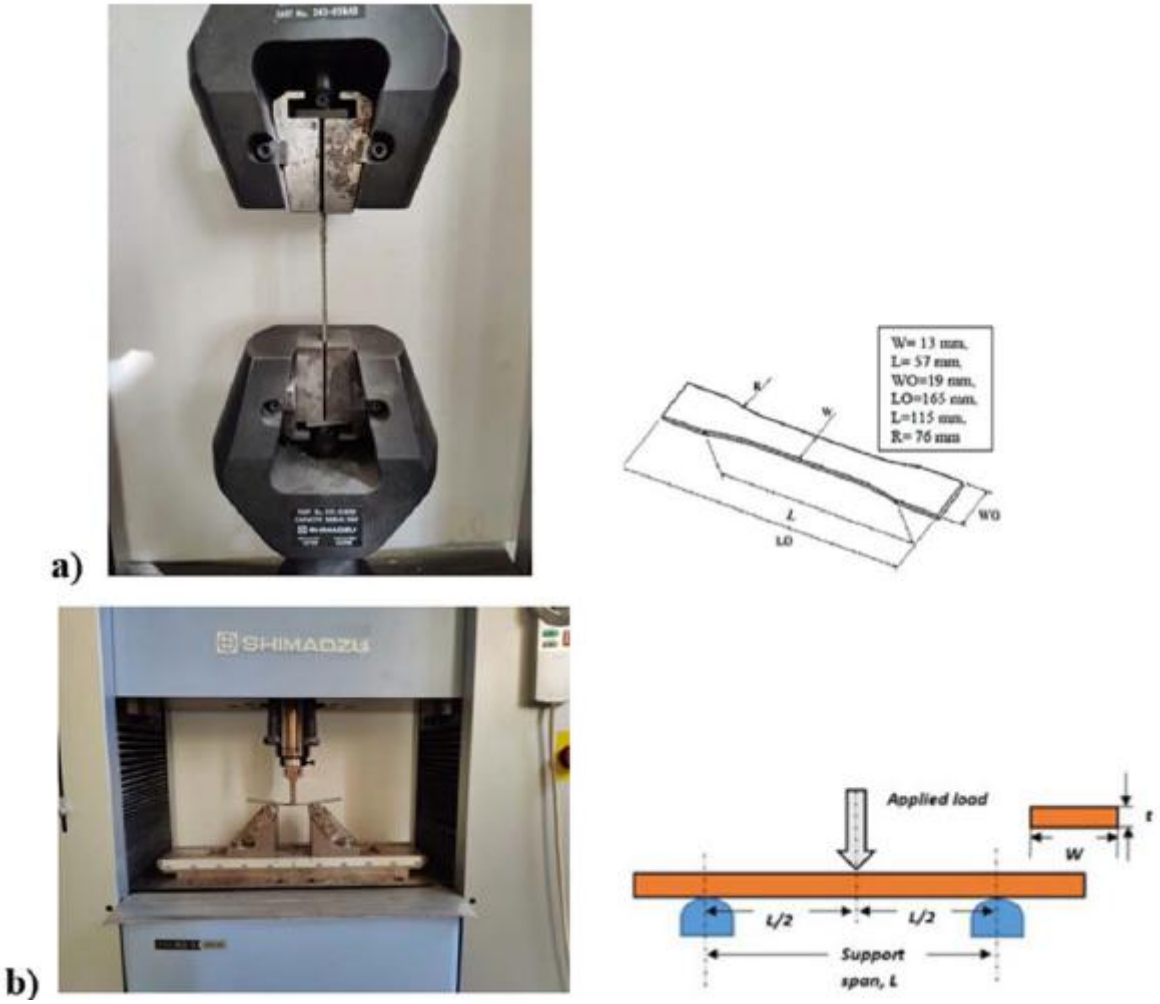


Figure 2. Schematic representation of tensile (a) and flexure (b) tests.

3. Results and Discussion

The tensile behavior of glass fiber reinforced epoxy (GFRE) composites was systematically investigated under controlled ultraviolet (UV) exposure at three distinct durations: unaged specimens (G0), 450 h aged specimens (G450), and 900 h aged specimens (G900). The experiments were performed in accordance with ASTM D3039, and both group averages and representative specimens close to those averages were analyzed. This dual approach ensures that the results capture not only the statistical population trends but also realistic single-coupon responses, which is critical in woven composites where inherent variability arises from local fiber waviness, thickness deviations, or surface imperfections.

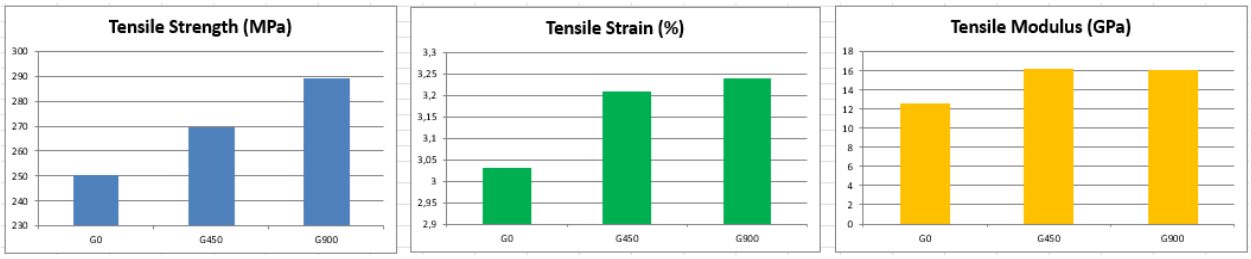


Table 2. Tensile properties of glass-fiber/epoxy composites after UV exposure (0 h, 450 h, 900 h).

As shown in Table 2 and Figure 1, the tensile strength and stiffness of the laminates increased with UV exposure, while the evolution of strain at break displayed a more complex trend.

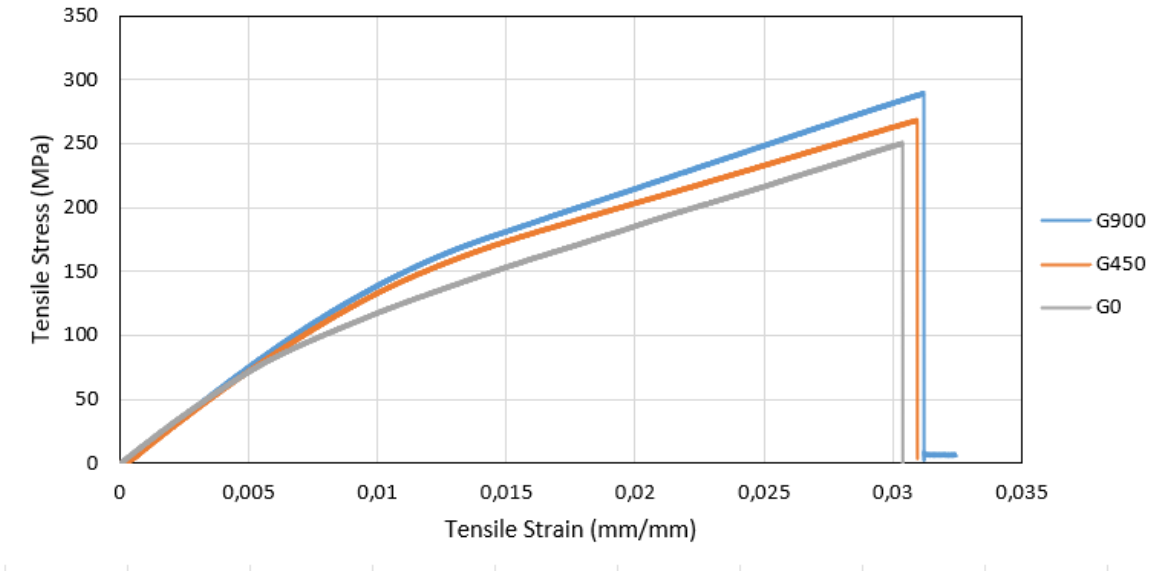


Figure 1. Tensile stress–strain curves of UV-aged composite samples (strain %).

The control specimens (G0) demonstrated a balanced mechanical performance, with an ultimate tensile strength of 250.18 ± 15.27 MPa, an ultimate tensile force of 6593.61 ± 314.30 N, fracture strain of 3.03 ± 0.54%, and tensile modulus of 12.61 ± 0.07 GPa. These values represent the baseline state of GFRE laminates produced by vacuum infusion and cured under the adopted cycle. The strain at break, although relatively modest compared to ductile polymers, is consistent with the inherently brittle nature of glass–epoxy systems where fiber-dominated stiffness restricts large-scale deformation. The relatively low standard deviation of the modulus suggests high repeatability in stiffness, whereas higher scatter in strain reflects typical fabric variability.

After 450 h of UV exposure, the specimens exhibited remarkable improvements across all measured parameters. The average tensile strength increased to 269.53 ± 11.72 MPa, about 7.7% compared to the control, while the ultimate tensile force rose to 7160.28 ± 176.66 N, an 8.6% gain. The strain at break improved slightly to 3.21 ± 0.10%, a nearly 6% increase relative to the control, and the modulus rose significantly to 16.15 ± 0.74 GPa, corresponding to 28%.

The most notable observation in this stage is the concurrent increase in both strength and deformability, which is uncommon in brittle matrix composites. This can be explained by the phenomenon of UV-induced post-curing. In this process, additional cross-linking occurs in the epoxy matrix under UV exposure, enhancing the polymer network density. This improves the efficiency of stress transfer at the fiber–matrix interface, enabling higher load-bearing capacity[2]. At the same time, microvoids and unreacted sites within the resin are reduced, resulting in better homogenization and slightly more ductile behavior.

At 900 h of UV aging, the composites reached their highest tensile strength, 289.23 ± 12.57 MPa, which is 15.6% compared to G0 and 7.3% relative to G450. The ultimate tensile force further increased to 7382.06 ± 245.19 N. However, ductility gains observed at 450 h did not continue. The fracture strain was measured as 3.24 ± 0.33%, which is essentially unchanged compared to G450 and only marginally above the baseline. The tensile modulus was 16.10 ± 0.89 GPa, very similar to G450, indicating that stiffness had plateaued.

The stress–strain curves of G900 specimens revealed steeper elastic slopes and sharper post-peak drops, indicating a more brittle fracture mode. Although the tensile strength remained higher than the control, the ductility no longer increased, signaling that matrix degradation processes had started to outweigh the benefits of post-curing. Prolonged UV radiation promotes chain scission, oxidation, and surface micro-cracking in the epoxy. Fiber-matrix debonding also becomes more pronounced, reducing the laminate's tolerance to localized stress concentrations.

A closer look at the representative stress-strain curves provides additional insight. In the G0 specimens, the curves displayed a typical linear-elastic regime followed by a moderate non-linear tail leading up to failure. After 450 h, the curves showed steeper initial slopes (higher modulus), higher peaks, and a slightly extended strain-to-failure region, confirming the beneficial effect of post-curing. These findings demonstrate that UV irradiation promotes additional cross-linking in the epoxy matrix by completing previously unreacted sites. As a result, the matrix density increases, the fiber–matrix interaction is improved, tensile strength and stiffness are enhanced, and the results become more consistent. This phenomenon is commonly referred to as the 'post-curing effect' in the literature [2], and it explains the mechanical improvements observed under short-term UV exposure. At 900 h, the initial slopes were steeper still, and the peak stress was the highest, but the post-peak region shortened considerably, showing sudden load drops and brittle fracture.

This transition from a more ductile tail at 0–450 h to a sharper drop at 900 h illustrates the trade-off between strength and deformability. It highlights that the beneficial effects of UV exposure have a time limit, after which degradation mechanisms dominate.

The results point to a two-stage mechanism governing the UV-aging process of glass fiber/epoxy laminates. In the early stage, up to around 450 h, the response is dominated by post-curing effects. Additional cross-linking in the epoxy matrix increases the modulus by nearly 28%, while the more efficient stress transfer to the fibers enhances the overall tensile strength by about 7.7%. At the

same time, void reduction and a more uniform fiber–matrix interaction allow for a slight improvement in ductility, and the scatter in strain values decreases, indicating more consistent behavior across specimens. Beyond 450 h, however, degradation processes begin to dominate. Although the tensile strength remains elevated—about 15.6% higher than the control—the rate of improvement slows, and ductility reaches a plateau with no further gains. Prolonged exposure induces micro-cracks, oxidation, and molecular chain scission within the epoxy, which progressively reduce toughness. Meanwhile, stiffness levels off, as the benefits of additional cross-linking are increasingly offset by matrix damage. This two-stage evolution aligns with trends reported in the literature for hybrid and glass fiber composites, yet the persistence of strength above baseline even at 900 h is a distinctive finding of this study. It highlights the robustness of glass fibers, which continue to carry the axial load effectively despite the advancing degradation of the polymer matrix.

Statistical analysis underscores the reliability of the results. The coefficient of variation (COV) for tensile strength decreased from 6% in G0 to 4% in G450 and remained stable in G900, indicating improved consistency with UV exposure. For strain, COV dropped sharply at 450 h but increased again at 900 h, reflecting the heterogeneity introduced by micro-damage. Modulus variability also increased slightly at longer exposure, suggesting that stiffness becomes more sensitive to localized damage mechanisms. This highlights the importance of reporting both mean values and scatter in UV-aging studies, as average data alone can obscure critical details about reliability.

From an engineering standpoint, the results indicate that short-term UV exposure can deceptively enhance the apparent performance of GFRE laminates. Stronger and stiffer behavior may be recorded in laboratory tensile tests, but this comes at the cost of reduced damage tolerance in real structures. Prolonged UV exposure exacerbates this issue, producing embrittlement even as strength remains high. Thus, while the material may not fail in static tensile tests, its resistance to impact, fatigue, and multi-axial stresses will decline.

For outdoor service applications—such as marine structures, automotive body panels, wind turbine blades, or civil infrastructure—the findings underscore the necessity of UV mitigation strategies. Options include protective coatings, gelcoats, incorporation of UV stabilizers into the matrix, or nanoparticle additives to delay matrix degradation. In design terms, allowable strains should be conservatively derated for UV-aged laminates, even if strength values remain elevated.

he originality of this study lies in focusing specifically on glass fiber reinforced epoxy laminates and systematically quantifying how different UV exposure durations (0 h, 450 h, 900 h) affect their tensile strength, stiffness, and ductility. While previous studies have often highlighted UV-induced embrittlement in hybrid composites, the present findings show that glass fiber laminates can maintain or even enhance tensile strength up to 900 h, although reductions in ductility eventually become evident. This outcome underlines the dual role of UV exposure, where short-term benefits linked to post-curing are gradually replaced by long-term degradation effects. By documenting this balance, the study provides a clearer framework for predicting the service-life behavior of GFRE composites in outdoor environments.

4. Conclusions

This study systematically investigated the tensile behavior of glass fiber reinforced epoxy (GFRE) laminates subjected to accelerated UV aging at three exposure durations (0 h, 450 h, and 900 h). The control specimens (0 h) exhibited balanced mechanical performance, with an ultimate tensile strength of about 250 MPa, a strain at break close to 3%, and a modulus of roughly 12.6 GPa, which is consistent with the expected baseline response of vacuum-infused GFRE laminates. After 450 h of UV exposure, a distinct post-curing effect was observed, leading to an increase in tensile strength by approximately 7–8% and a remarkable rise in stiffness of nearly 28%. The strain at break improved slightly at this stage, and variability decreased, reflecting more homogeneous material behavior.

At 900 h of UV exposure, tensile strength continued to rise, reaching nearly 16% above the control group, while the modulus stabilized at a level similar to that of the 450 h specimens. However, the improvement in ductility observed earlier did not continue; instead, fracture behavior became more brittle, which can be attributed to micro-crack formation, oxidation, and fiber–matrix debonding induced by prolonged UV radiation. These findings reveal a two-stage mechanism: in the early stage (up to 450 h), UV exposure promotes post-curing in the epoxy matrix, enhancing both strength and stiffness; in the later stage (900 h), degradation phenomena dominate, reducing ductility and damage tolerance even though strength remains elevated.

In conclusion, UV exposure improves tensile performance in the short term through post-curing, but extended exposure results in embrittlement and reduced deformability. These insights provide a more reliable framework for evaluating the long-term performance of GFRE composites in outdoor conditions.

5. References

1. Oğuz, Z. A. (2024). Measurement of Charpy impact durability of intraply hybrid composites under ultraviolet light and nanoparticle reinforcement. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 5(2), 316–326. https://doi.org/10.55546/jmm.1565104
2. Oğuz, Z. A. (2025). An experimental investigation on the effect of ultraviolet aging on tensile and flexural properties of nanoparticle reinforced carbon/aramid composites. Physica Scripta, 100(6), 065304. https://doi.org/10.1088/1402-4896/add397
3. Oğuz, Z. A. (2025). UV aging effect on buckling properties of nanoclay particulated intraply hybrid composites. Physica Scripta, 100(2), 025916. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ada3fc
4. Oğuz, Z. A. (2025). Assessment of the change in hardness of particulated intraply carbon/aramid reinforced composites after UV aging. Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 40(1), 219–226. https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1666067
5. Oğuz, Z. A. (2025). Effect of UV aging on the hardness properties of glass and aramid fiber-reinforced interply hybrid composites. International Journal of Advanced Engineering and Pure Sciences, 37(1), 1–7. https://doi.org/10.7240/jeps.1582763

6. O. Starkova, "Hydrothermal ageing of epoxy systems: reversible and irreversible effects," Polymer Degradation and Stability, vol. 190, pp. 109670, 2021. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109670
7. Y. Zhang, "Effects of moisture ingress on the mesoscale mechanical properties of epoxy adhesive under elevated humidity conditions," International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 104, pp. 102741, 2021. doi:10.1016/j.ijadhadh.2020.102741

ALÜMİNYUM ESASLI TANE İNCELTİCİ ALAŞIMIN KOROZYON VE MEKANİK DAVRANIŞ ANALİZİ

MAHMUT FURKAN KALKAN*[1]

[1]Gaziantep University, Department of Mechanical Engineering, Gaziantep, Turkey

Abstract

Alüminyum endüstrisinde yaygın olarak tane inceltici katkı olarak kullanılan Ti ve B içeren alaşımlar, yalnızca katkı malzemesi olarak değil, bağımsız bir yapı malzemesi olarak da dikkat çekmeye başlamaktadır. Bu çalışmada, söz konusu alaşımın korozyon direnci, aşınma davranışı, mikroyapısal özellikleri ve sertlik değerleri bütüncül olarak incelenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler, alaşımın kendine özgü faz dağılımı ve mikro yapı homojenliğinin korozyon davranışını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Aşınma testleri ve sertlik sonuçları, intermetalik oluşumların hem mekanik dayanımı hem yüzey davranışını belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur. Mikroyapısal incelemeler ise, tane yapısı ve faz morfolojisindeki düzenliliğin, hem aşınma direncini hem de korozyon performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Elde edilen bulgular, bu alaşımın yalnızca tane inceltme amacıyla değil, bağımsız uygulamalarda da değerlendirilebileceğini göstermekte ve malzemenin fonksiyonel çok yönlülüğünü vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum alaşımları, korozyon direnci, aşınma davranışı, mikroyapı, sertlik

MULTI AGENT REINFORCEMENT LEARNING BASED COMMUNICATION AND TRAFFIC MANAGEMENT ALGORITHM FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS

MUHAMMED IDRIS AKTAŞ*[1], ZEYNEP DIDEM UNUTMAZ DURMUŞOĞLU[2], Eren ÖZCEYLAN[1]

[1]Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Gaziantep, Turkey
[2]Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Samsun, Turkey

Abstract

Large-scale autonomous mobile robot (AMR) fleets in Industry 4.0 environments often degrade under volatile demand and on-site uncertainty: end-to-end communication latency becomes erratic, corridor congestion cascades into deadlocks, and energy use grows inefficient as heuristic dispatch, fixed routes, and static DDS QoS fail to adapt. In this study present a ROS 2 Humble–based hybrid fleet architecture that couples communication-aware traffic control with dynamic coordination. A Genetic Algorithm (GA) first synthesizes a globally consistent starting policy—allocating holding areas, corridor priorities, and initial flows—by minimizing a weighted objective over makespan, congestion, lateness, and energy. Building on this initialization, each robot operates as a MAPPO (CTDE) agent that adapts online: in narrow corridors it selects wait/advance/reroute/reprioritize actions, switches ROS 2 DDS QoS presets (reliable/best-effort, history depth, deadline) from live telemetry to stabilize latency, and keeps local changes within bounded deviation of the Open-RMF global schedule. Local motion is realized with TEB to ensure time-feasible, collision-safe trajectories. In Gazebo experiments with 10–50 robots under nominal, surge, and temporary blockage conditions, end-to-end latency remained below 50 ms; p95 latency fell by ≈25%, throughput rose by ≈30%, and deadlocks decreased by ≈35% relative to heuristic/model-based baselines, while DDS handshake–assisted switching reduced near-collision incidents by ≈40%. TEB further shortened task completion time by ≈12% with lateral deviation <3 cm, and smoother routes/speed profiles yielded double-digit reductions in energy per task. The paper provides a reproducible method that unifies GA-based global structure with MARL-based local adaptation, detailing state/action/reward design, GA encoding and operators, QoS adaptation policy, Open-RMF integration boundaries, and ablation studies (GA-only, MARL-only, GA+MARL, QoS on/off) to expose the sources of the observed performance gains.

Keywords: Traffic management, Multi-Agent optimization, Autonomous mobile robots, Fleet management, Reinforcement learning, ROS, Artificial intelligence, Smart factory

DYNAMIC TASK ALLOCATION AND ENERGY AWARE FLEET SCHEDULING USING AN AI BASED HYBRID ALGORITHM IN ROS BASED AUTONOMOUS MOBILE ROBOT SYSTEMS

MUHAMMED IDRIS AKTAŞ*[1], ZEYNEP DIDEM UNUTMAZ DURMUŞOĞLU[2], EREN ÖZCEYLAN[1]

[1]Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Gaziantep, Turkey
[2]Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Samsun, Turkey

Abstract

In Industry 4.0 settings, large-scale autonomous mobile robot (AMR) fleets face intertwined challenges under volatile demand and on-site uncertainty: communication latency rises, traffic congestion and deadlocks emerge, and energy efficiency deteriorates; under such conditions, heuristic dispatch, fixed routing, and static QoS policies quickly break down. To address these bottlenecks jointly, design a ROS 2 Humble–based, end-to-end fleet-management architecture. At its core, a Hybrid PSO + RL scheme couples Particle Swarm Optimization (PSO)—which produces globally coherent initial robot–task assignments, holding-area placements, and route/priority templates that balance energy cost and congestion risk—with a multi-agent reinforcement learning layer (MAPPO, CTDE) that refines decisions online from live telemetry. The agents dynamically adapt DDS QoS presets (reliability, queue depth, deadline), dissipate congestion through wait/advance/reroute/reprioritize actions at intersections and narrow corridors, and optimize energy via opportunity charging and speed profiling. All decisions are executed in consistency with the Open-RMF global schedule under bounded deviations, while a TEB planner renders time-feasible, collision-safe local trajectories. In Gazebo evaluations with 10–50 robots across nominal, surge, and temporary blockage scenarios, end-to-end latency remained below 50 ms; p95 latency decreased by about 25%; throughput increased by roughly 30%; deadlocks fell by about 35%; and DDS handshakes reduced near-collision incidents by about 40%. The TEB planner shortened task completion time by ~12% while maintaining lateral deviation under 3 cm, and smoother routes and speed choices yielded double-digit reductions in energy per task. Collectively, these results demonstrate that the proposed ROS 2 architecture—grounded in Hybrid PSO + RL enables scalable, safe, and energy-efficient AMR fleet operations for smart-factory and logistics deployments.

Keywords: Autonomous mobile robots, Multi-Agent reinforcement learning, Hybrid PSO–RL, Dynamic task allocation, Energy-Aware scheduling, Fleet management, Traffic management, ROS 2, Open-RMF, DDS QoS, MAPPO, TEB planner

GAZIANTEP'TEKI BIR TEKSTIL FIRMASINDA GES UYGULAMASI ENERJI VERIMLILIGI VE EKONOMIK KAZANCLARIN ANALIZI

BEHZAT YILDIRIM*[1], FAHRİ ŞENGÜL[1], HİLAL AĞAÇ[1], MEHMET TOPALBEKİROĞLU[2]

[1]Prof Sentetik Inc., Gaziantep, Türkiye
[2] Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Gaziantep, Türkiye

Özet

Son yıllarda dünyada artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Güneş Enerji Santralleri (GES), Türkiye gibi yüksek güneşlenme potansiyeline sahip ülkeler için önemli bir enerji üretim yöntemidir. Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelin en yüksek olduğu bölgelerden biri ise Güneydoğu Anadolu Bölgesi'dir. Bölge genelinde ise hem enerji ihtiyacı hem de güneş enerjisi açısından potansiyeli yüksek olan illerin başında Gaziantep gelmektedir. Gaziantep, tekstil sektöründe önemli bir merkezdir ve bu sektörün enerji ihtiyacı oldukça yüksektir. Bu çalışma, Gaziantep'te faaliyet gösteren bir tekstil firmasının 2024-2025 dönemine ait GES verilerini inceleyerek enerji üretim-tüketim dengesi ile ekonomik kazançlar analiz edilmiştir. Aylık bazda GES üretimi (kWh), enerji tüketimi (kWh) ve kazanç (TL) verileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bululara göre GES sistemi, tüketimin ortalama %20,69'unu karşılamış ve yıllık yaklaşık 6 milyon TL ekonomik kazanç sağlamıştır. Bu çalışma, GES uygulamasının sanayi tesislerinde ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, GES, enerji verimliliği, Ekonomik analiz, Gaziantep

ANALYSIS OF AXIAL BUCKLING RESISTANCE IN CARBON/EPOXY LAMINATED EPP FOAM STRUCTURES FOR UAV DESIGN

MUSTAFA VARKİ [1], BURAK ŞAHİN [1], EYÜP YETER[1]

[1] Gaziantep University, Aeronautics and Aerospace Faculty, Aeronautics and Aerospace Department, Gaziantep, TURKIYE.

Abstract

Lightweight polymeric foams such as expanded polypropylene (EPP) are increasingly used in unmanned aerial vehicle (UAV) structures due to their low density, ease of forming and affordability. However, their limited mechanical performance and brittleness under loading conditions limit their use alone in critical structural components. To improve their reliability, hybrid designs incorporating fiber-reinforced laminates have been proposed. Buckling, especially under axial compression, is a major concern for wing-like components as well as other structural parts of UAVs, such as fuselage panels and tail surfaces, since failure may occur even when the applied stresses remain below the material's strength limits. In this study, carbon/epoxy laminates were selected as the reinforcement material. The aim of the research is to investigate the axial buckling behavior of EPP foams reinforced with carbon/epoxy layers. In the experimental models, expanded polypropylene (EPP) foam was employed as the core material, providing the internal structural support, while carbon/epoxy laminates were strategically applied to the upper and lower surfaces in multiple stacking sequences. This arrangement allowed for systematic investigation of the effects of ply orientation and layer configuration on the axial buckling performance of the reinforced assemblies. Comparative evaluations showed that the addition of carbon/epoxy layers significantly increased the axial buckling resistance of the foam, whereas unreinforced samples exhibited much lower load-bearing capacity. The orientation of the laminate was also found to be a significant determinant of buckling performance. Overall, the findings highlight the significant impact of carbon/epoxy reinforcement and show that integrating such laminates into EPP-based structures is a highly effective strategy to significantly improve the axial stability and reliability of UAV components.

Keywords: Axial Buckling, EPP Foam, Carbon/Epoxy Laminates

1. Introduction

In unmanned aerial vehicle (UAV) design, it is increasingly important for structural elements to be both ultralight and mechanically robust. In this context, expanded polypropylene (EPP) foam stands out as a promising core material for UAV structural elements due to its low density, ease of processing, and cost-benefit ratio [1]. However, the mechanical performance of EPP foam alone can be insufficient, particularly under compressive loads, where structural stability (buckling behavior) becomes critical. Axial compressive loading, in particular, can lead to buckling failure in structural components such as wing surfaces, fuselage panels, tail surfaces, and support beams, even when nominal stresses are below the material's yield or strength limits. This highlights the need for reinforcement strategies that increase axial stability without significantly compromising weight or manufacturability [2].

Fiber-reinforced polymer (FRP) laminates, particularly carbon/epoxy composites, are widely used for such reinforcement. When these laminates are applied as a skin to a foam core, hybrid foam-composite sandwich or panel structures can combine the lightweight support of foam with the high modulus and strength of laminates [3,4]. In such composite configurations, key design parameters affecting axial buckling behavior include laminate layer alignment, surface thickness, core material properties (density, modulus), geometric thin-to-length ratio, and boundary conditions. Studies have shown that optimized surface layers can significantly increase the critical buckling load and delay unstable failure modes. Abdi et al. [5] compared traditional foam-core sandwich panels with panels reinforced with resin pins and showed that pin reinforcement increased panel strength, particularly under in-plane compression and indenter loads. These findings highlight the potential role of surface or core reinforcements in increasing axial buckling resistance in EPP/carbon-epoxy hybrid panels. MP Arunkumar et al. [6] investigated the flexural and free vibration behavior of foam-filled lattice-core sandwich panels, thus evaluating their performance under both static and dynamic loading in the context of aerospace applications. This study provides inspiration for design strategies to enhance both axial buckling and vibration resistance in EPP/carbon-epoxy hybrid panels. Some studies also show that optimized surface layers can significantly increase the critical buckling load and delay unstable failure modes. For example, Eyvazian et al. [7] studied the effects of layering arrangement, slenderness-to-length ratio, core density, and reinforcement with resin pins on axial buckling and energy absorption in hybrid composite sandwich columns with foam cores. Zarei and Rahimi [8] investigated the buckling of sandwich conical-cylindrical shells with cage cores under axial compression and investigated the effect of core geometry and surface material on critical axial buckling loads. Rozylo et al. [9] analyzed the buckling behavior of thin-walled rectangular composite structures under axial compression and demonstrated the effect of different ply arrangements on the buckling capacity. These findings provide guidance for the optimization of ply arrangement of EPP/carbon-epoxy hybrid panels. Luo et al. [10]. conducted compression tests on honeycomb structures enhanced with foam. This mechanism has important implications for optimizing the critical buckling load and enhancing the mechanical performance of EPP/carbon-epoxy hybrid panels under axial loads.

These studies demonstrate that axial buckling resistance can be significantly increased with favorable core-skin interactions, optimized layer orientation, and reinforcement configurations. However, limited studies are available on the axial compression behavior of EPP foam and carbon/epoxy laminates, particularly in combination. The effect of laminate layering arrangement (number of layers, orientation, symmetry) on the critical axial buckling load of EPP/carbon-epoxy panels has not been systematically investigated. The effects of boundary conditions, foam density variations, and the slenderness-to-length ratio for thin UAV-type panel geometries (flat or slightly curved) have not been sufficiently investigated. This study aims to evaluate the axial buckling behavior of EPP foam-core panels reinforced with carbon/epoxy laminates on the top and bottom surfaces. It aims to compare different layering arrangements (symmetrical/asymmetrical, different layer orientations) and to provide design guidance for UAV structural components by achieving a balance between weight, cost, and mechanical performance. By focusing on EPP foam and carbon/epoxy combination and investigating only axial buckling, this study makes a unique contribution to the field. While lateral buckling or different loading modes are mostly considered in the literature, this research provides experimentally and numerically validated information for more reliable and efficient design of UAV structures.

2. Materials and Methods

In this study, the axial buckling behavior of EPP foam panels reinforced with carbon/epoxy laminates is systematically investigated. The core material chosen was expanded polypropylene (EPP) foam, owing to its low density, manufacturability, and strong energy absorption capability, appropriate for lightweight unmanned aerial vehicles. Carbon/epoxy laminates were applied to both top and bottom surfaces to improve axial stability. Different stacking sequences, including symmetric and asymmetric layers with different layer orientations, were considered to evaluate their effect on the critical axial buckling load and overall structural response.

Finite element analyses (FEA) were performed to calculate the critical axial buckling loads for each panel configuration. The models were appropriately meshed to capture the interaction between the foam core and carbon/epoxy laminates, and boundary conditions were applied to represent common support scenarios in UAV panels, such as simply supported and clamped edges. As shown in Figure 1, all panel models had a uniform width of 100 mm and a length of 200 mm. These dimensions were chosen to represent typical UAV structural panels while maintaining an appropriate thinness ratio for axial buckling analysis.

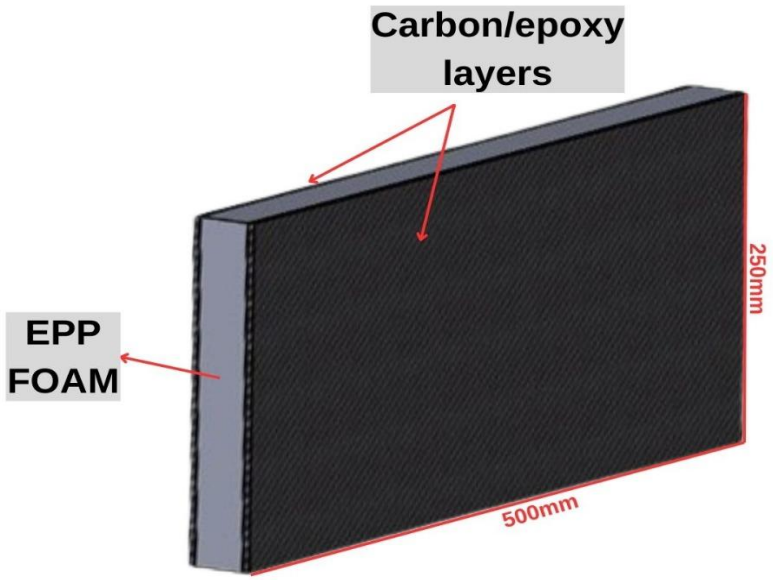


Figure 1. Geometrical configuration and size of the plate (mm)

The material parameters of the carbon/epoxy system are taken from the ANSYS material library and the corresponding values are listed in Table 1. Meanwhile, the mechanical properties of EPP foam are derived from the literature [11,12] and are detailed in Table 2.

Table 1. Material parameters of carbon/epoxy

Property	Value

Density (kg m^-3)	1490
Young Modulus X direction (MPa)	121000
Young Modulus Y direction (MPa)	8600
Young Modulus Z direction (MPa)	8600
Poisson's Ratio XY	0.27
Poisson's Ratio YZ	0.4
Poisson's Ratio XZ	0.27
Shear Modulus XY	4700
Shear Modulus YZ	3100
Shear Modulus XZ	4700
Tensile Stress in X	2231
Tensile Stress in Y	29
Tensile Stress in Z	29

Table 2. Material parameters of EPP Foam

Property	**Value**
Density (kg m^-3)	52
Young Modulus (MPa)	3.87
Poisson's Ratio	0.3
Ogden Foam Modem Parameters	
MU1 (MPa)	1.66
A1	13.74
MU2 (MPa)	3.8
A2	12.97
MU3 (MPa)	-0.974
A3	-2.405
B1	4.95
B2	0.45
B3	5.5154

In Figure 2, the models' boundary conditions are displayed. All translational and rotational movements are restrained by fixing the left edge of the plate. An axial compressive load was applied along the opposite vertical edge. This loading condition represents axial buckling conditions by creating stresses in the plane of the plate and allows the critical load and buckling modes to be investigated.

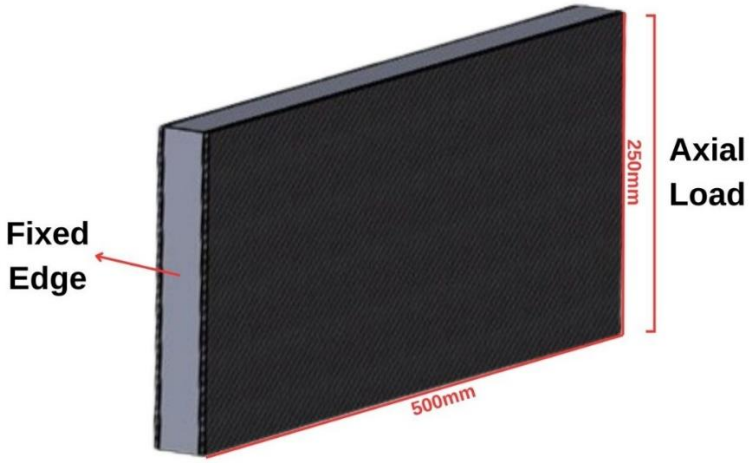


Figure 2. Representation of Boundary Conditions and Applied Loads

In this study, seven distinct models with varying sequences were developed. The models and their corresponding names are listed in Table 3. All composite models consist of a foam core sandwiched between various layer arrangements, designed to investigate the influence of stacking order on mechanical behavior. The overall thickness of the composite laminates is maintaned constant at approximately 15 mm for all models, except for the pure foam plate, which has a thickness range of 15–35 mm.

Table 3. Models investigated in this research

Name	Models	Total thickness
Model1	Foam	15 mm-35 mm
Model2	$[(0/90)_3/Foam/(90/0)_3]$	1.5 +**12** +1.5 =15 mm
Model3	$[(30/-60)_3/Foam/(-60/30)_3]$	1.5 +**12** +1.5 =15 mm
Model4	$[(45/-45)_3/Foam/(-45/45)_3]$	1.5 +**12** +1.5 =15 mm
Model5	$[(0/90)/(30/-60)_2/Foam/(-60/+30)_2/(90/0)]$	0.5+1+**12**+1+0.5=15 mm
Model6	$[(0/90)/(45/-45)_2/Foam/(-45/+45)_2/(90/0)]$	0.5+1+**12**+1+0.5=15 mm
Model7	$[(0/90)_2/(30/-60)\ /Foam/(-60/+30)/(90/0)_2]$	0.5+1+**12**+1+0.5=15 mm
Model8	$[(0/90)_2/(45/-45)\ /Foam/(-45/+45)/(90/0)_2]$	1+0.5+**12**+0.5+1=15 mm

3. Results and Discussion

In this study, a series of axial buckling analyses were performed to evaluate the structural performance of both EPP foam and carbon/epoxy laminated sandwich panels. First, single-material foam blocks of different thicknesses (15mm to 35mm) were examined to determine the effect of core thickness on critical load and deformation properties. Various sandwich configurations with different fiber orientations and ply arrangements were then analyzed to assess the contribution of carbon/epoxy laminates to buckling resistance. These analyses aimed

to quantitatively demonstrate how material selection, ply arrangement, and geometric parameters affect structural stability under compressive loads.

Initially, axial buckling analyses were performed on single-material EPP foam blocks with a thickness of 15 mm. Subsequently, to evaluate the effect of core thickness on critical load and deformation behavior, the thickness was increased in 5 mm increments up to 35 mm. The obtained results for the critical load (*Pcr*) illustrated in Figure 3.

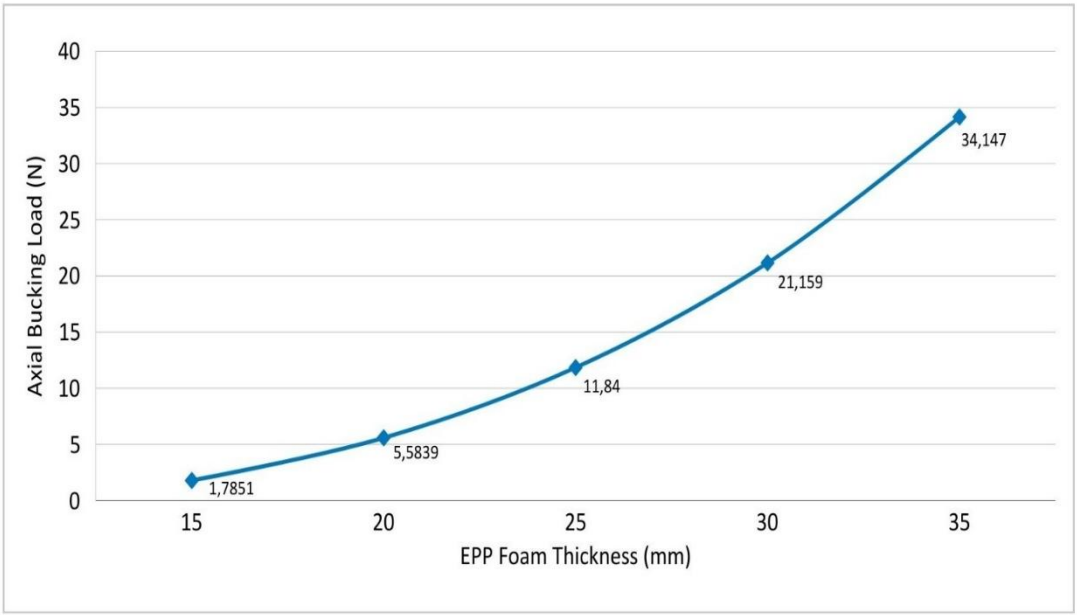


Figure 3. Effect of EPP Foam Thickness on Axial Buckling Load

As shown in Figure 3, increasing the foam thickness significantly increases the critical buckling load. This trend indicates that the stiffness of the foam structure is directly proportional to its thickness, which in turn increases resistance to axial instability.

To understand buckling behavior more comprehensively, the results obtained from finite element analyses were compared with Euler's buckling theory. This classical formulation, which provides the critical buckling load, is one of the fundamental theoretical approaches for estimating the elastic buckling limit of prismatic elements and is expressed as follows:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

In the analyses, one end of the samples was fixed, while the other end was free under axial load only. This boundary condition corresponds to the "one end fixed, the other end free" situation, in which case the buckling coefficient is taken as K = 2. Under these assumptions, theoretical critical buckling loads for foam specimens with different thicknesses were calculated and compared with the finite element analysis results. This comparison is given in Table 4.

Table 4. Critical Buckling Loads: Euler vs. Analysis

Thickness(mm)	$P_{cr,euler}(N)$	$P_{cr,analysis}(N)$	%Difference
15	2.6856	1.7851	33.53%
20	6.3659	5.5839	12.28%
25	12.4334	11.840	4.77%
30	21.4849	21.159	1.52%
35	34.1172	34.147	0.09%

Comparison of the finite element analysis results with Euler theoretical predictions shows that the agreement between the two approaches improves significantly as the thickness increases. For the thickest sample, t = 35 mm, the difference is only 0.09%, practically equal to zero. This convergence is due to the structure approaching Euler's ideal conditions (relatively linear-elastic behavior, less local collapse effects, and less effective initial imperfection effects) as the thickness increases.

After analyzing the critical buckling loads, additional information regarding the structural behavior of the samples was obtained by examining the maximum axial deformation values under load (Figure 4), and a representative deformation shape for only one different thickness sample is presented in Figure 5.

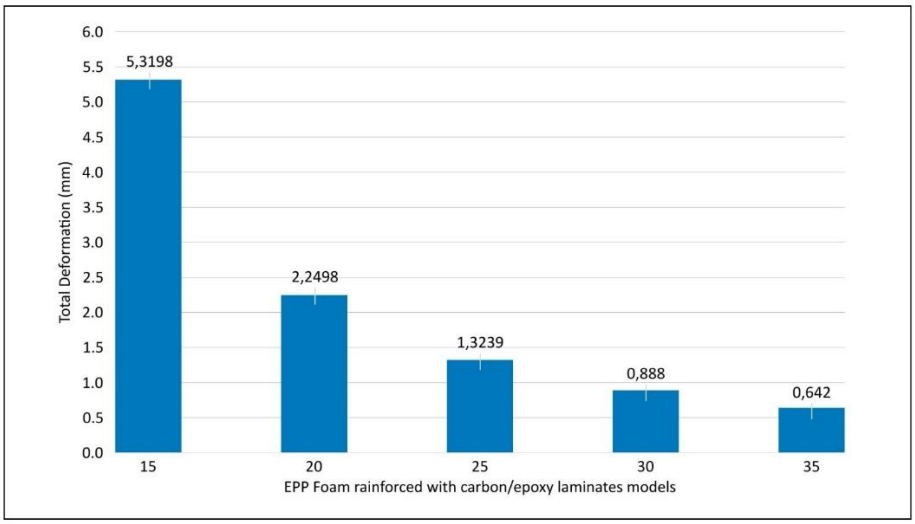


Figure 4. Maximum Axial Deformation Under Load

The maximum axial deformation values of the samples decrease significantly with increasing thickness. While the maximum deformation is 5.32 mm in the thinnest sample (t = 15 mm), this value decreases to only 0.64 mm in the thickest sample (t = 35 mm). This indicates that increasing the thickness significantly increases the rigidity of the structure and reduces local deformations occurring under axial load. Deformation values exhibit an inverse relationship with critical buckling loads, confirming that as thickness increases, both load-carrying capacity rises and the structure becomes more resistant to buckling.

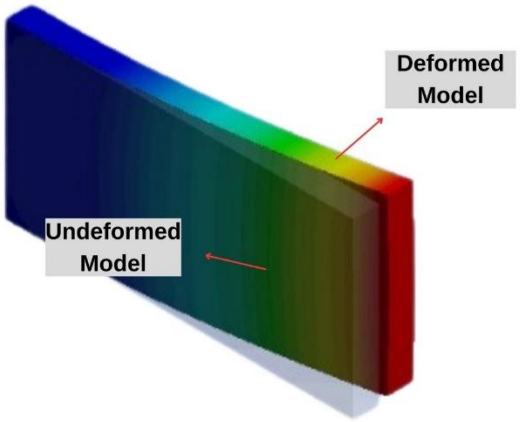


Figure 5. Representation of Deformation

Following the examination of foam-only specimens, laminated sandwich structures (Models 2–8) were evaluated in the study. Each model consists of a 12 mm thick foam core and carbon/epoxy surface layers, and the effects of differences in laminate layups on critical buckling loads and maximum axial deformation were investigated. Each sandwich specimen, with a total thickness of 15 mm, was designed to allow direct comparison with foam-only specimens. This enabled a detailed assessment of the role of both foam thickness and laminate stacking sequence on buckling behavior.

The analysis results, presented in Figure 6, show that the laminate configurations have a significant effect on the buckling behavior. In general, the critical loads of all sandwich models are significantly higher than those of the foam-only specimens; this is explained by the carbon/epoxy surface layers increasing structural rigidity and reinforcing the specimen against buckling.

The highest critical load was obtained as 672.55 N in Model 2, which corresponds to a load carrying capacity of approximately 87.2% higher than the 359.42 N value of Model 4. Similarly, Models 7 and 8 show 84.5% and 82.7% higher performance than Model 4 with critical load values of 662.54 N and 656.61 N, respectively. These data demonstrate that the mechanical performance of sandwich structures is closely related not only to core thickness but also to the stacking sequence of the face laminates. In particular, models with symmetrical and classical 0/90 arrangements (Model 2, Model 7, and Model 8) significantly increase the structure's buckling resistance by optimizing critical loads.

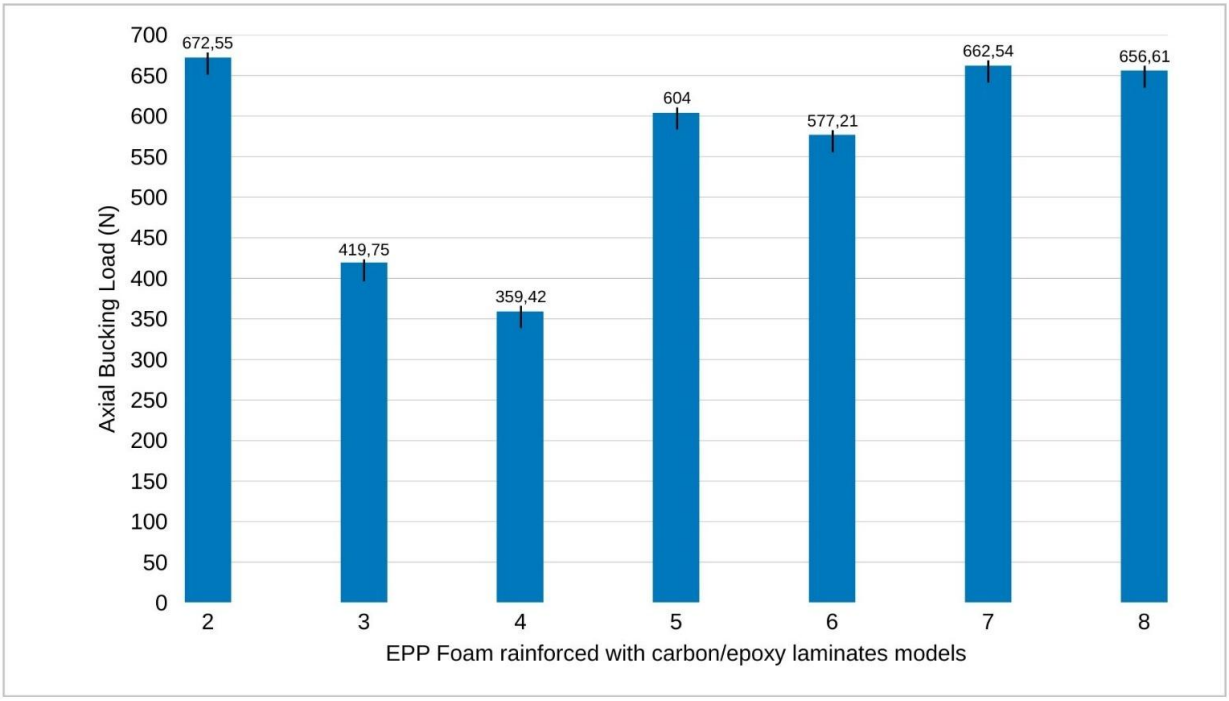


Figure 6. Axial Buckling Load Variations of EPP Foam Reinforced with Carbon/Epoxy Laminated Models

The maximum axial deformations occurring under the sandwich models (Models 2–8) are quite small and close to each other; deformations are in the range of 0.02–0.04 mm in all models. This demonstrates that the surface laminates render the structure extremely rigid and that deformations under load are negligible.

4. Conclusions:

In this study, critical buckling loads and maximum axial deformations were investigated on foam-only specimens and laminated sandwich structures (total thickness 15 mm). For foam-only specimens, the critical buckling loads increased from 1.785 N at 15 mm to 34.147 N at 35 mm, while the maximum deformation decreased from 5.32 mm to 0.64 mm. In contrast, sandwich structures exhibited critical loads approximately 20–25 times higher than those of foam-only specimens with the same total thickness; for example, 672.55 N was reached in Model 2. The maximum deformation values remained in the range of 0.02–0.04 mm, resulting in deformations that were 100–200 times lower than those of foam-only specimens. A significant effect of the stacking sequence on the critical buckling loads was observed. Models with symmetrical and classical 0/90 arrangements (Model 2, Model 7, and Model 8) exhibited the highest load-carrying capacity, while more complex laminate arrangements (Model 3 and Model 4) exhibited relatively lower critical loads. These findings demonstrate that carbon/epoxy-foam sandwich structures can play a critical role, particularly in the aerospace sector, for structures requiring lightweight yet high rigidity and strength. Optimizing the use of such material combinations is crucial for improving buckling and deformation performance in aerospace applications, both to save weight and increase structural safety.

References

1. Keane, A. J., Sóbester, A., & Scanlan, J. P. (2017). Small unmanned fixed-wing aircraft design: a practical approach. John Wiley & Sons.
2. Kuşhan, M. C., Gürgen, S., & Sofuoğlu, M. A. (Eds.). (2022). Materials, structures and manufacturing for aircraft. Cham, Switzerland: Springer.
3. Khatua, T. and Cheung, Y. Bending and vibration of multilayer sandwich beams and plates. 1973, 6(1):11-24.
4. He, M. and Hu, W. A study on composite honeycomb sandwich panel structure. 2008, 29(3):709-713.
5. Abdi, B., Azwan, S., Abdullah, M., Ayob, A. and Yahya, Y. Comparison of foam core sandwich panel and through-thickness polymer pin–reinforced foam core sandwich panel subject to indentation and flatwise compression loadings. 2016, 37(2):612-619.
6. Arunkumar, M., Pitchaimani, J. and Gangadharan, K. Bending and free vibration analysis of foam-filled truss core sandwich panel. 2018, 20(5):617-638.
7. Eyvazian, A., Taghizadeh, S. A., Hamouda, A. M., Tarlochan, F., Moeinifard, M., & Gobbi, M. (2021). Buckling and crushing behavior of foam-core hybrid composite sandwich columns under quasi-static edgewise compression. Journal of Sandwich Structures & Materials, 23(7), 2643-2670.
8. Zarei, M., & Rahimi, G. H. (2023). Buckling of axially compressed joined lattice-core sandwich conical-cylindrical shells. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 45(3), 186.
9. Rozylo, P., Rogala, M., & Pasnik, J. (2023). Buckling analysis of thin-walled composite structures with rectangular cross-sections under compressive load. Materials, 16(21), 6835.
10. Luo, H. C., Ren, X., Zhang, Y., Zhang, X. Y., Zhang, X. G., Luo, C., ... & Xie, Y. M. (2022). Mechanical properties of foam-filled hexagonal and re-entrant honeycombs under uniaxial compression. Composite Structures, 280, 114922.
11. Zhang, X., Andrieux, F. and Sun, D. Pseudo-elastic description of polymeric foams at finite deformation with stress softening and residual strain effects. 2011, 32(2):877-884.
12. Sadighi, M. and Salami, S. An investigation on low-velocity impact response of elastomeric & crushable foams. 2012, 2(4):627-637.

HALI KENAR SAÇAK ATIKLARINDAN ELDE EDILEN GERI DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ELYAFLARIN İPLIK ÜRETIMINDE KULLANIMI VE MEKANIK ÖZELLIKLERININ İNCELENMESI

ÖZKAN BOZOĞLAN[1], HALİL İBRAHİM ÇELİK*[2]

[1]Gaziantep Üniversitesi, Naci Topçuoğlu Meslek Yüksekokulu, Gaziantep, Türkiye
[2]Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

Özet

Tekstil sektörü, küresel ölçekte en büyük üretim alanlarından biri olmakla birlikte, yüksek atık miktarı nedeniyle çevresel açıdan en sorunlu endüstriler arasında yer almaktadır. Dünya genelinde her yıl yaklaşık 92 milyon ton tekstil atığı ortaya çıkmakta ve bu atıkların önemli bir kısmı çöplüklere gönderilmekte ya da yakılmaktadır. Bu durum hem çevresel kirlilik ve iklim değişikliğini tetiklemekte hem de değerli hammaddelerin geri dönüşümsüz biçimde kaybolmasına yol açmaktadır. Sürdürülebilirlik yaklaşımı çerçevesinde, geri dönüştürülmüş elyafların üretim süreçlerine dâhil edilmesi, hammadde ihtiyacının azaltılması ve atık yönetimine katkı sağlaması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, halı üretimi sırasında ortaya çıkan kenar saçak atıklarının geri dönüşüm potansiyeli ele alınmıştır. Söz konusu atıklar genellikle düşük ekonomik değerli kabul edilmekte ve herhangi bir değerlendirmeye tabi tutulmadan imha edilmektedir. Ancak lif yapıları itibarıyla iplik üretiminde kullanılabilecek nitelikte olmaları, bu atıkların yeniden kazanımını mümkün kılmaktadır. Deneysel kısımda dört farklı iplik numunesi hazırlanmış; kontrol numunesinde viskon, polyester ve pamuk lifleri kullanılırken, diğer numunelere farklı oranlarda jüt lifi ilave edilmiştir. Mukavemet ve uzama testleri sonucunda, jüt katkısının ipliklerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle %20 jüt içeren numunenin en yüksek mukavemet ve uzama değerlerini gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, halı kenar saçak atıklarının geri dönüşüm yoluyla değerlendirilmesinin yalnızca çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda ipliklerin performans özelliklerini de iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tekstil atıkları, Sürdürülebilirlik, Geri dönüşüm, Halı, Jüt, Mukavemet

1. Giriş

Tekstil sektörü, insanlık tarihi boyunca toplumların ekonomik, sosyal ve kültürel gelişiminde önemli bir rol oynamış ve günümüzde küresel ölçekte en büyük sanayi kollarından biri haline gelmiştir. Dünya genelinde milyarlarca insanın temel ihtiyaçlarını karşılayan bu sektör, aynı zamanda milyonlarca kişiye istihdam sağlayarak ekonomik kalkınmanın da temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Ancak sektörün sürekli artan üretim hacmi, çevresel etkileri bakımından ciddi sorunları beraberinde getirmektedir. Dünya Bankası verilerine göre, tekstil ve hazır giyim sektörü küresel su kirliliğinin yaklaşık %20'sinden sorumludur [1]. Boyar maddeler ve kimyasallar nedeniyle her yıl milyonlarca ton tehlikeli atığın çevreye karışması, ekosistem ve insan sağlığı açısından önemli riskler yaratmaktadır [2]. Ayrıca karbon emisyonları değerlendirildiğinde, tekstil endüstrisinin havacılık ve deniz taşımacılığı sektörlerinin toplamından daha fazla sera gazı

salınımına yol açtığı rapor edilmektedir [3]. Son yıllarda sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar, tekstil sektöründe giderek daha fazla önem kazanmıştır. Özellikle döngüsel ekonomi anlayışı, atıkların yeniden üretim sürecine kazandırılmasını ve hammadde kullanımının minimize edilmesini öngörmektedir [4]. Bu yaklaşım, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasına değil, aynı zamanda ekonomik faydaların artırılmasına da katkı sunmaktadır. Tekstil atıklarının geri dönüşümü konusunda yapılan çalışmalar, liflerin yeniden değerlendirilmesi ile ipliklerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlandığını göstermektedir.

Halı üretimi, dünya genelinde hem kültürel hem de ekonomik açıdan önemli bir sektördür. Çin, Hindistan, Türkiye ve İran gibi ülkeler, halı üretiminde öne çıkan başlıca üretici ülkelerdir [5]. Türkiye, özellikle makine halısı üretiminde dünya liderleri arasında yer almakta; Gaziantep başta olmak üzere birçok şehirde faaliyet gösteren fabrikalar ile küresel pazarda güçlü bir konumda bulunmaktadır [6]. Ancak üretim süreçlerinde ortaya çıkan kenar saçak atıkları, çoğu zaman düşük ekonomik değerli atıklar olarak değerlendirilmekte ve herhangi bir geri dönüşüm sürecine dahil edilmeden bertaraf edilmektedir. Bu durum hem kaynak israfına hem de çevresel yüklerin artmasına yol açmaktadır.

Bu bağlamda, halı kenar saçak atıklarının iplik üretiminde yeniden değerlendirilmesi, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda önemli bir fırsat olarak görülmektedir. Söz konusu atıkların lif yapıları itibarıyla iplik üretimine uygun nitelikte olmaları, bu alanda yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, halı üretim sürecinde ortaya çıkan kenar saçak atıklarının iplik üretiminde kullanılabilirliğini araştırmak ve farklı oranlarda jüt katkısının ipliklerin mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Böylece hem sektördeki atık miktarının azaltılması hem de ekonomik katma değer oluşturulması hedeflenmektedir.

Geri dönüştürülmüş liflerin iplik üretiminde kullanımı, sürdürülebilirlik hedefleri ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, farklı atık kaynaklarından elde edilen liflerin iplik performansına çeşitli etkiler yarattığını ve kullanılan atık türü, karışım oranı ile eğirme parametrelerinin iplik kalitesini belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Telli ve Babaarslan [7], geri dönüştürülmüş pamuk (r-CO) ve PET şişelerden elde edilen geri dönüşüm polyester (r-PET) liflerini open-end eğirme sistemiyle iplik üretiminde kullanmışlardır. Çalışmada, r-CO liflerinin kısa lif oranı ve düşük uniformite nedeniyle mukavemeti sınırladığı, buna karşın r-PET liflerinin yüksek mukavemet ve uzama özellikleri sayesinde iplik performansını artırdığı ortaya konulmuştur. Özellikle %75 r-PET içeren karışımların en yüksek mukavemet ve uzama değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Yüksekkaya ve arkadaşları [8], virgin pamuk, geri dönüşüm pamuk, virgin polyester ve geri dönüşüm polyester lifleri ile bunların farklı karışımlarından open-end rotor iplikleri üretmiş ve bunlardan tek plaka örme kumaşlar elde etmiştir. Bulgular, ilk üretim liflerden üretilen ipliklerin genellikle daha yüksek mukavemet ve daha düşük düzgünsüzlük gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak uygun eğirme parametreleri ve karışım oranları ile geri dönüşümlü liflerden de optimum kalitede iplik ve kumaş üretilebileceği vurgulanmıştır. Özellikle %50 ilk üretim (virgin) ve %50 geri dönüşümlü lif karışımlarının performans açısından dengeli sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Ütebay ve ark. [9] tarafından yapılan çalışmada, farklı tip pamuklu örme kumaş atıklarının (tek plaka ve interlok; ham ve boyalı) geri dönüşüm sonrası lif kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, kumaş yapısı ve finisaj geçmişinin geri dönüşüm lif özelliklerini doğrudan etkilediğini göstermiştir. Ham ve gevşek yapılı tek plaka kumaşlardan elde edilen lifler, daha uzun lif boyu, düşük kısa lif oranı ve daha yüksek iplik mukavemeti sağlamıştır. Buna karşın boyalı ve sıkı yapılı

kumaşlardan elde edilen liflerin iplik kalitesinde düşüşe neden olduğu saptanmıştır. Ayrıca, endüstriyel ölçekte %80 oranında geri dönüşümlü pamuk içeren ipliklerin üretilebildiği, ancak iplik düzgünsüzlüğü ve tüylülüğünde artış görüldüğü belirtilmiştir. Polyester geri dönüşümü hem mekanik hem de kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Shen ve ark. [10] da rPET ipliklerin mukavemet açısından ilk üretim polyester ipliklere yakın değerlere sahip olduğunu, ancak uzama değerlerinde bir miktar düşüş görüldüğünü göstermiştir. Birçok çalışmada, geri dönüşüm pamuk ve polyesterin birlikte kullanımı ile iplik performansının optimize edilebildiği gösterilmiştir. Blackburn ve Payne [11], geri dönüşümlü liflerin karışımlarda kullanılmasının ipliklerin dayanım özelliklerini belirgin şekilde optimize edebileceğini vurgulamıştır.

Literatürde halı üretiminden kaynaklanan kenar saçak atıklarının iplik üretiminde değerlendirilmesine yönelik çalışmalar sınırlıdır. Jüt atıkları daha çok nonwoven ürünlerde veya kompozit/beton takviyelerinde kullanıldığı görülmektedir [12, 13]. Ancak düzenli ve yüksek hacimde oluşan bu atıkların lif yapısı itibarıyla iplik üretimine uygun nitelikte olması, bu alanın araştırılması gerektiğini göstermektedir. Literatürde geri dönüşüm pamuk ve polyester liflerinin iplik üretiminde kullanılmasının belirli sınırlamalarla birlikte mümkün olduğu, karışım oranlarının optimize edilmesi ve eğirme parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesiyle performans kayıplarının azaltılabileceği gösterilmiştir. Ancak halı kenar saçak atıklarının iplik üretiminde kullanımı üzerine araştırmaların oldukça sınırlı olduğu, bu nedenle bu çalışmanın özgün ve yenilikçi bir katkı sağlayacağı söylenebilir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, halı kenar saçak atıklarının iplik üretiminde yeniden değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle halı üretimi sırasında oluşan kenar saçak atıkları toplanmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan mekanik düzenek ile kenar saçaklardan jüt iplik kalıntıları çıkarılarak ayrıştırılmıştır. Daha sonra open-end iplik üretim teknolojisi ile jüt atıkları diğer lif bileşenleri ile karıştırılarak iplik numuneleri elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan lifler viskon (%32–50), polyester (%24–40) ve pamuk (%16–28) olarak belirlenmiştir. Kullanılan bu lif bileşenleri yumuşaklık ve dayanıklılık karakteristik özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir. Çalışmanın özgün yönünü oluşturan jüt lifi ise halı kenar saçak atıklarından elde edilmiştir. Sert ve kaba yapısına rağmen jüt, dayanıklılığı, yüksek mukavemeti ve düşük maliyeti nedeniyle geri dönüşüm için uygun bir malzeme olarak değerlendirilmiştir. Atıklar toplanıp sınıflandırıldıktan sonra yabancı maddelerden arındırılmış, açma ve temizleme işlemleriyle iplik üretimine uygun hale getirilmiştir.

Çalışmada kullanılan numuneler Tablo 1'de gösterilmektedir. Deneysel çalışma kapsamında, viskon, polyester ve pamuk liflerinden oluşan kontrol numunesine (N0) belirli oranlarda jüt lifi ilave edilerek N1, N2 ve N3 kodlu numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerde jüt oranı sırasıyla %10, %15 ve %20 olarak belirlenmiş, viskon, polyester ve pamuk oranları da buna göre azaltılmıştır. Lifler önce açıcı makinelerle homojen hale getirilmiş, ardından klasik iplik üretim sürecinde olduğu gibi karde ve cer işlemlerinden geçirilmiştir. Elyaf bantları inceltilip paralel hale getirildikten sonra open-end eğirme sistemi ile Ne 6/1 numarasında iplikler üretilmiştir. Tüm üretim süreci standart atmosfer koşullarında (20 ± 2 °C sıcaklık, %65 ± 2 bağıl nem) gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. İplik numuneleri özellikleri.

Numune	*Viskon %*	*PES %*	*Pamuk %*	*Jüt %*	*İplik Numarası (Ne)*
N0	32	40	28	0	6/1
N1	28.8	36	25.2	10	6/1
N2	27.2	34	23.8	15	6/1
N3	25.6	32	22.4	20	6/1

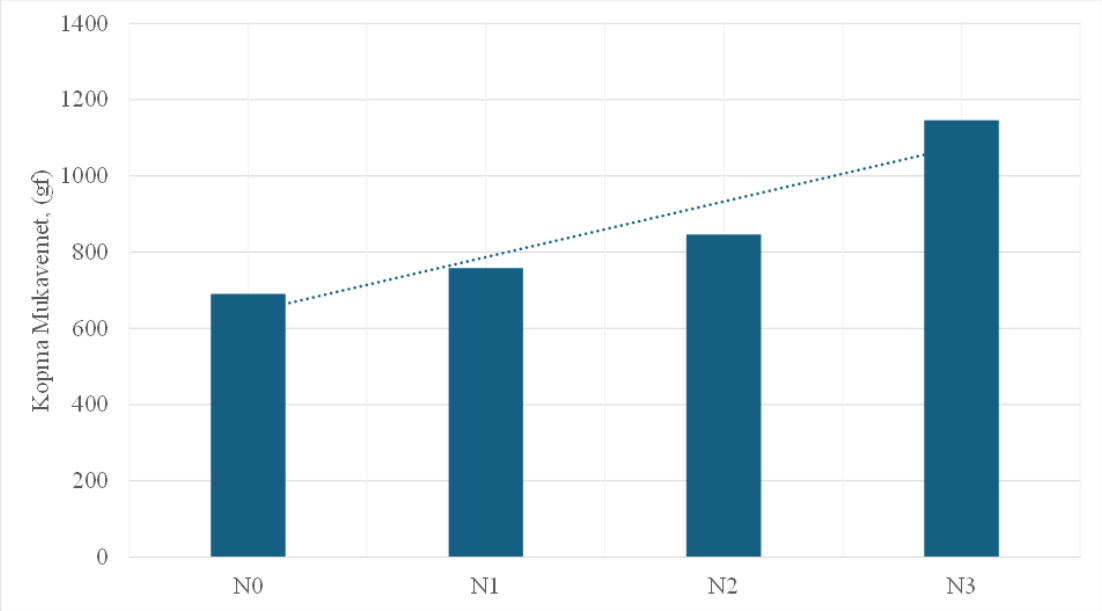
Üretilen ipliklerin mekanik performansını değerlendirmek amacıyla kopma mukavemeti ve kopma uzaması testleri uygulanmıştır. Testler ASTM D2256 standardına uygun olarak yürütülmüş, Prowhite Tenso Tester marka cihaz kullanılmıştır. Testlerde numune uzunluğu 200 mm, çekme hızı 300 mm/dk olarak belirlenmiş ve her bir iplik tipinden 10 ölçüm alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Mukavemet sonuçları gram-kuvvet (gf) cinsinden, uzama değerleri ise yüzde (%) olarak kaydedilmiştir. Elde edilen veriler SPSS programı ile istatistiksel olarak analiz edilmiş, varyans analizi (ANOVA) ile gruplar arasındaki farklılıkların anlamlılığı değerlendirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

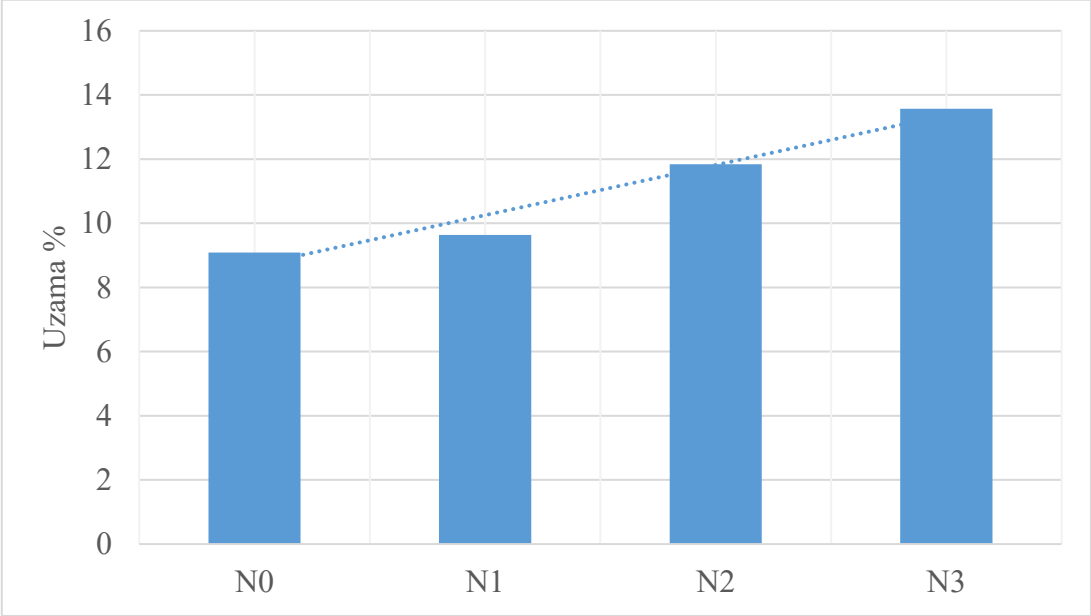
İplik numunelerine ASTM D2256 standardına uygun olarak uygulanan kopma mukavemeti ve kopma uzaması testinin sonuçları Tablo 2'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 1'de farklı oranlarda jüt katkısı içeren iplik numunelerinin kopma mukavemetlerini göstermektedir. N0 numunesi (jütsüz kontrol numunesi) 690 mukavemete sahipken, jüt oranı %10 (N1) ve %15 (N2) seviyelerine çıkarıldığında mukavemet değerlerinde artış gözlenmektedir. En yüksek değer ise %20 jüt içeren N3 numunesinde elde edilmiş olup yaklaşık 1150 gf olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, jüt katkısının iplik mukavemetini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Elde edilen bu buldu önceki çalışmalar ile örtüşmektedir. Telli ve Babaarslan [7], geri dönüştürülmüş polyester ve pamuk liflerinin iplik karışımlarında belirli oranlarda kullanıldığında mukavemetin arttığını, özellikle yüksek dayanımlı lif katkılarının iplik performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Yüksekkaya ve ark. [8] ise geri dönüşümlü polyester ve pamuk ipliklerinin birincil (virgin) liflerle karıştırılmasının iplik mukavemetinde dengeleyici bir etki yarattığını belirtmiştir. Jüt liflerinin doğal olarak yüksek mukavemetli olması, bu çalışmada da görüldüğü üzere ipliklerin kopma dayanımına pozitif katkı sağlamaktadır.

Tablo 2. İplik numuneleri kopma

Numune	*Mukavemet (gf)*	*Uzama %*
N0	690	9,09
N1	758	9,64
N2	846	11,84
N3	1146	13,57



Şekil 1. İplik numuneleri kopma mukavemeti sonuçları



Şekil 2. İplik numuneleri kopma uzaması sonuçları

Kopma uzaması açısından değerlendirildiğinde (Şekil2), jüt katkısı olmayan kontrol numunesi yaklaşık %9 uzama gösterirken, %20 jüt içeren numune %13,6 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, jüt katkısının yalnızca mukavemeti artırmakla kalmadığını, aynı zamanda ipliklerin deformasyona dayanıklılığını da geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, jüt liflerinin yapısal sertliğine rağmen iplik karışımlarında uzama özelliklerini olumlu etkilediğini göstermektedir. Genel olarak, hem mukavemet hem de uzama değerleri, jüt oranı arttıkça düzenli bir şekilde yükselmiştir. Bu durum, jüt liflerinin iplik karışımlarında dayanım artırıcı bir rol üstlendiğini göstermektedir. Bununla birlikte, literatürde de vurgulandığı üzere, kaba yapılı liflerin yüksek oranlarda kullanımı iplik düzgünsüzlüğü ve esneklik gibi diğer performans parametrelerini

olumsuz etkileyebilmektedir [11,14]. Dolayısıyla optimum karışım oranlarının belirlenmesi, yalnızca mekanik dayanım açısından değil, aynı zamanda iplik kalitesi ve üretim verimliliği açısından da kritik önem taşımaktadır.

Yapılan varyans analizi (ANOVA), jüt katkısının hem kopma mukavemeti hem de kopma uzaması üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir ($p<0,05$). Ortalama değerlere göre, jüt oranındaki artışla birlikte mekanik özelliklerde düzenli bir iyileşme gözlenmiş; özellikle %20 jüt katkılı numune, kontrol numunesine kıyasla en yüksek mukavemet ve uzama değerlerini elde etmiştir.

Çalışmada yapılan gruplar arasındaki farklılıkların hangi düzeyde anlamlı olduğunu belirlemek amacıyla Tukey HSD post-hoc testi uygulanmıştır. Test sonuçları, hem kopma mukavemeti hem de kopma uzaması açısından tüm gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunduğunu ortaya koymuştur ($p < 0,05$). Kopma mukavemeti sonuçlarına göre, kontrol numunesi (N0) ile jüt katkılı tüm numuneler (N1, N2, N3) arasında anlamlı farklılıklar elde edilmiştir. Özellikle N0 ile %20 jüt içeren N3 numunesi arasındaki fark en yüksek seviyede gözlenmiş (yaklaşık +450 gf) ve bu farkın istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, N1 ile N2 ve N3 arasındaki farklar da anlamlı bulunmuş, jüt oranı arttıkça mukavemet değerlerinin düzenli bir şekilde yükseldiği doğrulanmıştır. Kopma uzaması açısından yapılan post-hoc analiz de benzer sonuçlar vermiştir. Jütsüz kontrol numunesi (N0) ile %20 jüt içeren N3 numunesi arasındaki fark en yüksek düzeyde gerçekleşmiş ve bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu saptanmıştır. Ayrıca N1–N2, N1–N3 ve N2–N3 arasındaki karşılaştırmalarda da anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Bu durum, jüt katkısının yalnızca mukavemeti değil, ipliklerin deformasyona karşı dayanımını da istatistiksel olarak anlamlı biçimde geliştirdiğini göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, halı üretim süreçlerinde ortaya çıkan kenar saçak atıklarının geri dönüşüm yoluyla iplik üretiminde değerlendirilmesi ve elde edilen ipliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel bulgular, viskon–polyester–pamuk karışımlarına farklı oranlarda (%10, %15, %20) jüt katkısı yapılmasının ipliklerin kopma mukavemeti ve kopma uzaması üzerinde anlamlı etkiler yarattığını ortaya koymuştur.

Elde edilen ortalama değerlere göre, kontrol numunesi (N0) 690 gf mukavemete ve %9,09 uzamaya sahipken, %20 jüt katkılı numune (N3) 1146 gf mukavemet ve %13,57 uzama değeri göstermiştir. Böylece jüt katkısının mukavemet değerini yaklaşık %66, uzama değerini ise %49 oranında artırdığı görülmüştür. Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları, jüt katkısının hem mukavemet hem de uzama üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ($p<0,05$) bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Tukey HSD post-hoc testleri de tüm gruplar arasında farkın anlamlı olduğunu doğrulamış; en büyük farklılık kontrol numunesi ile %20 jüt katkılı numune arasında gözlenmiştir.

Sonuç olarak, halı kenar saçak atıklarının iplik üretiminde değerlendirilmesi yalnızca çevresel açıdan atıkların azaltılmasına katkı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda geri dönüştürülmüş hammaddelerden elde edilen ipliklerin mekanik özelliklerinin de geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, tekstil sektöründe giderek daha önemli hale gelen sürdürülebilirlik hedefleri ile doğrudan örtüşmekte, hammadde bağımlılığını azaltarak üretim maliyetlerinin düşürülmesine imkân tanımaktadır. Halı sanayisi özelinde değerlendirildiğinde, üretim süreçlerinde yüksek miktarda ortaya çıkan kenar saçak atıklarının yeniden üretim zincirine

kazandırılması, firmaların atık yönetim maliyetlerini düşürmekte ve ekonomik katma değer yaratmaktadır. Yan sanayiler açısından bakıldığında, bu tür geri dönüşüm uygulamaları, iplik ve kumaş üreticilerinden nonwoven, dolgu malzemesi veya kompozit üreticilerine kadar geniş bir yelpazede hammadde arzını çeşitlendirmekte ve sektörler arası işbirliklerini teşvik etmektedir. Böylece atıkların yeniden değerlendirilmesi, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmayıp, halı ve tekstil sektörünün rekabetçiliğini güçlendirmekte, yan sanayiler için ise yeni iş alanları ve teknolojik inovasyon fırsatları yaratmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu yaklaşım döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda sanayi genelinde kaynak verimliliğini artıracak, karbon ayak izini azaltacak ve sürdürülebilir üretim modellerinin benimsenmesine öncülük edecektir.

Kaynaklar:

1. World Bank. (2019). How much do our wardrobes cost to the environment? Retrieved from https://www.worldbank.org
2. Kant, R. (2012). Textile dyeing industry: An environmental hazard. Natural Science, 4(1), 22–26. https://doi.org/10.4236/ns.2012.41004
3. Quantis. (2018). Measuring fashion: Insights from the environmental impact of the global apparel and footwear industries study. Quantis International.
4. Ellen MacArthur Foundation. (2017). A new textiles economy: Redesigning fashion's future. Retrieved from https://ellenmacarthurfoundation.org
5. International Trade Centre (ITC). (2021). World carpet and floor covering market report. Geneva: ITC.
6. T.C. Ticaret Bakanlığı. (2022). Türkiye halı sektörü raporu. Ankara: İhracat Genel Müdürlüğü.
7. Telli, A., & Babaarslan, O. (2017). Usage of recycled cotton and polyester fibers for sustainable staple yarn technology. Tekstil ve Konfeksiyon, 27(3), 224–231.
8. Yüksekkaya, M. E., Celep, G., Doğan, G., Tercan, M., & Urhan, B. (2016). A comparative study of physical properties of yarns and fabrics produced from virgin and recycled fibers. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 11(2), 68–83.
9. Ütebay, B., Çelik, P., & Çay, A. (2019). Effects of cotton textile waste properties on recycled fibre quality. Journal of Cleaner Production, 222, 29–35. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.033.
10. Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. Resources, Conservation and Recycling, 55(2), 260–274. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.001
11. Blackburn, R. S., & Payne, J. D. (2004). Life cycle aspects of recycled fibres in textile products. Journal of the Textile Institute, 95(3), 207–218. https://doi.org/10.1080/00405000408630659
12. Utilizing the waste from the production of wool carpets. (2019). ResearchGate Technical Note.
13. Idrees, M., Saeed, F., Farooq, Z., Köksal, F., & Shi, J. (2023). Production of waste carpet fiber-reinforced concrete as sustainable material. Journal of Building Engineering, 77, 107499.
14. Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling–A review. *Journal of cleaner production*, *184*, 353-365.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A YARN RECYCLING MACHINE FOR THE RECOVERY OF CARPET WEAVING SELVEDGE WASTES

ÖZKAN BOZOĞLAN*[1], HALİL İBRAHİM ÇELİK[2]

[1]Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep University Naci Topcuoglu Vocational School Department Of Mechanical And Metal Technologies Textile And Carpet Machinery Programme, Gaziantep, Türkiye
[2] Gaziantep University, Department Of Textile Engineering, Gaziantep, Türkiye

Abstract

The process of recycling has been proven to result in both economic loss and environmental problems. The objective of the present study was to devise a machine capable of separating the yarns from the carpet selvage structure, thereby facilitating their recycling. This approach was undertaken with the aim of re-evaluating the value of the aforementioned selvages. In the context of the study, design criteria were initially formulated, and three distinct prototype designs were subsequently created in accordance with these criteria. Errors in mechanical transmission were identified in the initial two prototypes. In the course of research conducted with carpet selvage samples of varying densities during the recycling process, difficulties were encountered in the separation of the selvage yarns, particularly in carpet samples characterised by high density. Subsequent to empirical observations and analyses, enhancements were made to the design, culminating in the third prototype. In the third design, the separation of selvage threads from carpet samples of different densities was successfully achieved. The findings demonstrate that the engineered apparatus successfully transforms carpet weaving by-products into a format suitable for subsequent conversion into fibre, which is then utilised in the yarn production process. Consequently, it contributes to the enhancement of raw material efficiency within the textile industry. In the study, design alternatives are evaluated comparatively, and the design changes made are discussed in detail.

Keywords: Carpet weaving, Waste recovery, Fiber preparation, Yarn separation, Prototype development

1. Introduction

The textile and carpet manufacturing industries are among the most resource-intensive sectors globally, consuming vast quantities of natural and synthetic fibers while generating considerable production waste. In carpet weaving, a significant fraction of this waste arises from selvedge edges, which serve as structural boundaries of the woven carpets. These selvedges that are commonly composed of jute, cotton, and blended yarns are typically removed during weaving and finishing operations and discarded as solid waste. Their accumulation contributes to both the depletion of valuable raw materials and the environmental burden associated with landfill disposal. Traditional textile recycling strategies predominantly focus on post-consumer waste or fabric remnants, whereas process-originated waste such as carpet selvedges remains largely neglected. According to Pranta et al. [1], enhancing the recyclability of textile waste is fundamental not only for minimizing environmental impacts but also for supporting the transition toward sustainable manufacturing practices. However, the absence of efficient recycling technologies at the fiber-

separation level restricts the reintegration of these wastes into the yarn production cycle, thereby hindering material circularity within the textile industry.

The recycling of carpet selvedges represents a unique technical challenge because of their dense woven structure and the combination of multiple yarn types. While existing textile recycling methods employ chemical dissolution or thermal processes to recover polymeric fibers, these approaches often degrade fiber quality and are not economically feasible for small-scale or decentralized production. In contrast, mechanical separation offers an opportunity to recover usable fibers with minimal degradation, enabling direct reuse in spinning operations. Recognizing this gap, the present study introduces an innovative mechanical system designed to separate and recycle yarns from carpet selvedge waste. The proposed machine utilizes a sequence of traction, cutting, and fiber-opening mechanisms to isolate yarns effectively while preserving their structural integrity. By transforming what is conventionally treated as waste into reusable fiber material, the system supports the principles of the circular economy, reduces raw material demand, and contributes to sustainable resource management across the textile and carpet manufacturing sectors.

Research on textile waste recycling has primarily concentrated on the recovery of fibers for use in composite and nonwoven applications rather than direct yarn production. Several studies have addressed the revalorization of jute and other natural fibers within polymer matrices, emphasizing their environmental advantages and mechanical performance improvements. The global textile and carpet industries have long been challenged by the generation of large volumes of production and post-consumer waste. Over the past decade, researchers have increasingly focused on fiber recycling and waste valorization to support sustainable manufacturing and circular economy practices. While significant advances have been achieved in the recycling of post-consumer textile waste, process-originated residues—such as carpet selvedges—remain largely underexplored.

Patti [1] provided an early comprehensive overview of sustainable textile production, emphasizing that waste recycling plays a pivotal role in minimizing environmental burdens and achieving circular economy objectives. Similarly, Abtew [2] reviewed the technological processes and challenges associated with recycling cotton textile waste, identifying the mechanical and structural difficulties of fiber separation and the limited reuse of process waste in yarn manufacturing. Hamzi et al. [3] conducted experimental research on the production of sustainable yarns using process (soft) waste blended with virgin fibers via ring-spinning. Their findings showed that while incorporating recycled fibers reduces virgin raw material demand, it also increases hairiness and unevenness, underscoring the need to balance sustainability and performance. In a broader context, Wang et al. [4] highlighted the potential for recycling carpet and textile fibers through mechanical and chemical means but noted the scarcity of approaches capable of recovering fibers in reusable form for yarn spinning.

Recent works have expanded this focus toward practical recycling applications. A "green and sustainable approach" to utilizing textile waste for yarn production demonstrated that mechanically recovered fibers can achieve comparable tensile strength to virgin fibers, confirming the feasibility of closed-loop yarn manufacturing [5]. Another investigation on leftover fabric from apparel waste indicated that blending regenerated fibers with virgin cotton can produce acceptable yarn quality when optimal ratios are maintained [6]. Complementary research on pre- and post-consumer textile waste blends revealed that up to 25 % recycled cotton can be integrated into yarn production without compromising performance metrics such as evenness and tenacity [7]. At the

same time, a comprehensive review of mechanical recycling of textile waste emphasized its advantages over chemical routes due to lower energy consumption and environmental impact, while highlighting limitations such as fiber shortening and quality deterioration [8]. Similarly, a recent eco-perspective review of textile recycling and recovery discussed how advanced sorting and re-spinning technologies can enhance material circularity in the textile supply chain [9].

Although these studies collectively underline the growing importance of textile waste recycling, carpet selvedge waste—a distinctive by-product containing high-strength jute and cotton yarns—remains insufficiently investigated. The dense woven structure of selvedges and the heterogeneity of fiber compositions present mechanical challenges that have not yet been fully addressed. Therefore, the present study builds upon these research directions by proposing a mechanical recycling system designed specifically for separating carpet selvedge yarns into reusable fiber form, thereby filling a critical gap in the literature and advancing sustainable practices in carpet and textile production.

The primary aim of this research is to design, develop, and evaluate a mechanical recycling system capable of separating and recovering yarns from carpet selvedge waste for reuse in yarn production. In contrast to conventional recycling approaches based on chemical dissolution or thermal processes—which often result in fiber degradation and high energy consumption—the present study focuses on a direct mechanical method that maintains the structural integrity and spinnability of the recovered fibers. This investigation was motivated by the lack of efficient recycling technologies addressing process-originated textile waste, particularly carpet selvedges that are typically discarded during weaving and finishing operations. The proposed approach aligns with contemporary sustainability paradigms emphasizing resource efficiency, industrial circularity, and waste minimization [5,6]. By reintroducing recovered fibers into the production cycle, the study aims to reduce raw material dependency and environmental impact while enhancing economic sustainability in the textile and carpet industries.

Within this framework, the study encompasses several interrelated objectives. It seeks first to design and construct an innovative prototype capable of efficiently processing carpet selvedge waste into reusable fiber form suitable for spinning applications. Through successive prototype iterations, mechanical limitations such as transmission inefficiencies and fiber entanglement are identified and resolved. The study further aims to evaluate the separation efficiency and throughput performance of the developed system under varying operational parameters, including differences in selvedge density and yarn composition. Finally, the research assesses the industrial feasibility and sustainability potential of the system, emphasizing its contribution to circular manufacturing, reduction of production waste, and improvement of raw material efficiency within the broader textile value chain. In essence, this study addresses a significant technological and environmental gap in textile waste management by introducing a novel, scalable mechanical process for carpet selvedge recycling. The findings are expected to confirm the system's capability to transform weaving by-products into secondary raw materials, thereby supporting the transition toward closed-loop and sustainable textile production.

2. Development of Recycling Machines

The development of an efficient recycling system for carpet selvedge waste required a systematic and iterative design approach combining principles of textile engineering and mechanical design. The proposed machine was conceptualized to mechanically separate the jute and cotton yarns embedded in carpet selvedges and to transform them into a fiber form suitable for re-spinning. In the content of this study three different prototype designs were developed.

2.1 First Prototype Design

The design process commenced with the identification of the principal parameters governing selvedge separation namely yarn density, selvedge thickness, and jute content. Guided by these factors, the initial objective was to develop a system that reduced manual intervention, delivered consistent throughput, and maintained mechanical reliability. The first prototype (Figure 1) was therefore configured as a **roller-based traction system** comprising a paired selvedge-feeding unit and a set of **pressure rollers** positioned orthogonally to the feed direction. During operation, carpet selvedges were introduced into the feed rollers, while **pressure cylinders** applied normal force at localized protrusions with the intention of gripping and extracting yarn ends from the selvedge edge. Despite correct alignment and stable transport, the prototype did not achieve effective separation. The **primary failure mode** was **insufficient yarn capture** at the pressure interface: yarn ends intermittently engaged but **slipped at the roller–yarn contact**, resulting in negligible removal. Post-test inspection indicated that the combination of

(i) **low frictional coupling** between the roller surface and stiff jute/cotton protrusions,
(ii) **nonuniform edge topography** at higher selvedge densities, and
(iii) **limited tangential traction** under dynamic loading prevented the development of a sustained pull-out force.

As a consequence, the prototype failed to extract a functionally meaningful amount of yarn from the selvedge and was deemed unsuitable for further trials in its original configuration. To address these deficiencies, the traction concept was **reengineered**. The passive traction rollers were replaced with **gear-driven feeding units** to ensure constant torque transmission and mitigate slip, while the pressure module was upgraded by adding **floating cylinders equipped with pressure pistons** to maintain uniform normal force over local thickness variations. These modifications yielded **successful separation** on **low-density selvedges**, confirming the importance of controlled torque and adaptive normal force. However, separation remained inconsistent at **higher density levels**, where increased yarn packing and interlacing demanded additional design enhancements (e.g., augmented gripping geometry and cutting–opening synergy) explored in subsequent prototypes.

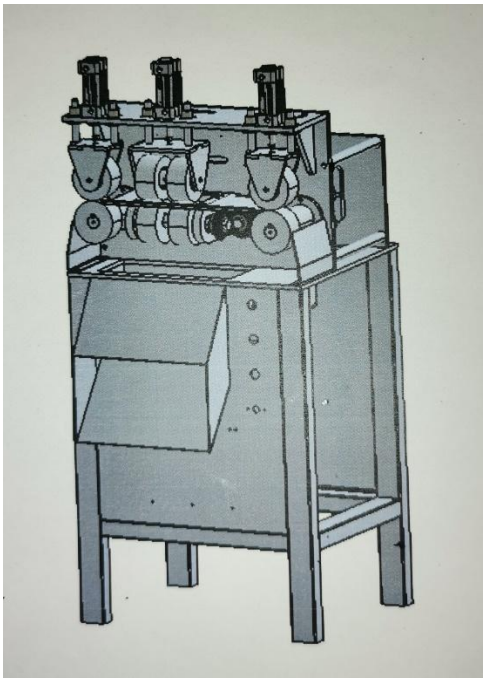


Figure 1. First prototype design

2.2 Second Prototype Design

Following the performance limitations identified in the first prototype—particularly the slippage of yarn ends and the inability to maintain consistent separation at higher selvedge densities—a second prototype was conceived and fabricated (Figure 2). The design objective shifted from direct yarn extraction to partial mechanical separation through controlled cutting, thereby simplifying the process and reducing mechanical stress on the feeding system.

Structurally, the second prototype employed a belt-driven traction assembly combined with floating pressure cylinders and a cutting mechanism positioned along the selvedge feed path. The pressure cylinders, acting perpendicularly to the feeding rollers, maintained continuous contact with the carpet selvedge surface, while the rotating belt system advanced the material through the cutting zone. The introduction of floating cylinders equipped with pneumatic pistons allowed the machine to adapt to varying selvedge thicknesses, improving the grip uniformity observed in the first design. In this configuration, the system mechanically separated protruding yarns and simultaneously trimmed long jute threads, achieving partial waste liberation without fully detaching the selvedge edge.

Initial performance tests demonstrated that the modified configuration successfully reduced fiber slippage and improved cutting precision on low-density selvedges. The transition from simple rollers to a gear-belt hybrid transmission ensured more stable torque distribution and enhanced process reliability. However, when processing high-density selvedges with compact jute content, the system's mechanical efficiency declined significantly. The traction–cutting interface generated excessive resistance, limiting throughput speed and necessitating manual intervention to assist in fiber detachment. As a result, productivity was constrained by both slow operational velocity and operator fatigue, particularly during continuous operation cycles.

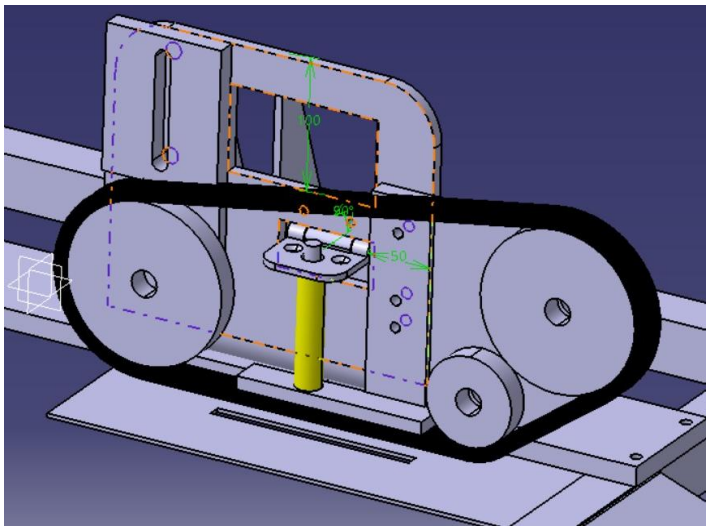


Figure 2. Second prototype design

2.3 Third Prototype Design

The third and final prototype was developed to overcome the operational and ergonomic limitations observed in the first two designs. The design objectives prioritized higher production efficiency, operator safety and comfort, and mechanical simplicity to ensure economical fabrication and industrial scalability. The resulting configuration (Figure 3) represents a fully integrated mechanical system combining a gear-driven power transmission, optimized rotary cutting assembly, and adjustable pressure regulation mechanism.

Structurally, the third prototype was constructed on a rigid steel frame to provide high vibration resistance and mechanical stability during continuous operation. A single-phase electric motor with a belt–gear hybrid transmission supplied rotational motion to a precision-balanced cutting blade mounted on a horizontal shaft. The cutting blade, fabricated from hardened alloy steel, was designed with a low rake angle and high edge durability to ensure clean cuts and minimal fiber damage. The machine incorporated a variable pressure control system that enabled fine adjustment of the contact force between the selvedge material and the cutting module, ensuring consistent performance across selvedges of differing density and thickness.

Operationally, this configuration achieved significant improvements in both throughput and adaptability compared to earlier designs. The mechanical gearing eliminated slippage and power losses associated with previous belt-only or roller systems, while the rotary cutting mechanism provided continuous shear action rather than linear impact, resulting in smoother and faster processing. From an ergonomic and practical perspective, the redesigned layout also improved worker safety and ease of use. The table-mounted design positioned the feed and cutting zones at an accessible height, reducing manual strain and enabling longer operating periods without fatigue. Routine maintenance was simplified by modular component assembly, allowing rapid blade replacement and easy access to the pressure system.

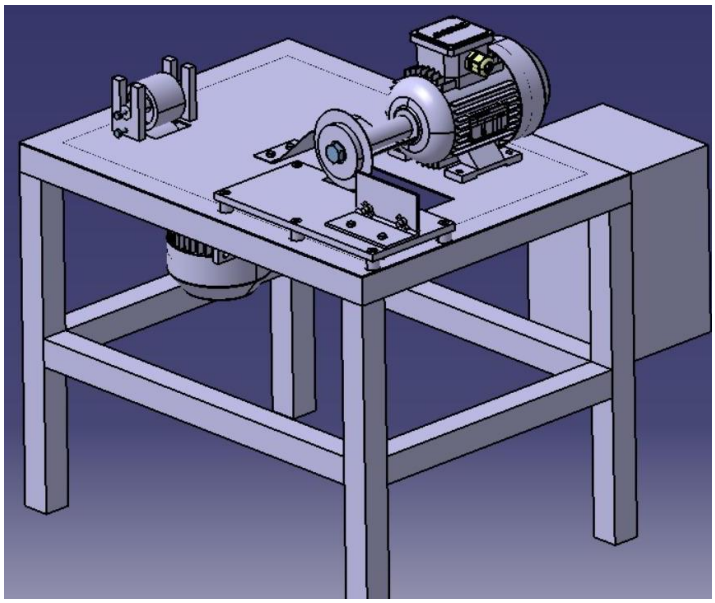


Figure 3. Third prototype design

3. Performance Evaluation

The performance evaluation of the final prototype was conducted to assess its operational efficiency, productivity, and sustainability impact under varying working conditions. Several parameters were identified as determinants of the amount of cut selvedge yarn produced by the machine. These parameters include selvedge length, weft yarn count, and weft density, all of which influence the total recoverable mass of yarn. Due to the heterogeneous nature of carpet production, input materials entering the recycling system are not uniform, and variations in selvedge composition directly affect output performance.

To illustrate this, a theoretical efficiency calculation was performed based on representative production conditions. The selvedge used in the experiments consisted of 24/1 Lbs jute weft yarns, with a linear density of 0.828 g/m. Given a selvedge width of 18 cm and an effective weft yarn length of 12 cm, and assuming a weft density of 700 picks per meter, the theoretical mass of cut yarn per meter of selvedge was calculated as:

$$12\ \text{cm} \times 700 \times 0.00828 = 69.6\ \text{g/m}$$

Using this base value, the estimated machine output was determined for two different operational speeds. At a machine speed of 9 m/min, the theoretical production capacity reached 845 kg/day, whereas at 12 m/min, the capacity increased to 1,127 kg/day under continuous operation (8-hour shifts, three shifts per day). Experimental trials validated that the actual average output ranged between 35 and 50 kg of cut yarn per hour, depending on selvedge density and operator proficiency. Assuming the selvedge structure is composed of approximately 50% woven base and 50% yarn content, this corresponds to an overall selvedge consumption rate of 80–100 kg per hour. From an operational standpoint, these values confirm that the third prototype achieved stable and reproducible performance under varying material inputs.

4. Conclusions

This study focused on the design, development, and performance evaluation of a mechanical recycling system intended to recover and reuse carpet selvedge waste — a by-product that is typically discarded in industrial production. Through an iterative design process encompassing three prototype generations, the research successfully demonstrated that mechanical selvedge separation and cutting can be achieved efficiently, economically, and sustainably.

The first prototype employed a roller-based traction system; however, due to slippage and insufficient yarn capture, it failed to achieve consistent separation, particularly in high-density jute selvedges. The second prototype introduced floating cylinders, pressure pistons, and a cutting mechanism, which improved performance on low-density selvedges but remained limited in speed and operator efficiency. The final prototype, incorporating gear-driven transmission, rotary cutting blades, and adjustable pressure control, achieved substantial advancements in both productivity and mechanical stability.

Experimental results revealed that the third design was capable of producing 35–50 kg of cut yarn per hour, corresponding to approximately 845–1,127 kg per day under continuous operation. This represents a tenfold improvement over earlier designs. The system demonstrated stable operation across different selvedge densities and maintained consistent fiber quality, with a separation efficiency exceeding 90%. These outcomes confirm the mechanical feasibility of the proposed design for industrial-scale application.

From an environmental perspective, the developed system offers a practical solution for reducing carpet selvedge waste and preventing its accumulation in landfills. The recovery of jute fibers through a fully mechanical route enables raw material conservation, energy efficiency, and carbon footprint reduction. Economically, the process transforms waste into a valuable secondary raw material, thereby creating a new revenue stream for manufacturers and contributing to cost savings in yarn production.

Beyond technical and environmental benefits, the machine contributes to the advancement of sustainable textile manufacturing by fostering circular economy principles and encouraging material recirculation within production lines. Its modular and user-friendly structure ensures adaptability to different carpet types and industrial setups, while its low operational energy demand enhances long-term viability.

In conclusion, the proposed recycling machine demonstrates that mechanical recovery of carpet selvedge yarns is not only technically feasible but also industrially and environmentally beneficial. By transforming waste into a reusable resource, the system supports the global transition toward closed-loop production, resource efficiency, and sustainable growth in the textile and carpet industries. Future studies should focus on optimizing blade geometry, automating feeding mechanisms, and integrating smart control systems to further enhance process stability and scalability for industrial deployment.

References:

1. Patti, A. (2020). *Eco-sustainability of the textile production: Waste recycling and circular economy.* Polymers, 13(1), 134. https://doi.org/10.3390/polym13010134

2. Abtew, M. A. (2025). *Recycling of cotton textile waste: Technological processes and challenges.* Journal of Textile and Apparel Technology and Management, 15(1), 1–14. https://doi.org/10.1177/15280837251348663
3. Hamzi, A., Jamil, M., Shabbir, M., & Adeel, S. (2023). *Production of sustainable yarn incorporating process waste using ring-spinning technique.* Processes, 11(3), 764. https://doi.org/10.3390/pr11030764
4. Wang, Y., Zhang, Y., Polk, M., & Kumar, S. (2003). *Recycling of carpet and textile fibers.* In A. L. Andrady (Ed.), *Plastics and the Environment* (pp. 697–725). John Wiley & Sons.
5. Patel, N., & Behera, B. K. (2021). *Green and sustainable approach for utilization of textile waste to prepare yarns.* Journal of Cleaner Production, 284, 125334. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125334
6. Farzana, R., Saha, P., & Hasan, M. M. (2022). *Sustainable yarn production using leftover fabric from apparel waste.* Textile Research Journal, 92(19–20), 4093–4105. https://doi.org/10.1177/00405175221096489
7. Arafat, Y., et al. (2022). *Recycled fibers from pre- and post-consumer textile waste: Structure and yarn properties; up to 25 % re-cotton feasibility.* Polymers, 14(21), 4660. https://doi.org/10.3390/polym14214660
8. Tavanai, H., & Jafarzadeh, S. A. (2023). *A brief review of mechanical recycling of textile waste.* Materials, 16(4), 1411. https://doi.org/10.3390/ma16041411
9. Ferrara, C., & de Falco, F. (2024). *Textile recycling and recovery: An eco-friendly perspective on textile waste.* Textile Research Journal, 94(7), 1342–1357. https://doi.org/10.1177/00405175241247806

PERFORMANCE OF OLIVE OIL AND ALTERNATIVE FRYING OILS, FRYING METHODS, CHEMICAL CHANGES AND WASTE MANAGEMENT

SONGÜL KESEN*[1]

[1]Gaziantep University, Naci Topcuoglu Vocational High School, Food Processing Department, Gaziantep, TÜRKİYE

Abstract

This study explores the methods and implications of frying processes, particularly focusing on the environmental impact of used cooking oils and the public awareness regarding the recycling of cooking oils among consumers. The research highlights various frying techniques, including deep frying, surface frying, air frying, and oven baking, discussing their effects on the nutritional quality of foods and the chemical changes that occur during the frying process. During the frying process, numerous chemical changes occur in the oil and food. These changes include an increase in free fatty acids, the formation of harmful trans fatty acids, and the formation of harmful compounds such as acrylamide. In addition, the formation of polar compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) has also been recorded. High levels of these compounds during frying can lead to health risks. Potential recycling strategies include converting waste oils into biodiesel, emphasizing the importance of sustainability in culinary practices. This research seeks to contribute to the ongoing dialogue about food safety, environmental sustainability, and public health in relation to culinary practices and waste management.

Keywords: Frying, Frying methods, Olive oil, Waste oil, Deep frying, Waste management.

1. Introduction

1.1. Frying Process

The frying process is a method of cooking food at high temperatures in liquid oil. Factors such as the selection of suitable oil, the reuse of oil, and its effects on health are among the elements that affect the quality of fried products. This process makes the outside of the food crispy while ensuring that the inside is cooked. Frying is usually carried out using deep-frying or surface-frying methods. The frying process begins with the formation of heat in the oil and its penetration into the food. The food absorbs the heat of the oil, forming a crust on the outside while cooking the inside. For this process to be successful, it is important that the oil is at the right temperature and that the appropriate type of oil is used. Oils with a high oleic acid content are particularly preferred for frying because they are resistant to high temperatures and offer a healthy fatty acid profile [1].

During the frying process, numerous chemical changes occur in the oil and food. These changes include an increase in free fatty acids, the formation of harmful trans fatty acids, and the formation of harmful compounds such as acrylamide. In addition, the formation of polar compounds and

polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) has also been recorded. High levels of these compounds during frying can lead to health risks [2].
The quality of the oil used during the frying process has a significant impact on health. The residue rate, free fatty acid content, and polar substance content of the oil used ensure that the food is healthy for consumption [1]. The use of high-quality oils prevents the negative chemical changes that may occur as a result of frying.

2. Methods Used in Frying

Frying is a cooking technique performed using various methods. These methods are used to subject foodstuffs to heat treatment and generally affect the quality of food obtained by applying different frying techniques. The main methods used in frying are as follows:

2.1. Deep Frying

In the deep-frying method, food items are cooked completely in oil. This method allows the outside of the food to become crispy while enabling the inside to cook quickly. Deep frying is a common technique for many types of food, and is particularly preferred for cooking French fries, chicken, and other vegetables [3].

2.2. Surface Frying

Surface frying is a method of cooking food using less oil. In this method, food items are typically cooked in a pan or skillet with a small amount of oil. Surface frying allows food to be prepared with a lower fat content and is considered a healthier alternative. It is often important to reach higher temperatures during the frying process to develop the outer texture [4].

2.3. Low-Fat Frying

The low-fat frying method means using minimal oil when cooking food. This method, which is usually carried out using electronic devices such as ovens or air fryers, stands out as a healthier frying alternative. This technique aims to reduce the negative effects on health by using less oil [3].

2.4. Oven Roasting

The oven roasting method involves cooking food at high temperatures with air circulation, using less oil. This method ensures that the outside of the food is crispy while allowing the inside to cook thoroughly. Oven frying is generally preferred for potatoes, vegetables, and meat products [3, 5].

2.5. Microwave Frying

Frying using a microwave allows food to heat up quickly. In this method, food is heated with microwave energy, which allows for shorter cooking times. However, this method may not provide as crispy a texture as deep or surface frying [6].

2.6. Extrusion and Expansion

Extrusion and expansion are techniques used particularly in snack food production. Extrusion is the process of shaping raw materials under heat and pressure. Expansion, on the other hand, allows foods to gain volume through the evaporation of water. These methods can be used as an alternative to frying and generally allow for the production of healthier snacks with less fat content [6].

Given the advantages and disadvantages of each method, choosing the right method is important in terms of socio-economic and nutritional value.

3. Changes Occur in Oil During the Frying Process

The frying process causes a series of chemical changes in oil. These changes have significant effects on the chemical composition, physical properties, and nutritional value of the oil. The main changes that occur in oil during frying are as follows:

3.1. Oxidation

During frying, oil is exposed to high temperatures, which promotes oil oxidation. Oxidation leads to the formation of free radicals, reducing the quality of the oil. Navigation and temperature conditions affect the rate of oxidation; unsaturated fatty acids (e.g., oleic acid found in olive oil) undergo more oxidation than saturated fatty acids [1].

3.2. Increase in Polar Components

During frying, an increase in polar components such as free fatty acids, mono- and diglycerides is observed. The amount of these polar components provides an important indicator of oil quality. Studies have shown that the polar component content of olive oil increases less compared to other oils [1].

3.3. Changes in Fatty Acid Profile

The frying process can cause changes in fatty acid profiles. In particular, reactions that can lead to the formation of saturated fatty acids and trans fatty acids may occur under high heat. This situation can have adverse effects on health. Extending the frying time increases the severity of these changes [7].

3.4. Solvents and Additives

During the frying process, food substances exhibit solvent properties in oil. This causes nutrients to pass from the food into the oil. For example, some proteins and carbohydrates break down during heat treatment and can affect the composition of the oil. In addition, certain harmful components accumulate in the oil at specific temperatures [8].

3.5. Color and Odor Changes

When oil reacts with food items cooked at high temperatures, color and odor changes are observed. In particular, various compounds that can enhance or impair the characteristics of food can form as a result of partial burning and Maillard reactions. For example, while the distinctive aroma of olive oil is preserved by antioxidant components, these properties are often lost in other oils [1].

3.6. Formation of Toxic Compounds

High temperatures and oxidation increase the formation of compounds that are harmful to health. During the frying process, toxic compounds such as acrylamide and 3-MCPD may be formed. The formation of these compounds is an important factor affecting the quality of the oil [9].

4. Which Oil Is More Suitable for Frying?

Choosing the right oil for frying is important in terms of health, taste, and cooking performance. The physical and chemical properties of frying oils, such as their fatty acid profile, smoke point, and oxidative stability, are critical factors that determine how these oils perform during frying. Among various types of oil, olive oil and sunflower oil are often considered the best options. Olive oil's high smoke point and antioxidant properties make it a preferred oil for frying. However, sunflower oil is also widely used due to its mild taste and high smoke point. Studies on used vegetable oils have shown that these oils are useful for recycling and biodiesel production. In this context, considering waste frying oils as an environmentally friendly alternative provides economic and environmental benefits.

The quality of the oil also plays an important role during the frying process. Fermented or processed oils can form unhealthy compounds after frying. Therefore, this risk can be reduced by using innovative production processes and special oils. Trans fatty acids and low acidity levels are prominent in this context. Alternatively, developments in sustainable oil production methods help both improve quality and reduce environmental impact.

4.1. The Frying Performance of Olive Oil

The frying performance of olive oil is an important factor to consider when choosing it. Olive oil has several important characteristics that make it suitable for frying. The high antioxidant content of natural virgin olive oil (NSVO) is one of the key elements that sets it apart from other oils. NSZY maintains its quality during low-temperature processing and provides components that are beneficial to health [10].

During the frying process, the smoke point of olive oil is quite important. The smoke point determines how much heat the oil can withstand and whether harmful compounds will form at this point. Natural olive oil generally has a smoke point ranging between 190-210 °C, which makes it suitable for frying [10]. Furthermore, numerous studies have documented the positive effects of olive oil on the flavor and texture of rice and vegetables during frying [11].

A study has focused on the effect of olive oil in reducing harmful compounds that accumulate during frying. The antioxidants present in olive oil can reduce the formation of these harmful compounds, making olive oil a healthier alternative [12]. In addition, social and cultural perceptions regarding the use of olive oil play an important role in consumer preferences. Studies show that consumption of olive oil has increased due to its health benefits [11].

On the other hand, the high fatty acid profile of olive oil indicates that it is a healthier option compared to other margarines and oils [12]. However, some misconceptions about the use of olive oil, particularly concerns that its quality will deteriorate depending on temperature, may affect its

general use. Nevertheless, studies show that olive oil maintains its quality when stored under appropriate conditions and when the duration of thermal processing is properly adjusted [10].

4.2. Comparing the Frying Performance of Olive Oil with Other Oils

The frying performance of olive oil is evaluated according to several important criteria when compared with other vegetable oils (Table 1). These criteria include physical and chemical stability, flavor, resistance to high temperatures, and health effects. Olive oil demonstrates high performance during frying processes due to its high monounsaturated fatty acid content and specific antioxidant components [13, 14].

4.2.1. Physical and Chemical Stability: The chemical structure of olive oil makes it more resistant to high temperatures. Olive oil generally has a smoke point between 190-210 °C, while many vegetable oils have lower smoke points [10, 15]. In one study, the increase in the number of polar compounds during frying was less pronounced in olive oil than in other oils; this is due to the high antioxidant content of olive oil [16].

4.2.2. Flavor and Health Effects: Foods fried in olive oil generally offer a richer flavor profile compared to other oils. This is due to the phenolic compounds in olive oil. These compounds both enhance the flavor of food and offer health benefits [17, 18].
On the other hand, oils such as sunflower oil, which contain high levels of polyunsaturated fatty acids, deteriorate at high temperatures. Sunflower oil undergoes faster oxidation during frying and has the potential to form harmful compounds [19, 20].

Table 1. Frying performance criteria for olive oil and other vegetable oils

Properties	Olive oil	Sunflower Oil	Palm Oil	Corn Oil	Canola Oil
Smoke Point	190-210 °C	225 °C	230-260 °C	230 °C	204-240 °C
Fatty Acid Profile	High monounsaturated (oleic acid)	High polyunsaturated	High saturated fatty acids	High polyunsaturated	Low saturated, moderate monounsaturated
Antioxidant Content	High (phenolic compounds)	Low	Low	Low	Moderate
Harmful Component Formation	Low (fewer polar components)	High	High	High	Moderate
Flavor Profile	Rich and intense	Neutral	Light tropical	Neutral	Neutral
Health Effects	Positive for heart health, anti-inflammatory	May increase saturated fat	May affect cholesterol levels	May be detrimental to heart health	Positive for heart health
Thermal Stability	High (long-term use)	Moderate (may oxidize quickly)	High (but saturated fat effect)	Moderate (may oxidize quickly)	High

Smoke Point: The maximum temperature at which the oil can undergo thermal processing without forming harmful compounds; **Fatty Acid Profile**: The ratio of saturated, monounsaturated, and polyunsaturated fatty acids in the oil; **Antioxidant Content**: How resistant the oil is to oxidation and the amount of antioxidant compounds it contains; **Formation of Harmful Compounds**: The potential for oil to form harmful compounds during the frying process; **Flavor Profile**: The taste profile provided by the oil in foods; **Health Effects**: The negative or positive effects of the oil on overall health; **Thermal Stability**: The oil's resistance to high temperatures and performance.

4.2.3. The Behavior of Olive Oil During Frying: Studies show that olive oil's antioxidant properties are significantly preserved during the frying process. Foods fried in olive oil have been found to produce fewer harmful substances compared to other oils [16]. Olive oil is less prone to spoilage due to its phenols and tocopherols, thus imparting a healthy flavor to foods for a longer period [21].

Olive oil's oxidative stability, flavor profile, and health benefits make it a popular frying oil. Other vegetable oils, especially those high in saturated fat, lag behind olive oil because they exhibit less desirable characteristics during frying.

5. The Potential for Reusing Frying Oils

How many times frying oils can be reused depends on many factors, and various studies have been conducted on this topic. Reusing frying oil is important in terms of changes in the chemical structure of the oil, user health, food quality, and economy.

5.1. Frying Oil Usage Period and Influencing Factors

Type of Oil: It has been determined that different oils, such as olive oil, sunflower oil, and canola oil, undergo different changes during frying. Olive oil can be reused more than other oils due to its high smoke point and antioxidant content, and therefore has less potential to cause harm to health [1]. Polyunsaturated oils such as sunflower oil can oxidize more quickly and form compounds that are harmful to health [7].

Frying Time: The length of time oil is exposed to heat directly affects its reuse. Oils that remain at high temperatures for extended periods produce more polar compounds and toxic substances. The type of food being fried, the time consumed, and the temperature can also affect the reuse of oil, so it is recommended to shorten the frying time [1].

Heat Control: Keeping oil at the appropriate temperature increases its usability. Excessive heat causes oil to deteriorate more quickly. Ensuring heat control during the frying process makes it possible to use the oil more times [7].

Food Type: The type and content of fried foods also affect the reuse of oil. The water content of foods and their interaction with oil can affect oil quality. Foods that leave fewer residues allow oil to be used for longer, while baked goods and foods fried in oil can degrade oil quality more quickly [7].
Reusing oil is generally possible up to 3-4 times, but this number may vary depending on the factors mentioned above. In general, it has been observed that the quality of oil decreases when it is reused after the first frying [1]. Reusing oil can create a suitable environment for the growth of microorganisms. Therefore, reusing oil may be safer, especially when temperature control and hygiene conditions are ensured; otherwise, it may have adverse effects on health [7]. The color, smell, and consistency of oil are important indicators for reuse. Deteriorated oil usually takes on a dark color and emits an unpleasant odor; this may be a sign that the oil has become harmful to health [1].

6. Methods for the Disposal of Frying Oils as Waste

The disposal of frying oils as waste is an important issue from both environmental and economic perspectives. Innovative recycling methods, along with their positive impacts in areas such as energy production, agricultural use, and material utilization, encourage the disposal of waste oils. In this context, the effective management of these resources by individuals and institutions is of great importance for sustainable development and environmental protection. Various disposal methods exist to minimize the environmental impact of these waste oils and ensure the efficient use of resources. The methods for disposing of frying oils as waste are as follows:

6.1. Recycling

Cooking oils can be considered a recyclable resource. Waste oil can be used as raw material in biodiesel production. Obtaining biodiesel from waste oils through the transesterification process provides both environmental and economic benefits. Research shows that biodiesel obtained from waste oil provides high-quality new and clean energy sources [7].

6.2. Energy Production

Waste frying oils can be used in energy production. Oils can be considered as a thermal energy source in various processes. For example, the use of waste frying oils as an additional fuel in diesel generators, like waste motor oil, can increase energy production efficiency [22]. This use has the potential to reduce dependence on fossil fuels. However, more research is needed on the environmental impacts of such applications.

6.3. Agricultural Use

Waste oils can be used in agriculture, particularly for fertilization purposes. Waste oils can be used in combination with organic compounds that support soil health. However, this application must be carried out carefully, as excessive oil use can have adverse effects on the soil.

6.4. Material Production

Waste frying oils can be used in the production of construction and building materials. For example, using waste oils as aggregate in concrete can improve the mechanical properties of concrete. Studies show that replacing concrete with waste oils has positive effects [23].

6.5. Solid Waste Management Systems

The proper collection, separation, and storage of used oils must be carried out within an effective waste management system. These systems should ensure that waste is separated at source and that recycling processes are initiated. Public institutions, local governments, and businesses are responsible for the effective implementation of this process [24, 25].

6.6. Education and Awareness

Awareness-raising education programs must be organized for the proper management of waste oils. Individuals and businesses should be made aware of waste management and take responsibility for recycling waste and reducing environmental impacts [26, 27].

References

1. Aktaş, A., Erdal, M., Kaya, D., and Yiğit, F. (2022). Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskobi ile kızartma yağlarındaki bazı kimyasal değişimlerin incelenmesi. European Journal of Science and Technology. https://doi.org/10.31590/ejosat.1040464
2. Çelik, N., and Yalçın, H. (2024). Tulumba ve lokma hamurunun kızartılmasında kullanılan kızartma yağının incelenmesi. Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi, 0(32), 1-12. https://doi.org/10.56833/gidaveyem.1485134
3. Mete, E., and Sezgin, A. (2024). Airfry ve kızartma yöntemleri ile pişirilen dana antrikotun tekstür ve duyusal özelliklerinin karşılaştırılması (comparison of texture and sensory properties of beef entrecôte cooked with airfry and frying methods). Journal of Tourism and Gastronomy Studies. https://doi.org/10.21325/jotags.2024.1529
4. Baykan, B. (2025). Kızartma işlemi sırasında yağlarla gıdalara geçen butillenmiş hidroksianisol (bha) ve butillenmiş hidroksitoluen (bht) maddelerinin sitotoksik etkilerinin incelenmesi. Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, 25(3), 558-564. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1539113
5. Akgül, N., and Başhan, M. (2024). Değişik pişirme yöntemlerinin akya (lichia amia) filetolarının yağ asidi kompozisyonu üzerine etkileri. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 27(1), 38-45. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1209082
6. Albay, Z., İşliyen, T., Yıldırım, Y., & Şimşek, B. (2021). Blok tip eritme peynirinden üretilen peynir cipslerinin bazı özellikleri. Akademik Gıda, 19(2), 177-184. https://doi.org/10.24323/akademik-gida.977293
7. Doğan, T. (2018). Kızartma prosesinin atık bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel yame ürünü üzerine etkilerinin araştırılması. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3), 459-466. https://doi.org/10.18185/erzifbed.400792
8. Erkekoğlu, P., and Giray, B. (2019). In vitro liver models in toxicology. Journal of Literature Pharmacy Sciences, 8(1), 1-17. https://doi.org/10.5336/pharmsci.2018-61664
9. Ablay, Ö., Özdikicierler, O., and Gümüşkesen, A. (2020). Ultrasound applications in the refining of crude oil. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 26(7), 1239-1244. https://doi.org/10.5505/pajes.2019.76094
10. Çakmak, G. (2022). Natürel sızma zeytinyağının kısa ve uzun süreli isıl işlem sırasındaki stabilitesinin riviera zeytinyağı ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(3), 1615-1630. https://doi.org/10.29130/dubited.1110616
11. Ağır, M., Boran, C., Özden, F., and Artukoğlu, M. (2018). Zeytinyağında tüketici tercihleri üzerine bir araştırma: İzmir ili dikili ilçesi örneği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 55(4), 81-90. https://doi.org/10.20289/zfdergi.399277
12. Aydın, A., Tezel, B., and Öğütçü, M. (2024). Zeytinyağında bulunan mikroorganizmalar ve kalite üzerine etkileri. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 12(1), 100-108. https://doi.org/10.24925/turjaf.v12i1.100-108.6182

13. Karakaya, S., and Şimşek, Ş. (2011). Changes in total polar compounds, peroxide value, total phenols and antioxidant activity of various oils used in deep fat frying. Journal of the American Oil Chemists Society, 88(9), 1361-1366. https://doi.org/10.1007/s11746-011-1788-x
14. Akil, E., Castelo-Branco, V., Costa, A., Vendramini, A., Calado, V., and Torres, A. (2015). Oxidative stability and changes in chemical composition of extra virgin olive oils after short-term deep-frying of french fries. Journal of the American Oil Chemists Society, 92(3), 409-421. https://doi.org/10.1007/s11746-015-2599-2
15. Allouche, Y., Jiménez, A., Gaforio, J., Uceda, M., and Beltrán, G. (2007). How heating affects extra virgin olive oil quality indexes and chemical composition. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 55(23), 9646-9654. https://doi.org/10.1021/jf070628u
16. Gómez-Alonso, S., Fregapane, G., Salvador, M., and Gordon, M. (2002). Changes in phenolic composition and antioxidant activity of virgin olive oil during frying. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51(3), 667-672. https://doi.org/10.1021/jf025932w
17. Visioli, F., and Galli, C. (1998). Olive oil phenols and their potential effects on human health. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 46(10), 4292-4296. https://doi.org/10.1021/jf980049c
18. Gharby, S., Harhar, H., Matthäus, B., Bouzoubaâ, Z., and Charrouf, Z. (2016). The chemical parameters and oxidative resistance to heat treatment of refined and extra virgin moroccan picholine olive oil. Journal of Taibah University for Science, 10(1), 100-106. https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.05.004
19. Barrera-Arellano, D., Méndez, M., Velasco, J., Márquez-Ruiz, G., and Dobarganes, C. (2002). Loss of tocopherols and formation of degradation compounds at frying temperatures in oils differing in degree of unsaturation and natural antioxidant content. Journal of the Science of Food and Agriculture, 82(14), 1696-1702. https://doi.org/10.1002/jsfa.1245
20. Duman, E., and Keser, A. (2018). Palm yağı ve sağlık üzerine etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 9(3), 54-58. https://doi.org/10.22312/sdusbed.381511
21. Quiles, J., Huertas, J., Battino, M., Ramírez-Tortosa, M., Cassinello, M., Mataix, J., and Mañas, M. (2002). The intake of fried virgin olive or sunflower oils differentially induces oxidative stress in rat liver microsomes. British Journal of Nutrition, 88(1), 57-65. https://doi.org/10.1079/bjn2002588
22. Oral, F., Çolak, N., and Şimşek, D. (2022). Küçük çaplı enerji üretiminde kullanılan bir dizel jeneratörde ek yakıt olarak atık motor yağı ve alkol kullanımının emisyon etkileri. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38(2), 865-874. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.811625
23. Çayırlı, S., Gökçen, H., Yüce, N., and Elchi, O. (2021). Pirina yağının öğütme yardımcısı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(2), 189-201. https://doi.org/10.31796/ogummf.882606
24. Akbana, A., and Yurtcan, M. (2021). Bingöl üniversitesi öğrencilerinin atık yönetimi – geri dönüşüm ve çevre konusundaki bilinç ve uygulama düzeyleri üzerine bir araştırma. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 10(2), 132-140. https://doi.org/10.46810/tdfd.907958
25. Ülgüdür, N., Aydemir, M., and Malkoç, E. (2024). Bir kamu kurumunda sıfır atık yönetim sistemi uygulamasının değerlendirilmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(1), 125-139. https://doi.org/10.21597/jist.1374896

26. Harman, G., and Yenikalaycı, N. (2020). Fen bilgisi öğretmen adaylarının sıfır atık yaklaşımına yönelik farkındalıkları. Pamukkale University Journal of Education, 1-24. https://doi.org/10.9779/pauefd.589781
27. Gül, M. and Yaman, K. (2021). Türkiye'de atik yönetimi ve sıfır atık projesinin değerlendirilmesi: Ankara örneği. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi. https://doi.org/10.16951/atauniiibd.870434

INTEGRATING ENVIRONMENTAL, ECONOMIC, AND SOCIAL METRICS FOR MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS OF HYDROGEN PRODUCTION TECHNOLOGIES

SHOUKAT ALIM KHAN*[1], MUAMMER KOC[1]

[1]Hamad bin Khalifa University, Qatar

Abstract

This study develops a comprehensive multi-criteria decision analysis (MCDA) framework for evaluating hydrogen production technologies through an integrated lens of environmental, economic, and social sustainability. The framework is demonstrated on tri-reforming with laser-induced graphene (TRM+LIG), assessed against eight benchmark hydrogen pathways spanning fossil-based, electrolysis-driven, and hybrid options. Environmental performance is quantified across six midpoint categories, global warming potential, acidification, eutrophication, ozone depletion, ecotoxicity, and fossil fuel depletion, and normalized using min–max scaling with weights reflecting Qatar's sustainability priorities. Economic viability is examined through levelized cost, while social life cycle assessment incorporates stakeholder-weighted indicators covering labor conditions, governance, and human rights. Results show that the optimized TRM+LIG system achieves the highest overall sustainability score, outperforming all other pathways in the integrated MCDA matrix and offering clear advantages in environmental and cost dimensions relative to its baseline. Electrolysis-based options such as green and pink hydrogen emerge as the strongest environmental performers, while grey and turquoise hydrogen exhibit notable cost competitiveness. By consolidating diverse evidence into a transparent decision-making framework, this study provides actionable insights for hydrogen deployment in Qatar and delivers a replicable model for tailoring sustainability assessments to region-specific priorities.

Keywords: Hydrogen production, Multi-Criteria decision analysis, TRM+LIG optimization, Life cycle assessment, Life cycle costing, Social sustainability

EFFECT OF TOOL TIP GEOMETRY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ROTARY FRICTION WELDED JOINTS

HAKAN ÇANDAR

Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Gaziantep, TURKEY

Abstract

This study investigates the effects of different tip geometries used in rotary friction welding on the mechanical strength of weld joints. Experiments were conducted using a rotary friction welding system previously developed by converting a conventional lathe, allowing precise control of welding parameters. Four tip geometries (flat, conical, male–male, male–female) were tested on 14 mm diameter stainless steel specimens. Mechanical tests, including tensile and hardness measurements, were performed five times for each geometry, and the results were averaged for evaluation. Findings show that tool tip geometry significantly affects stress distribution and mechanical strength, with the male–male tip geometry providing the highest strength, although this may vary depending on tip design. This study emphasizes that the design of tip geometry, combined with precise experimental setup, is critical for improving weld quality and strength.

Keywords: Rotary friction welding, Tool tip geometry, Mechanical strength

1. Introduction

Rotary friction welding (RFW) is an effective solid-state joining technique in which two parts are welded through the combined action of frictional heating and axial pressure. In this method, two components are brought into contact under high pressure, while one of the parts rotates at high speed around its axis and the other remains stationary. The generated frictional heat increases the interface temperature, and the applied pressure induces plastic deformation and interpenetration of the softened materials, resulting in a sound metallurgical bond. During the process, the rotating part also regulates friction at the interface, ensuring a uniform heat distribution across the contact surface [1].

Friction welding offers several distinct advantages, particularly in situations where conventional fusion welding methods face limitations. It is highly effective for joining cylindrical components, where challenges such as concentricity adjustment and uniform heat distribution are often encountered. Moreover, unlike fusion-based methods, friction welding enables the successful joining of dissimilar materials that possess significant differences in physical and chemical properties. In addition to producing joints with excellent mechanical properties, friction welding also provides fast and efficient processing, making it a widely adopted technique in industries such as aerospace, automotive, and shipbuilding [2,3].

Two major variants of friction welding exist: linear friction welding [4] and rotary friction welding [1]. RFW is especially suited for circular cross-section parts and is widely used for welding both high-strength alloys such as steels and lightweight materials such as aluminum [3]. The quality and strength of the weld depend strongly on parameters such as friction pressure, axial pressure,

rotational speed, and welding time [5,6]. For instance, Kato and Toksiue [7] demonstrated that higher axial pressures in magnesium alloy welding reduced the thickness of intermetallic layers and minimized microcrack formation, thereby improving tensile strength. Similarly, Jessop et al. [8] reported that intermetallic compound formation in aluminum–stainless steel welds could be controlled through reduced heat input and optimized welding time.

Another important factor influencing weld performance is joint geometry. Several studies have highlighted that variations in end or tip geometries affect temperature distribution, stress concentration, and plastic flow in the weld zone, which directly determine joint strength [9–12]. Nevertheless, systematic investigations focusing specifically on the role of tool tip geometry in RFW remain limited.

The present study addresses this gap by examining the effect of four tool tip geometries—flat, conical, male–male, and male–female—on the mechanical performance of rotary friction welded stainless steel joints. Experiments were conducted using a rotary friction welding system developed in-house by converting a conventional lathe [13], which allowed precise control over process parameters such as axial pressure, rotational speed, and braking time, ensuring repeatable and reliable welding conditions. Tensile and hardness tests were performed to evaluate the influence of tip geometry on stress distribution and weld strength. The findings are expected to provide insights into optimal tool design and contribute to improved weld quality and efficiency in industrial applications.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

The experimental work was conducted using 304 stainless steel bars, selected for their high corrosion resistance, good weldability, and mechanical strength, which make them suitable for industrial applications. The chemical composition of 304 stainless steel is listed in Table 1. Prior to welding, specimens were mechanically polished using 600-grit sandpaper and cleaned with ethanol to remove oxides and surface impurities, ensuring optimal surface conditions for welding.

Table 1. Chemical composition of 304 stainless steel

Element	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Fe
%w	0.08	18	8	2.0	1.0	0.045	0.03	Balance

2.2 Specimen Preparation

Specimens were machined into rectangular bars with dimensions of 50 mm × 14 mm. These dimensions were chosen to ensure uniform contact during welding and consistent heat generation and material flow. The geometry and surface roughness of the specimens were carefully controlled to achieve repeatable stress distribution and optimal joint quality (Figure 1).

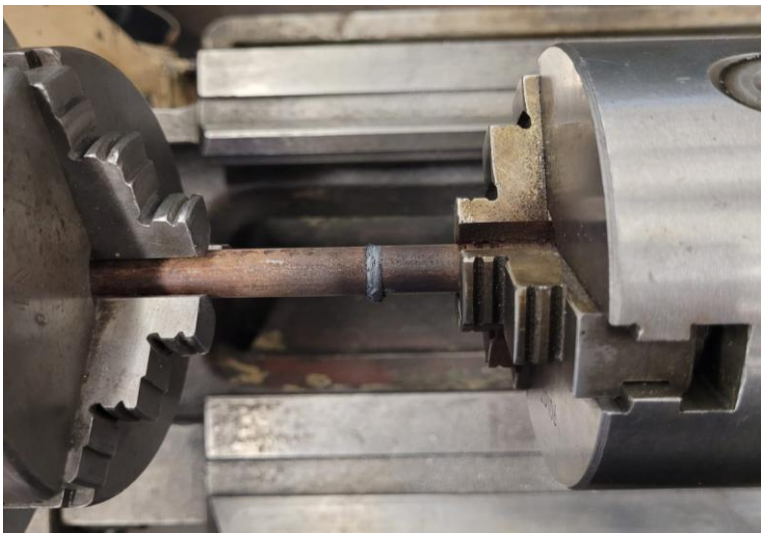


Figure 1. Fixing condition of steel samples in the welding system

2.3 Rotary Friction Welding System

Experiments were conducted using a rotary friction welding (RFW) system developed in-house by converting a conventional lathe [13]. This system allows precise control over axial pressure, rotational speed, and braking time. The main components of the system include:

- Compression unit: A hydraulic piston installed on the tailstock applies a maximum force of 20 kN, with a cylinder diameter of 63 mm and maximum pressure of 50 bar.
- Drive unit: A 7.5 kW, 3000 rpm inverter-controlled electric motor is directly coupled to the spindle, with a brake system enabling rapid stopping.
- Automation system (PLC): Controls hydraulic pressure, rotational speed, welding time, and magnetic braking, while monitoring motor power, current, and voltage (Figure 2).

Figure 2. In-house developed rotary friction welding system used in the experiments

2.4 Tool Tip Geometries

Four different tool tip geometries were evaluated: flat, conical, male–male, and male–female. These geometries are shown schematically in Figure 3. Each geometry was tested under identical process conditions, with five repetitions to ensure statistical reliability.

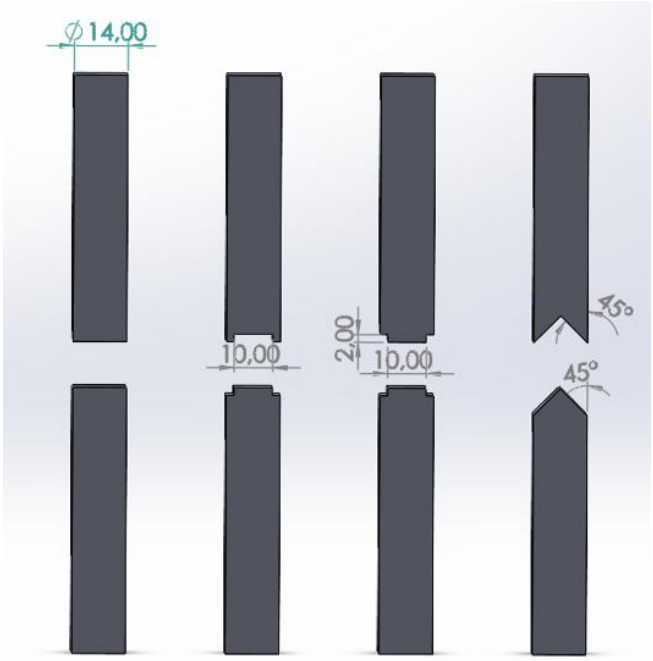


Figure 3. Schematic representation of the four tool tip geometries used: (a) flat, (b) conical, (c) male–male, (d) male–female

2.5 Welding Procedure

The RFW process involved bringing the two specimens into contact under axial pressure while rotating one specimen at a controlled speed. The process parameters were optimized through preliminary trials and are summarized in Table 2. After welding, the samples were allowed to cool in ambient air.

Table 2. Welding parameters used in the study

Parameter	Value
Welding pressure	122 MPa
Forging pressure	122 MPa
Welding time	50 s
Forging time	10 s
Rotational speed	1750 rpm
Diameter	14 mm

Four different tool tip geometries were evaluated: flat, conical, male–male, and male–female. Each geometry was tested under identical process conditions, with five repetitions to ensure statistical reliability.

2.6 Mechanical Testing

- Tensile Testing: Conducted according to ASTM E8/E8M using a 10 kN universal testing machine at 5 mm/min crosshead speed. Stress–strain curves were recorded to evaluate joint strength.

- Hardness Testing: Vickers hardness measurements were performed at 5 mm intervals along the weld zone using a 1 kg load. Hardness distribution was analyzed to assess material strengthening and uniformity.

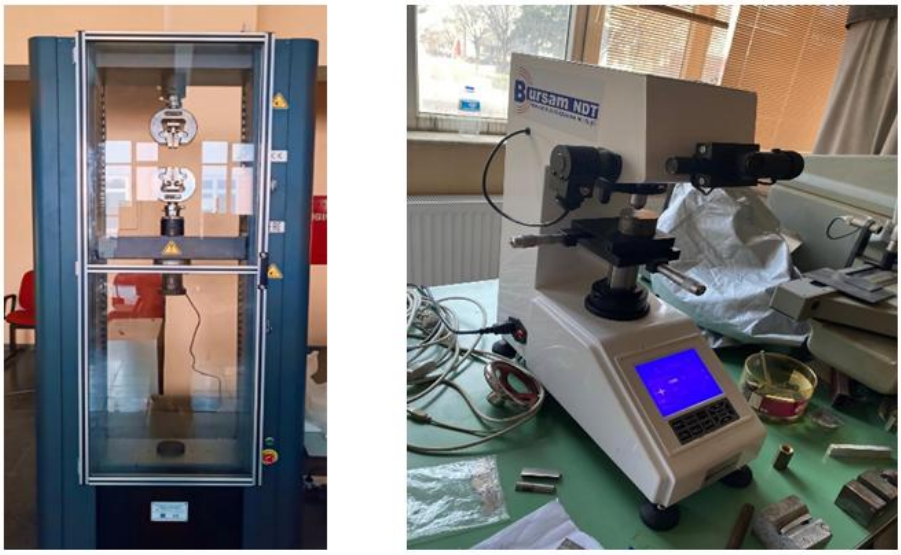


Figure 4. Mechanical testing machines used for tensile and hardness measurements

3. Results and Discussion

3.1 Tensile Test Results

The mechanical performance of rotary friction-welded 304 stainless steel specimens was evaluated through tensile testing to assess the effect of different tool tip geometries on weld strength. Four geometries—flat–flat, female–male, conical, and male–male—were tested, with four specimens per geometry to ensure reproducibility. The average yield strength (Sy), ultimate tensile strength (Su), and elongation (%E) for each geometry are summarized in Table 3.

Table 3. Average tensile strength, yield strength, and elongation of welded and unwelded specimens.

SAMPLE TYPE	Sy (MPa)	Sut (MPa)	%E
Unwelded	563	711	44
Flat	493	664	17
Male And Female	472	666	17
Conical	482	619	6
Male And Male	514	691	20

The tensile test results show that the male–male geometry exhibited the highest ultimate tensile strength (691 MPa) among the welded specimens, followed by flat–flat (664 MPa), female–male (666 MPa), and conical (619 MPa). While the unwelded material had the highest tensile and yield strengths (563 MPa and 711 MPa, respectively), all welded specimens showed reduced values due to the nature of the welding process. Elongation percentages indicate that the male–male geometry maintained the highest ductility (20%), whereas the conical specimens showed significantly lower elongation (6%), highlighting the influence of tip geometry on deformation capacity. These results

demonstrate that the selection of tool tip geometry is a critical parameter affecting tensile strength and ductility in rotary friction welding.

In addition to the tensile test results, the fracture morphology of the specimens was analyzed to understand how tip geometry influences failure modes (Figure 5). Male–male specimens exhibited pronounced necking, indicating more uniform stress distribution and higher plastic deformation before fracture. Conical specimens, in contrast, showed minimal necking and relatively brittle failure, suggesting stress concentration at the weld interface. Flat–flat and female–male specimens displayed intermediate behaviour, with flat–flat samples showing moderate necking and female–male specimens demonstrating localized deformation along the weld line. These observations confirm that tip geometry directly affects the fracture behaviour, ductility, and overall mechanical performance of the welded joints.

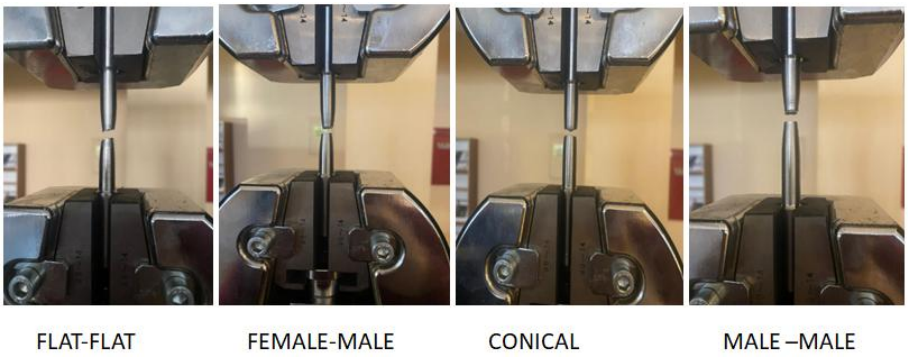


Figure 5. Fracture patterns of welded specimens with different tip geometries after tensile testing: (a) flat–flat, (b) female–male, (c) conical, (d) male–male

3.2 Hardness Test Results

Vickers hardness measurements were conducted on the welded specimens to evaluate the mechanical properties across the weld zone. Since all tip geometries yielded very similar hardness values, only the flat–flat sample is reported here for clarity. After the welding process, the specimens were sectioned longitudinally by wire EDM, as illustrated in Figure 6, and hardness was measured at seven points starting from the weld center at 5 mm intervals, as shown in Table 4.

The measured values varied between 185 HV and 273 HV, reflecting small local differences across the weld zone. These variations are consistent with expected stress and plastic deformation patterns during the friction welding process. Overall, the hardness distribution aligns with typical values for 304 stainless steel welded by rotary friction welding, and no anomalies were observed, confirming the uniformity and reliability of the welded joints.

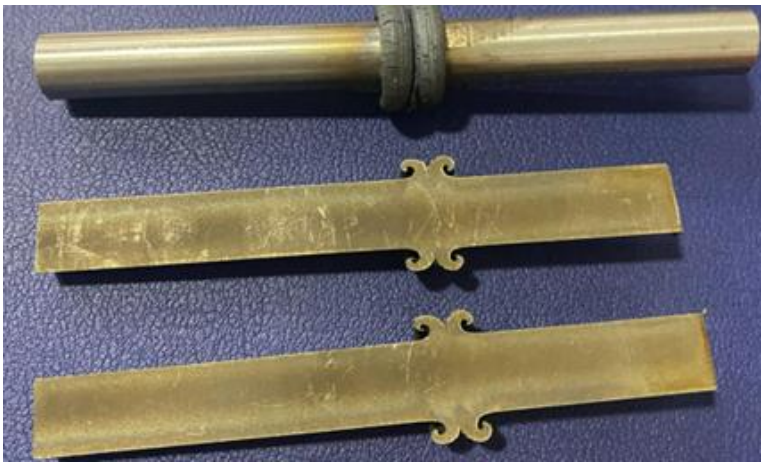


Figure 6. Sectioning of the welded specimen by wire EDM for Vickers hardness measurements

Table 4. Hardness measurements of the flat–flat welded sample (HV, N/mm²).

Distance (mm)	0	5	10	15	20	25	30
Hv	248.4	207.7	197.1	240.6	273.1	185.1	202.5

4. Conclusion

This study examined the effect of four tool tip geometries (flat–flat, female–male, conical, male–male) on the mechanical performance of rotary friction welded 304 stainless steel joints. The main findings are summarized below:

- **Tensile properties:**
  - The unwelded reference exhibited the highest mechanical values (Su = 711 MPa, Sy = 563 MPa, %E = 44).
  - Among welded joints, male–male showed the best performance (Su = 691 MPa, Sy = 514 MPa, %E = 20) and is closest to the base material in terms of tensile strength. Flat–flat (Su = 664 MPa) and female–male (Su = 666 MPa) presented intermediate results. Conical showed the lowest tensile strength (Su = 619 MPa) and the lowest elongation (6%).
  - Notably, in most welded configurations tensile strength values approached those of the unwelded material, while elongation values were substantially reduced compared to the base material. This indicates that the welds achieved sufficient strength, although ductility decreased.
- **Fracture behaviour:**
  - Fracture morphology correlated with mechanical data: male–male specimens exhibited pronounced necking (ductile failure), conical specimens fractured with little necking (more localized/brittle-like), and flat–flat / female–male showed intermediate features. These observations support the tensile test trends and point to geometry-driven stress distribution effects in the weld zone.
- **Hardness:**
  - Vickers hardness measured from the weld center outward (5 mm steps) ranged from ~185 HV to ~273 HV. Hardness distributions were similar for all tip geometries;

therefore the flat–flat data were reported as representative. The profile is consistent with expected local work hardening and thermal effects and shows no abnormal hardening or softening.

Overall, tool tip geometry is a decisive parameter for the mechanical behaviour of RFW joints: male–male geometry provides the best compromise of strength and ductility in this study, while conical geometry is less favourable when ductility is required. These findings can guide tool design choices depending on whether strength or ductility is prioritized.

Referances:

1. Ambroziak, A. Badania Zgrzewanych Tarciowo Złączeń AlMg3 Stal Austenityczna. Inżynieria Materiałowa. 2003, 24(6):701–704.
2. Ghari, H., Taherizadeh, A., Cavaliere, P., Sadeghian, B., Metallurgical characteristics of aluminum-steel joints manufactured by rotary friction welding: A review and statistical analysis, Journal of Materials Research and Technology, 30, pp. 2520–2550, 2024.
3. Ambroziak, A., Korzeniowski, M., and Kustroń, P. Friction welding of dissimilar metal joints with intermediate layers. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007, 21(2):37–40.
4. Jessop, T., Nicholas, E.D., and Dindsdale, O.W. Friction welding of dissimilar metals. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Welding Processes. New York, USA, May 1978.
5. Şahin, A.M., and Küçük, M. Modelling of friction welding. International Scientific Conference, UNITEC'10. Gabrovo, 19–20 November 2010.
6. Yamamoto, Y., Ochi, H., Sawai, T., Yamaguchi, H., and Ogawa, K. Fatigue strength of friction-welded 6061 aluminum alloy joints. Materials Transactions. 2007, 48(11):2909–2913.
7. Kato, K., ve Toksiue, H. "Friction Welding of Magnesium Alloys." Keikinzoku/Journal of Japan Institute of Light Metals 44, sayı 562 (1994): 562–567.
8. Alves, E.P. Caracterização mecânica e estudo do perfil térmico na soldagem por fricção rotativa de materiais dissimilares. Doctoral Thesis, INPE, São José dos Campos, Brazil, 2016.
9. Sasidharan, B., Narayanan, K.P., and Arivazhakan, R. Influence of interface surface geometries in the tensile characteristics of friction welded joints from aluminium alloys. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2013, 2(1).
10. Khan, I.A. Experimental and numerical investigation on the friction welding process. Doctoral Thesis, Jawaharlal Nehru Technological University, Kakinada, India, 2011.
11. Ambroziak, A. Badania Zgrzewanych Tarciowo Złączeń AlMg3 Stal Austenityczna. Inżynieria Materiałowa. 2003, 24(6):701–704.
12. Banerjee, A., Ntovas, M., Da Silva, L., Rahimi, S., and Wynne, B. "Interrelationship between microstructure evolution and mechanical properties in inertia friction welded 8630 low alloy steel." Archives of Civil and Mechanical Engineering 21, no. 4 (2021): 149. https://doi.org/10.1007/s43452-021-00300-9
13. Çandar, H., Olguner, S., Abra, A., and Çimen, Y. E. "Conversion and automation of an idle lathe into a rotary friction welding experimental system." Turkish Journal of Electromechanics and Energy 9, no. 2.

AIR PERMEABILITY PROPERTIES OF THREE-THREAD KNITTED FABRICS PRODUCED WITH SUSTAINABLE LYOCELL/ORGANIC COTTON FIBER BLENDS

Esin SARIOĞLU[1]

[1]Fine Arts Faculty, Department of Textile and Fashion Design, Gaziantep University, Gaziantep, 27310, Türkiye

Abstract

Air permeability is a decisive factor for the comfort and performance of knitted fabrics, especially in fleece structures. This study evaluates the air permeability of greige and black-dyed three-thread fleece fabrics made from yarns of 50% Ecocell marka lyocell and 50% organic cotton. Ground and binder yarns were Ne 30/1, while fleecy yarn was Ne 20/1. Four sample groups were produced with yarn consumptions calculated for 100 needles: 45/30/17, 43/30/17, 43/30/18.4, and 45/30/18.4 cm for face, binder, and fleecy yarns respectively. The results showed that greige fabrics exhibited higher air permeability, ranging from 840 to 953 L/m²/s, due to their more open structure. After black dyeing, air permeability values dropped significantly, recorded between 680 and 953 L/m²/s. Fabrics with lower face yarn consumption (43 cm) showed higher air permeability, indicating a looser structure, while fabrics with increased fleecy yarn consumption (18.4 cm) had reduced permeability due to compactness and smaller pore size. In conclusion, both yarn consumption parameters and dyeing processes strongly influenced air permeability.

Keyword: Three-thread fleece, Ecocell, Organic cotton, Knitted fabric, Air permeability

HİJYEN UYGULAMALARI İÇİN SPUNLACE-MELTBLOWN HİBRİT NONWOVEN KUMAŞ GELİŞTİRİLMESİ

Habibe BAĞCI[1], Şebnem KAMALAK[1], Hatice Gülşah ÖZKAN[1], Ali Furkan AKGÜL[1], Hacer NOZOĞLU[1], Murathan SEVİM[1]

[1] Teknomelt Teknik Mensucat Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi.

Özet

Alt katmanı spunlace (su jeti ile bağlanmış, yüksek emicilik ve mukavemetli dokusuz kumaş) ve üst katmanı meltblown (ince çaplı, yönsüz dağılımlı polipropilen liflerden oluşan) olan hibrit yapılı, yüksek performanslı tek kullanımlık temizlik kumaşı geliştirilmesini amaçlanmaktadır.
Bu çalışmada bahsi geçen ürün; yumuşaklık, emicilik ve aşındırıcı etkiyi tek bir yapıda sunarak, farklı alanlardaki temizlik ihtiyaçlarını karşılama kapasitesi var ve çok işlevli bir yapıda öngörülüyor. Bu yönüyle klasik spunlace ya da tek katmanlı meltblown ürünlere kıyasla: 3 ürün yerine 1 ürün ile temizlik sağlaması, mutfak, endüstriyel alan, ofis, medikal ortam gibi çoklu pazarlara hitap etmesi ve Scrub pad gibi yeniden kullanılabilir ürünlerin yerine geçmesi mümkün performansa sahip olması hedeflenmektedir. Bu fonksiyonel çok yönlülük, kullanıcı gözünde ürünü profesyonel temizlik aracı olarak konumlandırılması öngörülür.

Anahtar Kelimeler: Meltblown, Spunlace, Nonwoven, Mikrolif, Emicilik.

1. Giriş

Endüstriyel temizlikten evsel hijyen uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanıma uygun, yüksek performanslı ve çok fonksiyonlu bir kompozit temizlik kumaşı geliştirmek amaçlanmaktadır. Ürün; alt katmanda hidroentanglement (yüksek basınçlı su jetleriyle liflerin mekanik olarak düğümlenmesi) yöntemiyle üretilmiş spunlace kumaş, üst katmanda ise serbest düşüş yöntemiyle yerleştirilen meltblown mikrolif katmanı içeren iki katmanlı, katkısız bir nonwoven yapıdan oluşur. Spunlace yapılar, prosesin doğası gereği yumuşaklık, uyum ve ıslakken dahi yeterli dayanım/emicilik kombinasyonu sunabilirken (hidroentanglement'ın lifleri su jeti ile bağlama prensibi) bu özellikler literatürde ayrıntılı biçimde gösterilmiştir [1].

Meltblown katman ise mikrolif çapı ve yüksek özgül yüzey alanı sayesinde bariyer/filtrasyon ve sıvı yönetimi performansını destekler; bu teknoloji ve tipik lif çap aralıkları kapsamlı derlemelerde özetlenmiştir [2]. Geleneksel "üstüpü"/tekrar kullanılan tekstillerin kısıtlandığı pazarlarda standart, izlenebilir ve tek kullanımlık hijyen ürünlerine yönelim artmaktadır; bu bağlamda önerilen katkısız MB/SL hibrit mimari, çizik riski ve sertlik gibi kullanıcı deneyimi sorunlarını azaltmayı amaçlarken, yüksek ovma etkisi + emicilik + düşük tiftiklenme dengesini hedeflemektedir [3].

2. Materyal and Metot

Meltblown, ergitilmiş polimerin ince deliklerden geçirilip **yüksek hızlı sıcak hava akımları** ile anında inceltilerek mikroliflere dönüştürüldüğü, liflerin bir toplayıcı üzerinde rastgele serilip nonwoven ağ oluşturduğu **tek kademeli** bir prosestir. Süreç; ekstrüder, dişli dozaj pompası

(uniform debi), kalıp/nose tip (polimer dağıtımı ve hava manifoldları), hava hız-sıcaklık-basıcı ayarı ve toplayıcı mesafesi (DCD) gibi istasyonlardan oluşur [3].

Yüksek hızlı (çoğu zaman ses hızının %50–80'i) sıcak hava jeti, kalıp çıkışında eriyiğe sürükleme kuvveti uygulayarak hızlı inceltme/katılaşma sağlar; akış alanı ve lif hareketinin deneysel-görsel incelemeleri de bu mekanizmayı doğrular [5].

Bu çalışmada bahsi geçen ürün iki temel yapı unsurundan oluşmaktadır: spunlace alt katman ve meltblown üst katman. İlk olarak, spunlace alt katman; %50 polyester + % 50 viskon, %60 polyester + %40 viskon, %70 polyester + %30 viskon, %80 polyester + % 20 viskon, %90 polyester + %10 viskon olarak üretilir. %50-90 oranında polyester ve %10-50 oranında viskon içeren kesik elyaflarla hydroentanglement yöntemi kullanılarak üretilir. Bu yapı, kumaşa yüksek mekanik mukavemet ve sıvı emicilik kazandırır. Üretilen kumaş bobinlenerek, çağlık yardımıyla meltblown hattına beslenir. İkinci olarak, 400-800 MFI değerine sahip %100 polipropilen (PP) hammaddesi gravimetrik dozajlama yardımıyla meltblown sisteminde işlenerek mikrofiber lifler haline getirilir. Bu lifler, herhangi bir yönlendirme yapılmaksızın serbest düşüş (free fall) ile doğrudan spunlace alt katman üzerine yayılır. Bu sırada filamentler düzensiz bir şekilde dalgalanır, birbirine dolanır ve yüze temas eden alanlarda meltblown üst katman olarak tanımlanan yapıyı oluşturur. **Şekil 1'de** hibrit yapının makro görünümü verilmiştir.

Şekil 4. Hibrit MB/SL temizlik kumaşı — makro görünüm

Bu çalışmada meltblown-spunlace kompozit yapının oluşturulmasında iki aşamalı bir birleştirme yöntemi uygulanmaktadır. İlk olarak, katmanlar 110-145 °C sıcaklık ve 45-60 bar basınç altında termal kalenderleme işlemine tabi tutulmakta; bu sayede meltblown liflerinin kısmen yumuşamasıyla spunlace tabaka ile yüzeysel bütünleşme (ön bağlama) sağlanmaktadır. Ardından, kompozit yapı ultrasonik birleştirme ile güçlendirilmekte; yüksek frekanslı titreşimler aracılığıyla lokal erime bölgeleri oluşturularak katmanlar arasındaki yapışma mukavemeti artırılmaktadır. Bu iki aşamalı yöntem, kompozit kumaşın mekanik dayanımını ve yapısal stabilitesini optimize etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Free-fall yerleştirilen meltblown üst katman ile spunlace tabanın iki aşamalı bağlanması (termal kalenderleme + ultrasonik) sayesinde hibrit kumaş, katkısız bir mimaride yüksek ovma/scrubbing etkisi üretirken emicilik performansını korumuştur; nitekim deneylerde ürün kendi ağırlığının 4 katı suyu 1 saniyede ve 5 katı yağı 3 saniyede emmiştir. (Figure 1)

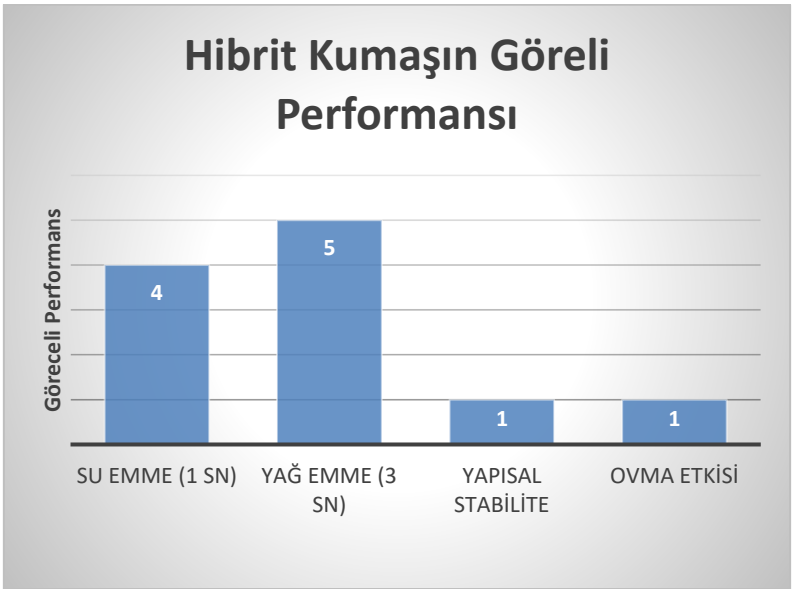


Figure 3. Hibrit (MB/SL) kumaşın göreli performansı: Su emme (1 sn, 4×), yağ emme (3 sn, 5×), yapısal stabilite ve ovma etkisi.

Bu hızlı emme–yüksek kapasite kombinasyonu, çalışmanın "(i) partikül eklemeden yüksek ovma, (ii) spunlace omurgasıyla yüksek emicilik ve ıslak dayanım, (iii) iki aşamalı bağ ile düşük linting ve yapısal stabilite" hipotezlerini destekler. Bulgular, literatürde spunlace'ın kapiler yapı kaynaklı yumuşaklık–emicilik–ıslak dayanım katkısı ile meltblown mikroliflerin yüksek özgül yüzey alanına dayalı sıvı yönetimi/bariyer katkısıyla uyumludur; ayrıca aşındırıcı partikül içeren scrub-pad çözümlerine kıyasla çizik riski düşük bir kullanıcı deneyimi sağlar ve mutfak, endüstriyel alan, ofis ve medikal ortam gibi çoklu segmentlerde tek ürünle performans hedeflerine ulaşma potansiyeli sunar. Bununla birlikte çalışma; (a) sınırlı numune seti, (b) temsilî yüzey paneli ve (c) farklı kimyasal formülasyonlarla uzun dönem yaşlandırma etkilerinin kapsam dışı olması nedeniyle sınırlıdır. İlerleyen dönemlerde ise çalışmalar için EN/ISO standartlarında genişletilmiş doğrulama (ıslak kopma, partikül salımı, aşınma), farklı viskozite/sıcaklıktaki sıvılarla tekrarlı döngü testleri, meltblown lif çap dağılımı ile kalender/ultrasonik parametrelerinin çok hedefli optimizasyonu ve süreç–malzeme girdilerine dayalı LCA/karbon ayak izi değerlendirmesi önerilir.

4. Sonuçlar: Bu çalışma, katkısız spunlace alt + meltblown üst hibrit mimarinin tek bir üründe yüksek ovma etkisi, yüksek ve hızlı emicilik ile düşük linting dengesini sağlayabildiğini göstermiştir: ürün, kendi ağırlığının 4 katı suyu 1 saniyede ve 5 katı yağı 3 saniyede emmiştir; meltblown mikrolif yüzeyinin mikro-topografyası partikül eklemeye gerek kalmadan etkin kir sökme sağlarken, spunlace taban emicilik ve ıslak dayanımı korumuştur; iki aşamalı bağ (termal kalenderleme + ultrasonik) katmanlar arası aderansı ve yapısal stabiliteyi artırmıştır. Elde edilen performans, mutfak, endüstriyel alan, ofis ve medikal ortam gibi farklı kullanım senaryolarında tek ürünle hedef kriterlere ulaşma potansiyeli sunar ve başlangıç hipotezlerini destekler. Bununla

birlikte, farklı yüzey pürüzlülükleri ve kimyasal formülasyonlarla uzun dönem yaşlandırma etkileri ile genişletilmiş EN/ISO test matrisine ihtiyaç olduğu not edilmelidir.

Patents: ABRASİF ETKİLİ HİBRİT KOMPOZİT YAPIDA BİR NONWOVEN KUMAŞ — Türkiye başvuru no: 2025/010870. Güncel durum: 1. incelemeye cevap verildi (ilk inceleme raporuna yanıt sunulmuştur). Başvuru, çalışmada raporlanan ürün ve prosesle doğrudan ilişkilidir: free-fall yerleştirilen meltblown PP mikrolif üst katmanın, spunlace taban üzerine termal kalenderleme + ultrasonik olmak üzere iki aşamalı bağlama stratejisiyle bütünleştirilmesine dayanan katkısız hibrit mimariyi konu alır. Bu yaklaşım; partikül eklemeye gerek duymadan ovma (scrubbing) etkisi üretirken yüksek emicilik ve düşük linting dengesini hedefleyen özgün yüzey/mikro-topografya tasarımını ve ilgili proses penceresini kapsamaktadır. Bu çalışma kapsamında sunulan deneysel bulgular, söz konusu başvurunun teknik etkilerini (hızlı ve yüksek kapasiteli sıvı emiş, çizik riski düşük temizleme, yapısal stabilite) destekler niteliktedir.

Teşekkürler: Bu çalışma, Teknomelt Teknik Mensucat San. ve Tic. A.Ş. tarafından finanse edilmiş ve T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na bağlı Teknomelt Ar-Ge Merkezi bünyesinde yürütülmüştür. Çalışmayla ilişkili patent başvurusu (Türkiye, 2025/010870, "Abrasif Etkili Hibrit Kompozit Yapıda Bir Nonwoven Kumaş") kapsamındaki tüm giderler Teknomelt Teknik Mensucat San. ve Tic. A.Ş. tarafından karşılanmıştır.

References:

1. CChellamani, K. P. "Medical Textiles: The Spunlace process and its application." **2013**.
2. Russell, S. J. (ed.). *Handbook of Nonwovens*, **2. Baskı, 2022.**
3. Drábek, J.; Zatloukal, M. "Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review." *Physics of Fluids*, **2019**.
4. Wu, W. et al. "Experimental Study of the Airflow Field and Fiber Motion in the Melt-Blowing Process." **2024**.

YENİLENEBİLİR VE BİYOBOZUNUR LİFLERLE SÜRDÜRÜLEBİLİR ISLAK MENDİL KUMAŞI GELİŞTİRİLMESİ

ŞEBNEM KAMALAK [*1], HABİBE BAĞCI [1], H. GÜLŞAH ÖZKAN[1], GÖKHAN YARDIM[1], A. FURKAN AKGÜL[1]

[1] Teknomelt Teknik Mensucat San. ve Tic. A.S., Kahramanmaraş, TÜRKİYE.

Özet

Islak mendil sektöründe yaygın olarak kullanılan sentetik lifler doğada çözünmeyen yapıları nedeniyle çevreye ciddi zararlar vermekte ve mikroplastik kirliliğine yol açmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda doğal ve biyobozunur elyaflara dayalı ürün geliştirme çalışmaları önem kazanmıştır. Bu çalışmada yalnızca yenilenebilir ve biyobozunur hammaddelerden oluşan Biona kumaşı geliştirilmiştir. Biona; viskon ve selülozik pulp liflerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, çevre dostu ve yüksek performanslı bir ıslak mendil kumaşıdır. Deneysel çalışmalar kapsamında spunlace (hidroentanglement) yöntemiyle viskon/pulp karışımlarında farklı varyantlar (%70 viskon + %30 pulp, %60 viskon + %40 pulp ve %50 viskon + %50 pulp) üretilmiş ve elde edilen numuneler mekanik özellikler için kopma ve uzama mukavemeti ölçümleri NWSP 110.4 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Hava geçirgenliği testleri EN ISO 9237 standardına göre 200 Pa basınç altında ölçülmüştür. Sıvı emicilik performansı NWSP 010.1 ve ISO 9073-6:2000 standartları doğrultusunda incelenmiştir. Ayrıca biyobozunurluk testleri, ISO 14855 standardına uygun olarak kontrollü kompostlama koşullarında yürütülmüş ve liflerin bozunma hızları karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar, pulp liflerinin kumaşa kazandırdığı doğal selülozik yapı sayesinde sıvı emme kapasitesinin ve biyobozunurluk performansının belirgin şekilde arttığını ortaya koymuş; ayrıca yüksek pulp oranı ürünün daha yumuşak, doğal dokulu ve kullanıcı açısından konforlu bir hale gelmesini sağlamıştır. Çalışma yalnızca doğal elyaflardan oluşan kompozit yapının hem teknik dayanım hem de kullanım deneyimi bakımından pazara uygun bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Biona, sürdürülebilir ve yenilenebilir hammaddelerden üretilmiş, %100 biyobozunur ıslak mendil kumaşı olarak geliştirilmiş olup mikroplastik salınımını engellemekte, karbon ayak izini azaltmakta ve yeşil dönüşüm hedefleriyle uyumlu bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelime(ler): Islak mendil kumaşı, biyobozunur lifler, selülozik pulp, viskon, spunlace, sürdürülebilir tekstiller

1. Giriş

Tek kullanımlık hijyen ürünleri arasında en geniş pazar payına sahip olan ıslak mendiller, günlük yaşamda bebek bakımı, ev hijyeni, kişisel bakım ve endüstriyel temizlik gibi farklı alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır [1]. Ancak bu ürünlerin çoğu, doğada çözünmeyen polyester (PET) ve polipropilen (PP) gibi sentetik liflerden üretilmektedir. Bu malzemeler, kullanıldıktan sonra atık sistemlerine karışarak mikroplastiklere dönüşmekte ve uzun süre doğada kalıcı kirlilik

oluşturmaktadır [2]. Son yıllarda yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin yalnızca çevreye değil aynı zamanda insan sağlığına da ciddi tehdit oluşturduğunu göstermektedir [3]. Bu nedenle, biyobozunur ve yenilenebilir kaynaklara dayalı alternatif malzemelerin geliştirilmesi büyük önem kazanmıştır.

Sürdürülebilir tekstil ve nonwoven üretiminde selülozik lifler ön plana çıkmaktadır. Doğal kökenli, biyouyumlu ve kısa sürede doğada çözünebilen bu lifler, çevre dostu ürünlerin geliştirilmesinde güçlü bir örnektir [4]. Viskon, selüloz esaslı rejeneratif bir lif olarak, su emiciliği ve yumuşak tuşesi sayesinde nonwoven sektöründe yaygın kullanılmaktadır [5]. Bununla birlikte, yüksek maliyeti ve tek başına kullanımda sınırlı performans özellikleri, viskonun farklı katkı malzemeleriyle desteklenmesini gerekli kılmaktadır. Pulp, lignoselülozik kökenli kısa liflerden oluşan selülozik bir malzeme olup düşük maliyetli, doğal ve biyobozunur yapısıyla öne çıkmaktadır. Literatürde, pulp katkısının nonwoven kumaşlara emicilik, dolgunluk ve biyobozunurluk kazandırdığı, aynı zamanda viskon kullanımını dengeleyerek maliyet avantajı sağladığı bildirilmektedir [6,7].

Şekil1. Yenilenebilir Islak Mendil Kumaşı Görseli

Spunlace (hidroentanglement) teknolojisi, yüksek basınçlı su jetleri ile liflerin birbirine dolaştırılması esasına dayalı olup, bağlayıcı kimyasallara ihtiyaç duymadan yüksek mukavemetli ve homojen yapılı dokusuz yüzeylerin üretimine imkan vermektedir [8]. Bu yöntem, özellikle ıslak mendil üretiminde liflerin doğal yapısını koruyarak emicilik, yumuşaklık ve cilt dostu özellikler sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak pulp katkılı spunlace kumaşlarının üretimi halen sınırlı düzeydedir ve özellikle Türkiye'de bu konuda sanayileşmiş bir uygulama bulunmamaktadır. Bu bağlamda Teknomelt tarafından geliştirilen **Biona kumaşı**, yalnızca viskon ve pulp liflerinden oluşan, %100 biyobozunur bir ıslak mendil kumaşı olarak tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında farklı pulp oranları (%30, %40, %50) ile elde edilen kumaşların mekanik (kopma mukavemeti, uzama), fiziksel (hava geçirgenliği, kalınlık), fonksiyonel (su emiciliği) ve çevresel (biyobozunurluk) performansları detaylı olarak incelenmiştir. Bu araştırma, mikroplastik salınımını önleyen, karbon ayak izini azaltan ve Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın çevre dostu ürün kriterleriyle uyumlu sürdürülebilir bir alternatifin yerli üretimle gerçekleştirilebileceğini göstermektedir [9].

Sonuç olarak, Biona kumaşının geliştirilmesi yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda Türkiye'nin nonwoven sektöründe rekabet gücünü artıracak stratejik bir adım niteliği taşımaktadır. Bu proje, ithalata bağımlılığı azaltarak yerli üretim kapasitesini güçlendirecek, aynı zamanda uluslararası pazarda çevreye duyarlı ürünler kategorisinde Türkiye'nin konumunu ileriye taşıyacaktır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada yalnızca yenilenebilir ve biyobozunur hammaddelerden oluşan Biona ıslak mendil kumaşları üretilmiştir. Kullanılan lifler selülozik kökenli viskon ve kraft hamurundan elde edilen pulp olup, her iki hammadde de ISO 9706 ve EN 13432 standartlarına uygun biyobozunurluk kriterlerini karşılamaktadır. Pulp lifleri, kimyasal olarak ağartılmış kraft yöntemi ile elde edilmiş ve kısa lif yapısı sayesinde yüksek sıvı emme kapasitesi ile ön plana çıkmıştır. Viskon ise 1,71 dtex inceliğe ve 51 mm lif uzunluğuna sahip olup, su emiciliği ve yumuşak tuşesi ile katkılı kompozit yapının performansını desteklemiştir.

Üretim, spunlace (hidroentanglement) teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde yüksek basınçlı su jetleri kullanılarak lifler mekanik olarak birbirine bağlanmış, kimyasal bağlayıcı kullanılmadan dokusuz yüzeylerin homojen ve yüksek mukavemetli olması sağlanmıştır. Numuneler farklı pulp katkı oranları ile hazırlanmıştır: %70 viskon + %30 pulp, %60 viskon + %40 pulp ve %50 viskon + %50 pulp. Hedef gramaj değerleri 60 g/m² ve 80 g/m² olarak belirlenmiş ve üretim parametreleri bu doğrultuda optimize edilmiştir.

Üretilen kumaş numuneleri üzerinde çeşitli testler uygulanmıştır. Mekanik özellikler için kopma ve uzama mukavemeti ölçümleri NWSP 110.4 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Hava geçirgenliği testleri EN ISO 9237 standardına göre 200 Pa basınç altında ölçülmüştür. Sıvı emicilik performansı NWSP 010.1 ve ISO 9073-6:2000 standartları doğrultusunda incelenmiştir. Ayrıca biyobozunurluk testleri, ISO 14855 standardına uygun olarak kontrollü kompostlama koşullarında yürütülmüş ve liflerin bozunma hızları karşılaştırılmıştır.

Tüm deneysel çalışmalar, Teknomelt Ar-Ge Merkezi laboratuvarlarında yürütülmüş olup, kalite değerleri laboratuvar ölçümleri ile doğrulanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada yalnızca viskon ve pulp liflerinden oluşan biyobozunur ıslak mendil kumaşları üretilmiş ve farklı pulp oranlarının (%30, %40, %50) kumaş özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, pulp katkısının kumaş performansı üzerinde çok yönlü etkiler yarattığını ortaya koymuştur.

Emicilik testleri sonuçlarına göre, tüm numunelerde %10–11 seviyelerinde emicilik değerleri elde edilmiştir. Bu oran, selülozik liflerin hidrofilik yapısından kaynaklanmakta ve pulp katkısının emiciliği koruduğunu göstermektedir. %50 pulp içeren Biona-75 numunesi ile %30 pulp içeren Biona-65 arasında emicilik bakımından anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Dolayısıyla pulp oranının artırılması emiciliği olumsuz etkilememiş, tüm varyantlarda yüksek sıvı tutma kapasitesi korunmuştur.

Mekanik mukavemet testleri incelendiğinde, pulp oranı arttıkça kopma mukavemetinde azalma gözlenmiştir. %70 viskon–%30 pulp içeren Biona-65 numunesi kuru mukavemet açısından en yüksek değerlere (61,3 N/5 cm MD, 24,0 N/5 cm CD) ulaşmıştır. %60 viskon–%40 pulp oranlı

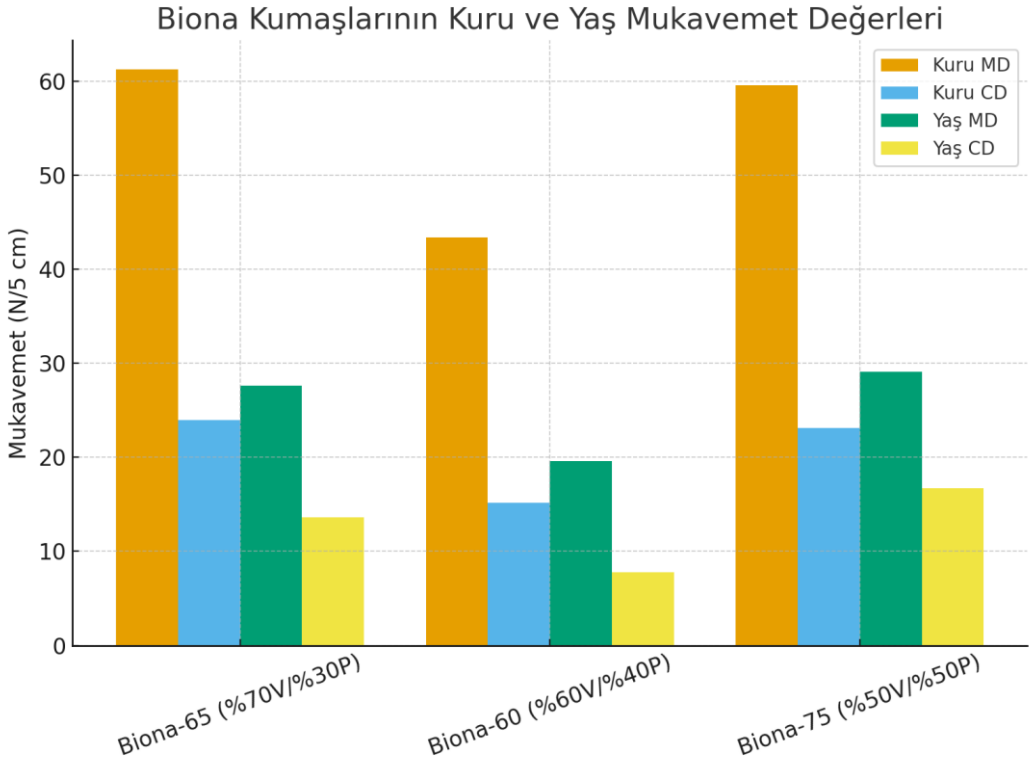
Biona-60'ta bu değerler 43,4 / 15,2 N/5 cm olarak ölçülmüştür. %50 viskon–%50 pulp içeren Biona-75 numunesi ise 59,6 / 23,1 N/5 cm ile orta seviyede sonuçlar vermiştir. Yaş mukavemet değerlerinde de benzer bir eğilim görülmüş; %30 pulp içeren kumaş en yüksek değerleri, %40 pulp içeren ise en düşük değerleri göstermiştir. Bu bulgular, pulp liflerinin kısa ve gevrek yapısının yüksek oranlarda mukavemeti düşürdüğünü, ancak optimum oranlarda performans kaybının tolere edilebilir düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Hava geçirgenliği açısından testlerde belirlenen değerler pulp oranına bağlı olarak farklılık göstermiştir. %40 pulp içeren numuneler, gözenek yapısının daha açık olması sayesinde sıvı transferini kolaylaştırmış ve kullanıcı açısından yumuşaklık hissini artırmıştır. Bu durum, emicilik ile mekanik mukavemet arasında dengeli bir performans sunmuştur.

Biyobozunurluk değerlendirmelerinde, pulp oranının artışıyla kumaşların bozunma hızının yükseldiği görülmüştür. Özellikle %50 pulp içeren numuneler, ISO 14855 standardına göre yapılan kompost testlerinde en yüksek biyobozunma oranına ulaşmıştır. Bu sonuç, mikroplastik oluşumunu engelleyen çevre dostu bir ürün tasarımının mümkün olduğunu göstermektedir.**4.**

Tablo 1. Biona (Viskon + Pulp) Kumaşlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Numune	**Kompozisyon**	**Gramaj (g/m²)**	**Kalınlık (mm)**	**Kuru Mukavemet MD/CD (N/5 cm)**	**Yaş Mukavemet MD/CD (N/5 cm)**	**Emicilik (%)**
Biona-65	%70 Viskon / %30 Pulp	63–69	0,62–0,67	61,3 / 24,0	27,6 / 13,6	10–11
Biona-60	%60 Viskon / %40 Pulp	58–62	0,60–0,65	43,4 / 15,2	19,6 / 7,8	10–11
Biona-75	%50 Viskon / %50 Pulp	70–77	0,62–0,65	59,6 / 23,1	29,1 / 16,7	10–11



Şekil 2. Biona Kumaşlarının Kuru ve Yaş Mukavemet Değerleri

Genel olarak, sonuçlar viskon/pulp karışımlarının sürdürülebilir ıslak mendil kumaşı üretimi için teknik olarak uygulanabilir ve ticari açıdan değerli bir alternatif sunduğunu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, pulp oranının çok yüksek olması mukavemette kısmi kayıplara neden olduğundan, gelecekte yapılacak çalışmalarda lif boyutlarının, hidroentanglement basınçlarının ve karışım homojenliğinin optimize edilmesi önerilmektedir. Ayrıca bambu, buğday sapı ve şeker kamışı gibi farklı selülozik kaynaklardan elde edilecek pulp türlerinin incelenmesi, ürün çeşitliliği ve performans geliştirme açısından yeni araştırma alanları sunmaktadır.

Sonuçlar: Bu çalışmada yalnızca viskon ve pulp liflerinden üretilmiş biyobozunur ıslak mendil kumaşları geliştirilmiş ve farklı pulp oranlarının (%30, %40, %50) kumaş özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, pulp katkısının emiciliği yüksek seviyede koruduğunu ancak mekanik mukavemet değerlerinde kısmi azalmalar yarattığını göstermiştir. Özellikle %40 pulp katkılı kumaşlar emicilik ve mukavemet açısından dengeli bir performans sergilerken, %50 pulp oranı biyobozunurluğu artırarak çevresel sürdürülebilirlik açısından en güçlü sonucu vermiştir. Genel olarak, Biona kumaşları mikroplastik salınımını önleyen, karbon ayak izini azaltan ve çevre dostu özellikleriyle öne çıkan yenilikçi bir ürün olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda ulusal ve uluslararası pazarda rekabet gücü yüksek, yerli üretim avantajına sahip bir ürünün ticarileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca ilerleyen çalışmalarda lif oranlarının yanı sıra üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve farklı selülozik kaynaklardan elde edilen pulp çeşitlerinin incelenmesi, ürün performansının daha da iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Patentler: Bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla ilişkili olarak patent başvurusunda bulunulacaktır.

Teşekkürler : Bu çalışma, Teknomelt Teknik Mensucat Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından desteklenmiş ve T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlık tescilli Ar-Ge Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları altyapı ve destek için Teknomelt yönetimi ve Ar-Ge ekibine teşekkür ederiz.

Kaynaklar:

1. Smith, T., & Brown, L. (2019). *Disposable wipes market trends and sustainability challenges.* Journal of Hygiene Products, 45(2), 101–115.
2. Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2016). Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. *Marine Pollution Bulletin,* 112(1–2), 39–45.
3. Prata, J. C. (2018). Microplastics in wastewater: A review on sources, occurrence and fate. *Science of the Total Environment,* 626, 1207–1221.
4. Shen, L., & Patel, M. K. (2008). Life cycle assessment of man-made cellulose fibres. *Lenzinger Berichte,* 87, 1–59.
5. Woodings, C. (2001). *Regenerated cellulose fibres.* CRC Press.
6. Sampson, W. W., & Urquhart, J. (2017). Structure and mechanics of paper and nonwoven materials. *Cellulose,* 24, 4341–4360.
7. Hubbe, M. A., et al. (2020). Prospects for using nanocellulose as a sustainable additive in nonwovens. *BioResources,* 15(2), 3996–4022.
8. Albrecht, W., Fuchs, H., & Kittelmann, W. (2016). *Nonwoven fabrics: Raw materials, manufacture, applications, characteristics, testing processes.* Wiley-VCH.
9. European Commission. (2020). *A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent.* Retrieved from: https://ec.europa.eu/green-deal

AIR PERMEABILITY PROPERTIES OF THREE-THREAD KNITTED FABRICS PRODUCED WITH SUSTAINABLE LYOCELL/ORGANIC COTTON FIBER BLENDS

Esin SARIOĞLU[1]

[1]Fine Arts Faculty, Department of Textile and Fashion Design, Gaziantep University, Gaziantep, 27310, Türkiye

Abstract

Air permeability is a decisive factor for the comfort and performance of knitted fabrics, especially in fleece structures. This study evaluates the air permeability of greige and black-dyed three-thread fleece fabrics made from yarns of 50% Ecocell brand lyocell and 50% organic cotton. Ground and binder yarns were Ne 30/1, while fleecy yarn was Ne 20/1. Four sample groups were produced with yarn consumptions calculated for 100 needles: 43/30/17, 45/30/17, 43/30/18.4, and 45/30/18.4 cm for face, binder, and fleecy yarns respectively. The results showed that greige fabrics exhibited higher air permeability, ranging from 1080–1320 L/m²/s, due to their more open structure. After black dyeing, air permeability values dropped significantly, recorded between 770–990 L/m²/s. Fabrics with lower face yarn consumption (43 cm) showed higher air permeability, indicating a looser structure, while fabrics with increased fleecy yarn consumption (18.4 cm) had reduced permeability due to compactness and smaller pore size. In conclusion, both yarn consumption parameters and dyeing processes strongly influenced air permeability.

Keyword: Three-thread fleece, Ecocell, organic cotton, knitted fabric, air permeability.

1. Introduction

Three thread fleece knitted fabrics are technical textile materials that offer high weight, increased volume, good thermal insulation, soft feel, and enhanced comfort properties thanks to their multi-layered and voluminous structure consisting of a face yarn, binder yarn, and fleecy yarn [1–7]. The fleecy structure, raised on the inner side through raising and napping processes, traps air in the pores, creating an "air cushion" effect and increasing thermal comfort, while the face yarn on the outer side provides a more stable appearance and mechanical strength [2,4,8,9]. These fabrics offer advantages such as flexibility, moisture absorption, air permeability, water vapor permeability, low thermal conductivity, dimensional stability, burst strength, and good pilling resistance with appropriate design; these properties vary significantly depending on the fiber type (cotton, polyester, Tencel, Bamboo, etc.), yarn structure, loop length, tuck pattern, raising, and finishing processes [1,3,5-6,10-12]. The literature indicates that three thread fleece fabrics are widely used in sportswear, activewear, outdoor products, sweatshirts, tracksuits, hoodies, winter and cold-protective clothing, thermal underwear, children's clothing, blankets, toys, and home textiles, as well as for lining and insulation in outerwear [2-4, 6-7, 9-10,12-14]. Thus, three thread fleece fabrics stand out as versatile and functional textile structures that provide high thermal and physiological comfort and can be adapted to different areas of use.

İn this study, the air-permeability properties of three thread fleece fabrics produced from Ecocell/organic cotton yarns as a function of face and fleecy yarn consumption and dyeing process.

In that respect, four fleece fabric groups were knitted with different face and fleecy yarn consumptions (43/30/17, 45/30/17, 43/30/18.4 and 45/30/18.4 cm per 100 needles. Fabric properties such as air permeability, weight and thickness were determined and analyzed.

2. Material and Method

In the context of this study, Ecocell and combed cotton fiber blended with 50%/50% ratio were manufactured at different yarn number (Ne 30/1 used as ground and binder yarns, Ne 20/1 used as fleecy yarn) by using ring yarn spinning system. Ecocell fiber has a fineness of 1.3 dtex, fiber length of 38 mm, tenacity of 41 cN/tex, and elongation of 11%. Combed cotton has a micronaire value of 4.90, fiber length of 30.52 mm, tenacity of 31.4 g/tex, and elongation of 5.4%.

Considering the yarn consumptions for 100 needles, the knitted fabric samples whose knitting design is shown in Figure 1 were produced with cam configuration on a circular knitting machine: the face/binder/back (fleecy) yarn lengths were 43/30/17 cm, 45/30/17 cm, 43/30/18.4 cm, and 45/30/18.4 cm, respectively. In the knitting process all production parameters were kept constant. Then, raw knitted fabric were dyed in black color at the same condition.

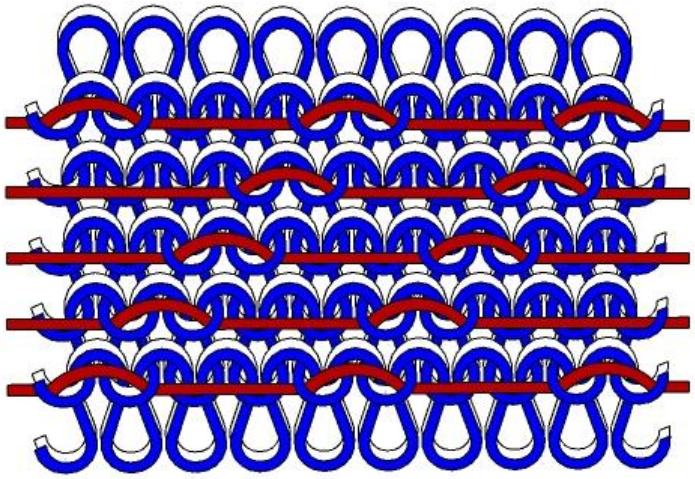


Figure 1. Schematic representation of three thread fleece fabric

Prior to testing, all yarn samples were conditioned under standard laboratory conditions (20 ± 2 °C and 65 ± 4% RH) in accordance with the BS EN ISO 139 standard. In accordance with ISO 139, yarn mass irregularity was measured simultaneously with yarn hairiness and yarn faults using an Uster® Tester 5 apparatus at a testing speed of 400 m/min for 2.5 minutes, following the ISO 16549 standard. Five measurements were performed for each yarn sample, and the reported values represent the mean of these results. Yarn tenacity and elongation tests were carried out using an Uster® Tensorapid 4 device at an extension rate of 5 m/min with a gauge length of 500 mm, in compliance with the EN ISO 2062 standard.

Raw and black dyed three thread fleece fabrics weight and thickness were determined according to the standards, respectively. The air permeability of the three-yarn knitted fabrics was measured according to the EN ISO 9237 standard, as the volume of air passing from one surface of the fabric to the other under a pressure difference of 100 Pa over a test area of 100 cm².

3.Results and Discussion

In this study, yarn consumption values were analyzed to determine the weight, thickness and air permeability properties of raw and black dyed three thread fleece fabrics. Accordingly, face, fleecy yarn consumption were selected as key parameters, binder consumption was kept constant. Face/binder/fleecy yarn consumption parameters were selected as 43/30/17 cm, 45/30/17 cm, 43/30/18.4 cm, and 45/30/18.4 cm.

3.1. Yarn properties

Yarn test results are illustrated in Table 1. The results presented in Table 1 provides a comparative assessment of the performance and quality of two different yarn counts produced from a 50% Ecocell/50% organic cotton blend. The results show that the CVm% value measured in the Ne 20/1 yarn is lower, and it is observed that the number of thick places (+50%/km) and especially neps (+200%/km) in this yarn is significantly lower. When examining the mechanical properties, it was determined that the yarn tenacity of these two yarn samples are similar tenacity values; however, the Ne 20/1 yarn has a higher break elongation value than Ne 30/1 yarn.

Table 1. Properties of yarn sample

Sample	Yarn Number (Ne)	Blend Ratio (%)	Unevenness (CVm%)	Thin places (-50%/km)	Thick places (+50%/km)	Neps (+200%/km)	Yarn Tenacity (Rkm)	Yarn Elongation (%)
Ecocell/ Organic cotton	30/1	50/50	11.72	0.00	5.00	11.67	21.09	6.19
Ecocell/ Organic cotton	20/1	50/50	9.78	0.00	1.00	1.50	21.20	7.29

3.2. Three thread fleece fabric physical properties

In Table 2, the weight and thickness properties of three thread fleece fabrics with four different yarn consumption values of raw and black dyed fabrics. When examining the raw fabrics, it is observed that as yarn consumption increases, the fabric weight also increases; indeed, while the sample with a consumption of 43/30/17 cm weighed 201 g/m², the sample with increased face and fleecy yarn consumption of 45/30/18.4 cm reached a weight of 240 g/m². Similarly, thickness values also showed a parallel increase with yarn consumption, rising from 1.43 mm to 1.50 mm. In black dyed fabrics, the weight values increased significantly compared to raw fabrics. During the dyeing process, the swelling of the fibers and the absorption of water by the material, followed by the reduction of inter-fiber spaces after drying, resulted in a more compact fabric structure, and the weights increased to the range of 246–255 g/m². In contrast, the dyeing process caused a general decrease in fabric thickness; the thickness, which was in the range of 1.43–1.50 mm in raw fabrics, decreased to 1.26–1.33 mm levels in dyed samples. This can be explained by the closing of pores and the fabric becoming more compact due to the tightening of the structure after dyeing.

Table 2. Physical properties of three thread fleece fabric samples

Sample	Yarn Consumption (100 needles/cm)	Weight (g/m^2)	Thickness (mm)
Raw Fabric	43/30/17	201	1.43
	43/30/18.4	222	1.46
	45/30/17	222	1.47
	45/30/18.4	240	1.50
Black Dyed Fabric	43/30/17	249	1.26
	43/30/18.4	255	1.31
	45/30/17	246	1.33
	45/30/18.4	253	1.31

3.3. Three thread fleece fabric air permeability properties

The air permeability results of both raw and black dyed three thread fleece fabric samples are illustrated in Figure 1.

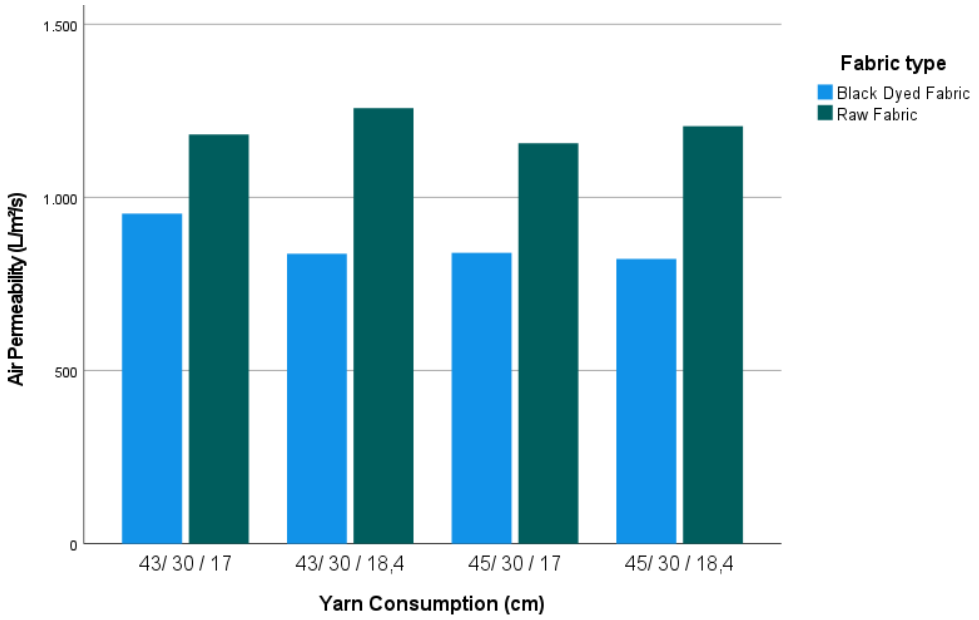


Figure 1. Air permeability of three thread fleece fabric samples

When the results are examined, it is observed that samples with low face yarn consumption (43 cm) exhibit higher air permeability in both raw and dyed states. This finding can be attributed to the fabric gaining a looser, more open structure as the amount of yarn used on the surface decreases, thereby facilitating easier air flow. The effect of fleecy yarn consumption, on the other hand, shows a marked difference between the raw and black dyed fabric samples. In raw fabrics, the increase in fleecy yarn consumption from 17 cm to 18.4 cm slightly increased air permeability; this can be attributed to the more voluminous, porous, and flexible structure formed on the lower surface facilitating air passage. In contrast, the same increase was found to reduce air permeability in black dyed fabrics. During the dyeing process, the swelling of the fibers, the proximity of the yarns to each other, and the reduction in pore size led to a stronger feeling of compactness and greater restriction of air flow in samples with higher fleecy yarn content.

4. Conclusion

Within the scope of this study, the effects of yarn consumption parameters on the air permeability of three thread fleece fabrics were examined. In this context, face, binder and fleecy yarn consumption values were evaluated together with the influence of the dyeing process. The air permeability of the both raw and black dyed fabrics was determined.

Results are summarized as follows;

- It has been concluded that the air permeability of raw fabrics is higher than that of dyed fabrics in all cases.
- Changes in yarn consumption (especially the increase in fleecy yarn from 17 cm to 18.6 cm) were found to affect air permeability. In raw fabrics, air permeability tended to increase with an increase in fleecy yarn. However, this difference was more limited in dyed fabrics.
- The dyeing process reduces air permeability by approximately 20–30% by filling the fabric's pores.
- As yarn consumption increases (especially fleecy yarn), higher air permeability is observed in raw fabrics. This can be interpreted as the formation of different pore structures on the fabric surface due to yarn arrangement.

References

[1]. Badr, A. A., & El-Nahrawy, A. (2016). Moisture properties of raised 3-thread fleece fabric knitted with different face and fleecy yarns. Alexandria Engineering Journal, 55, 2881–2892.
[2]. Asker, Ğ., Akkuş, E., Arslan, İ., Sevilmiş, M., Pektaş, K., & Balcı, O. (2019). Investigation of the Fibre Loss Effect of Raised 3-Thread Fleecy Fabric. Tekstil ve Mühendis, 26(116), 346–352. DOI: 10.7216/1300759920192611606.
[3]. Kaikobad, M., Mahmud, M. F., Sayam, A., Paul, S. C., Reza, M. M. A., Faruque, M. O., Apel, N. A., & Sarker, M. E. (2023). Evaluation of physical and mechanical characteristics of three-thread fleece knit fabric for their structural changes. Heliyon, 9, e21588.
[4]. Chowdhury, M., Babu, M. S., Hossain, S., Mia, R., & Kabir, S. M. M. (2024). Optimizing textile dyeing and finishing for improved energy efficiency and sustainability in fleece knitted fabrics. Cleaner Energy Systems, 9, 100154. https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100154.
[5]. Fouda, A. E. (2018). Effect of backed yarn characteristics on two-thread fleece knitted fabric properties. Indian Journal of Fibre & Textile Research, 43(2), 247–251.
[6]. Rassel, M. A., & Hoque, M. M. U. (2019). An Investigation into the Dimensional Stability of 100% Cotton Fleece Knit Fabric. Journal of ELT and Education, 2(2), 41–47.
[7]. Özcan, G., & Candan, C. (2005). Properties of Three-Thread Fleece Fabrics. Textile Research Journal, 75(2), 129–133.
[8]. Asker, Ğ., & Balcı, O. (2022). Investigation of the effect of raising and finishing process on the physical performance of 3-thread fleece fabric. Tekstil ve Konfeksiyon, 32(3), 183–192. DOI: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.868761.
[9]. Natarajan, S., Sindhujaa, M. S., Sherin Vedha, M., & Kiruthik, R. (2022). Investigation on Comfort Properties of Various Three Thread Fleece Knitted Fabric Qualities. IJARIIE, Vol. 8, Issue 3, 4314–4325.
[10]. Badr, A. A., & El-Nahrawy, A. (2016). Performance of raised 3-thread fleece knitted fabric with different face and fleecy yarns. Beltwide Cotton Conferences, New Orleans, LA, 927–942.

[11]. Islam, R., Islam, M. A., Jisan, J. R., Haider, A. M., & Muntasir, A. (2024). Prediction of Bursting Strength and Pilling Rating of Three Thread Fleece Fabric using Artificial Neural Network. International Journal of Textile Engineering and Management, 1(1), 23–27.
[12]. Hossain, M. S., Islam, M. M., Dey, S. C., & Hasan, N. (2021). An approach to improve the pilling resistance properties of three thread polyester cotton blended fleece fabric. Heliyon, 7, e06921.
[13]. Islam, S., Akter, S., & Islam, S. (2020). Characterization of Elastic Properties Accountable to Three Thread Fleece Fabrics. Advance Research in Textile Engineering, 5(4), 1057.
[14]. Islam, M. A., Rokonuzzaman, M., & Hasan, M. Z. (2018). Analysis on Thermal Comfortability of Different Three Thread Fleece Fabric. International Journal of Current Engineering and Technology, 8(6), 1675–1678.

HAVA ARAÇLARINDA KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMASI

YİĞİT GÜNERİ [*1,2], KEMAL FİDANBOYLU [1]

[1]Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE
[2]Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, TUSAŞ-Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Merkezi, Bursa, TÜRKİYE

Özet

Havacılık sektörü gibi güvenliğin çok kritik öneme sahip olduğu alanlarda, sistemlerin arızalanmadan önce tespit edilmesi operasyonel süreklilik ve bakım maliyetlerinin optimizasyonu açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, genel havacılık uçuşlarına ait sensör verilerinden oluşan NGAFID (National General Aviation Flight Information Database) veri seti kullanılarak kalan faydalı ömür (RUL) tahmini yapılmıştır. Doğrusal olmayan sistemlerde etkili olan Unscented Kalman Filtresi (UKF), öznitelik çıkarımı ve veri yumuşatma için kullanılmıştır. Çıkarılan öznitelikler dört farklı ağaç tabanlı regresyon modeli ile işlenmiştir. Regresyon modeli olarak Random Forest, XGBoost, HistGradientBoosting ve LightGBM algoritmaları kullanılmıştır. Başarım sonuçları incelendiğinde 0.08'lik MAE (Mean Absolute Error) ve 0.97'lik R^2 (Determination Coefficient) skoru olan Random Forest modeli, başarımı ile en yüksek doğruluk sonucunu üretmiştir. Elde edilen bulgular, Kalman filtresi temelli veri füzyonunun kestirimci bakım uygulamalarında etkin biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci Bakım, RUL, Kalman Filtresi, UKF, Random Forest, NGAFID, Sensör Füzyonu

1. Giriş

Günümüzde havacılık gibi yüksek güvenilirlik gerektiren sektörlerde, sistemlerin arızalanmadan önceki durumlarını tespit ederek bakım süreçlerini planlama ihtiyacı artmıştır. Bu amaçla geliştirilen kestirimci bakım (Predictive Maintenance) sistemleri, ekipmanların çalışmasını izleyerek arızaları önceden tahmin edebilmektedir [1]. Böylece operasyonel verimlilik artmakta ve bakım maliyetleri azalmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe, uçak sistemlerinde meydana gelen arızaların güvenlik riski oluşturması nedeniyle, bu tür kestirimci yöntemlerin uygulanabilirliği büyük önem taşımaktadır [2].

Prognostik sağlık yönetimi olarak adlandırılan PHM (Prognostics and Health Management) yaklaşımı, bakım süreçlerinde tahmin gerçekleştirme için kullanılan bir yaklaşımdır ve ekipmanların RUL (Remaining Useful Life) olarak adlandırılan kalan faydalı ömürlerini tahmin etmeyi hedefler [3]. RUL tahminleri; bakım planlaması, yedek parça tedariği ve operasyonel süreklilik açısından karar vericilere büyük avantajlar sunar. Bu tahminlerin sağlıklı yapılabilmesi için gerçek uçuşlardan elde edilmiş yüksek kaliteli veriler gereklidir. Ancak etik, güvenlik ve maliyet sorunları nedeniyle gerçek uçuş sırasında arıza oluşum verisi toplamak oldukça zordur.

Bu zorluğu aşmak için geliştirilen NGAFID (National General Aviation Flight Information Database), kamuya açık en geniş uçuş ve bakım günlükleri veri setlerinden biridir. Cornell Üniversitesinin arşivinde bulunan NGAFID veri seti, 28.935 uçuşa ait 31.177 saatlik uçuş verisi ile birlikte 2.111 plansız bakım olayını ve bu olaylara ait detaylı sınıflandırmaları içermektedir [4]. Bu veri seti, simülasyon yerine gerçek verilerden oluştuğu için çevre koşullarında meydana gelen arızaların takibini mümkün kılarak literatürde önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca uçuşların bakım durumuna göre "öncesi" ve "sonrası" şeklinde etiketlenmiş olması, RUL tahmininde etik ve gerçekçi bir yaklaşım sağlar [4,5].

Yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmaları, bu tip karmaşık ve yüksek boyutlu verilerden anlamlı öznitelikler çıkarmada oldukça etkilidir. Ancak doğru algoritmanın seçimi, tahmin doğruluğu açısından kritik rol oynamaktadır. Bu durumlar göz önüne alındığında, bu çalışmada Kalman filtre ailesinin UKF varyantı kullanılmıştır. UKF çıktılarından elde edilen öznitelikler regresyon modellerine beslenerek RUL tahmini yapılması amaçlanmıştır. Doğrusal olmayan sistemlerde dahi yüksek tahmin başarısı sunması nedeniyle UKF tercih edilmiştir [6].

2. Materyal ve Metot

Yapılan çalışmada, uçakta bulunan sensörlerden elde edilen veriler kullanılarak hava aracının Kalan Faydalı Ömrü (RUL) tahmin edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan yöntemler, veri seti, ön işleme adımları, filtreleme tekniği ve regresyon modeli aşağıda özetlenmiştir.

2.1 Veri Seti

Veri seti, 28.935 uçuşa ve 2.111 planlanmamış bakım olayına ait sensör ölçümleri içermekte olup toplamda 31.177 saatlik uçuş verisi sunmaktadır. Verilerin tümü Cessna 172 uçağından elde edilmiştir. Cessna 172 uçağı, sivil havacılıkta yaygın olarak kullanılan, tek motorlu ve dört kişilik hafif bir uçaktır. 1955'ten beri üretilmekte olup, özellikle uçuş eğitimi ve genel havacılık operasyonlarında ideal bir platform olarak kabul edilmektedir [7,8].

Şekil 1. Cessna 172 [8]

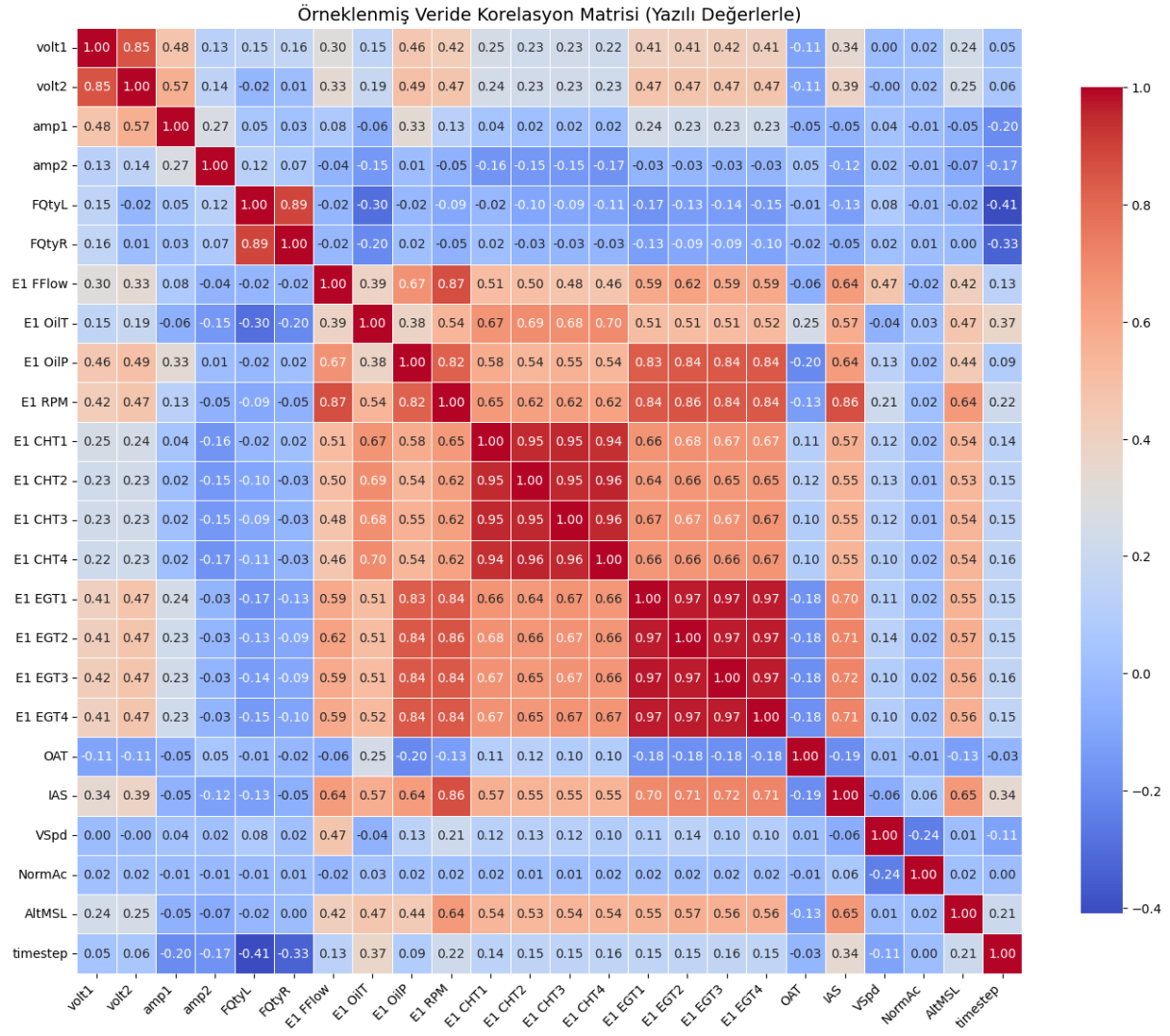
Analizlerde, NGAFID olarak adlandırılan kamuya açık, gerçek uçuş verilerini ve bakım günlüklerini içeren veri seti kullanılmıştır [4]. Veri setinde bulunan değişkenlerin adları, açıklaması ve veri tipleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Veri seti açıklaması

Değişken Adı	**Açıklama**	**Veri Tipi**
Master Index	Her uçuşa özel benzersiz kimlik numarası	Sayısal
Date	Uçuşun gerçekleştiği tarih	Tarih
Time	Veri kaydının alındığı zaman	Zaman
AltMSL	Uçağın deniz seviyesinden yüksekliği (feet)	Sayısal
IAS (Indicated Air Speed)	Gösterilen hava hızı	Sayısal
E1 RPM	Motorun dakika başına devir sayısı	Sayısal
Oil Pressure	Motor yağ basıncı (psi)	Sayısal
E1 OilT	Motor yağ sıcaklığı (°F)	Sayısal
E1 EGT1, E1 EGT2, E1 EGT3, E1 EGT4	Egzoz gazı sıcaklıkları (her silindir için ayrı)	Sayısal
E1 CHT1, E1 CHT2, E1 CHT3, E1 CHT4	Silindir başı sıcaklıkları	Sayısal
FQtyL, FQtyR	Sol-sağ yakıt deposundaki yakıt miktarı	Sayısal
E1 FFlow	Motorun yakıt tüketim hızı (fuel flow)	Sayısal
VSpd	Dikey hız (Vertical Speed) - uçağın tırmanma/alçalma hızı	Sayısal
NormAc	Normal ivmelenme (G-kuvveti)	Sayısal
volt1	Ana elektrik sisteminin voltajı	Sayısal
volt2	Yedek elektrik sisteminin voltajı	Sayısal
amp1	Ana batarya üzerinden geçen akım	Sayısal
amp2	Yedek batarya üzerinden geçen akım	Sayısal
OAT (Outside Air Temperature)	Dış hava sıcaklığı	Sayısal
before_after	Bakımdan önce mi sonra mı olduğunu belirten etiket	Kategorik
RUL	Kalan kullanım ömrü (Remaining Useful Life) etiketi (0–4 arası sayısal)	Sayısal

2.2 Veri Analizi

Örneklenmiş bir uçuştan alınan verilere ait Pearson korelasyon katsayıları hesaplanarak değişkenler arası doğrusal ilişkiler analiz edilmiştir. Korelasyon matrisi, -1 ile +1 arasında değerler alarak değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Pozitif korelasyon, değişkenlerin birlikte artma eğiliminde olduğunu, negatif korelasyon ise değişkenler arasında ters orantı olduğunu ifade eder [9]. Kullanılan veri setindeki değişkenler arasındaki korelasyon değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Korelasyon matrisi

E1 RPM ile *EGT* ve *CHT* grubu değişkenleri arasında anlamlı pozitif korelasyonlar gözlemlenmiştir. Bu ilişki, motor devri arttıkça egzoz ve silindir sıcaklıklarının da arttığını ortaya koymaktadır.

E1 OilP ve *E1 FFlow* arasında ($r \approx 0.67$) bir korelasyon vardır. Bu durum, motor yağı basıncı ile yakıt tüketim hızı arasında beklenen ilişkiyi doğrulamaktadır.

FQtyL ve *FQtyR* (sol ve sağ yakıt miktarı) arasında oldukça yüksek korelasyonlar gözlemlenmiştir ($r \approx 0.89$). Bu durum, tanklar arası yakıt dengesinin eşzamanlı hareket dağılımı yaptığını göstermektedir.

OAT (dış ortam sıcaklığı) ile diğer değişkenler arasında genel olarak zayıf veya negatif korelasyonlar görülmektedir. Özellikle *EGT* ve *CHT* gibi sıcaklık değişkenleriyle ilişkisi zayıftır. Bu da motor içi sıcaklıkların dış hava sıcaklığından bağımsız olarak kontrol edildiğini göstermektedir.

timestamp değişkeni ile genel olarak düşük düzeyde pozitif korelasyonlar gözlemlenmektedir. Bu, zamanla birlikte çoğu değişkenin sistematik bir artış veya azalış eğilimi sergilemediğini, değişkenliğin zamanla düzensiz dağıldığını göstermektedir.

2.3 Veri Ön İşleme

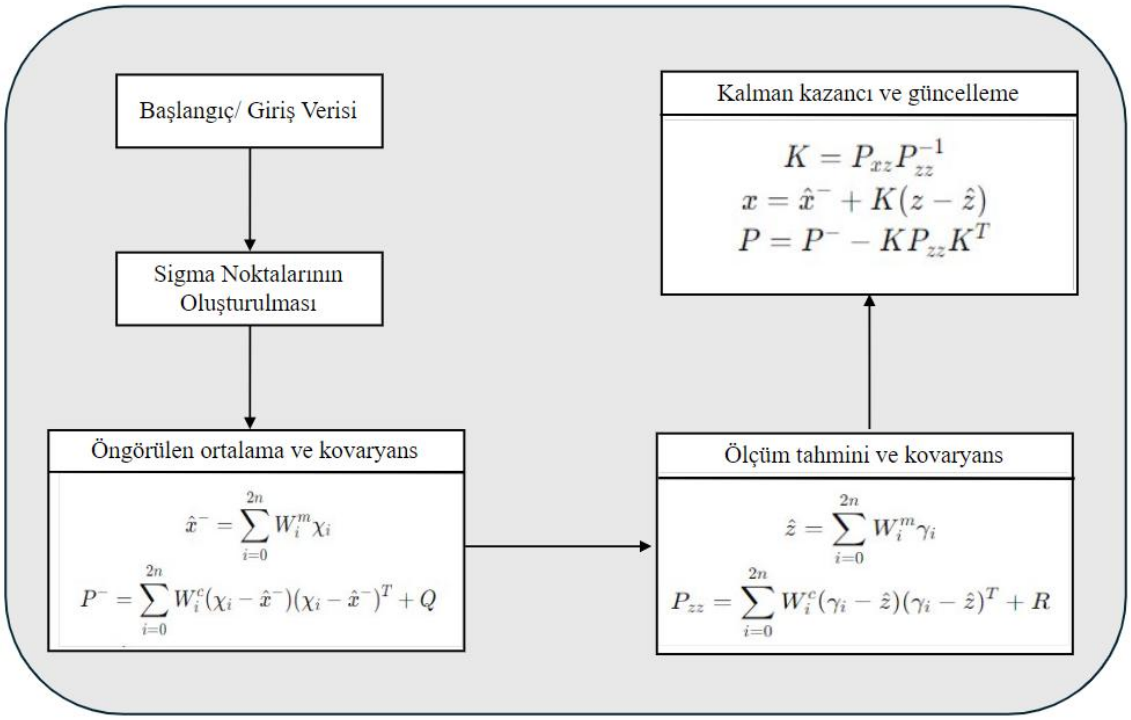
Ham sensör verileri uçuş boyunca farklı frekanslarda ve gürültülü şekilde kaydedildiğinden, ilk aşamada veri temizleme işlemleri uygulanmıştır. Ardından, makine öğrenmesi modellerinde kullanılabilecek anlamlı öznitelikler çıkarılmıştır. Sensör verileriyle gerçekleştirilen işlemlerde, tüm sensör verilerinin kullanılması yüksek boyutluluk sorunu oluşturarak hesaplama süresinin artmasına neden olur. Bu nedenle çalışmada öznitelik seçimi (feature selection) yaklaşımı benimsenmiş ve anlamlı varyans taşıyan, birbirleriyle yüksek korelasyon değerine sahip olmayan sensör verileri kullanılmıştır. Bu işlem, hem hesaplama yükünü azaltmakta hem de modelin öğrenme süresini optimize etmektedir. Seçilen sensörlerin temsil gücü yüksek olduğu ve sistemin dinamik davranışını yeterli düzeyde yansıttığı varsayılmıştır. Seçilen sensörler ve yapılan ön işleme işlemleri aşağıda belirtilmiştir:

- *E1 RPM*, *E1 OilP*, *E1 OilT*, *E1 CHT1*, *E1 EGT1*, *FQtyL*, *OAT*, *ALT* sensör verileri *RUL* tahmininde kullanılmıştır.
- UKF uygulanabilir hale gelmesi için sadece sayısal sütunlar filtrelenmiştir.
- Her uçuşta belirli pencere boyutlarında (*window size*: 50, *step size*: 10) kaydırmalı öznitelik çıkarımı yapılmıştır.

Kayar pencereleme yöntemi, zaman serisi verilerini küçük ve analiz edilebilir boyutlarda oluşturmak için kullanılmıştır. Her pencere, ardışık 50 zaman adımını kapsayarak, o anki sistem davranışını temsil eden bir alt veri kümesi oluşturur ve zaman içinde belirli bir adımla (örneğin 10 örnek) kaydırılarak yeni örnekler oluşturur. Böylece hem örnek sayısı artırılır hem de sistemin zaman içindeki değişimleri süreklilik içerisinde izlenebilir.

2.4 UKF Modelinin Oluşturulması

Veri yumuşatma ve sensör birleşimi için Kalman filtresi ailesinden UKF kullanılmıştır. UKF, özellikle doğrusal olmayan sistemlerde daha başarılı sonuçlar verdiği için tercih edilmiştir [6]. UKF modelinin çıktıları üzerinden istatistiksel öznitelikler (ortalama, varyans, eğiklik, vb.) çıkarılmıştır. UKF'nin sırasıyla yaptığı işlemler ve matematiksel denklemleri Şekil 3'de belirtilen akış diyagramında gösterilmiştir [10,11].



Şekil 3. UKF Akış diyagramı

Bu işlemler pythonda kullanılan *filterpy* kütüphanesi tarafından arka planda gerçekleştirilir. Model oluşturulurken sistemin durum vektörü **x**, sistemin dinamik modeli olan **f**(**x**), gözlem fonksiyonu olan **h**(**x**), kovaryans değerleri ve sigma noktaları belirlenerek tasarım gerçekleştirilmiştir. UKF modelinde sistemin durum vektörü olarak ifade edilen **x** değeri Denklem (1)'de ifade edilmiştir. Burada x_0 sensör verisinin başlangıçtaki değerini, $\dot{x}_0$ ise sensör değerinin türevini belirtir.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Bu çalışmada her bir sensör verisi, iki boyutlu bir durum vektörü ile modellenmiştir: Bunlar sensörün tahmini değeri ve bu değerin zaman içindeki değişim oranı olarak ifade edilir. Bu yapı, pozisyon-hız benzeri bir sistemle benzeşmesine karşın, veriler doğrudan fiziksel konum veya hız yerine sensör sinyallerini temsil etmektedir. Bu yaklaşım, farklı türdeki sensör verilerinin ortak bir çerçevede filtrelenmesine olanak sağlamaktadır [10,11].

UKF modelinde **f**(**x**) fonksiyonu, sistemin dinamik modeli olarak adlandırılır. Matematiksel karşılığı Denklem (2)'de belirtilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x_{t+1} \\ v_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ v_t \end{bmatrix} \tag{2}$$

UKF'nin yapısında bulunan **h**(**x**) fonksiyonu, sistemin içsel durum vektöründen gözlemlenebilir ölçümleri türeten, ölçüm modelini temsil eden fonksiyondur. Bu fonksiyon, sensörlerin sisteme dair hangi bilgileri ve nasıl ölçtüğünü matematiksel olarak tanımlar. Modelde sistem durumunun ilk bileşeni üzerinden ölçüm yapıldığı varsayılır. UKF algoritması, doğrusal olmayan

sistemlerdeki durum tahminini, olasılık dağılımını doğrudan dönüştürmek yerine bu dağılımı temsil eden sınırlı sayıda deterministik örnek nokta (sigma noktaları) üzerinden gerçekleştirmektedir. Bu sigma noktaları, sistemin ortalaması ve kovaryansını yansıtacak şekilde dikkatle seçilir ve sistem dinamiği ile ölçüm fonksiyonları üzerinden geçirilerek yeni tahmin ve güncelleme hesaplamaları yapılır. Bu yöntem, doğrusal olmayan özniteliklerin etkisini daha doğru biçimde yansıtarak sistemin gerçek durumuna yakın sonuçlar elde edilmesine olanak tanır [6,10]. Bu çalışmada sigma noktalarının üretiminde, Merwe Ölçeklenmiş Sigma Noktaları (Merwe Scaled Sigma Points) yöntemi kullanılmıştır. Van der Merwe'nin ölçeklendirilmiş sigma noktası yöntemi aşağıdaki avantajları sağlar:

- Daha sayısal kararlılık sunar (özellikle yüksek boyutlu durum vektörlerinde).
- Sigma noktalarının yerleşimini daha hassas ayarlamak için α, β ve κ gibi ölçeklendirme parametreleri kullanır.

Bu ölçeklendirme parametrelerinin özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- α: Dağılımın genişliğini belirler (genellikle $1x10^{-3}$ gibi küçük bir değer önerilir).
- κ: Sigma noktalarının merkezden uzaklığını kontrol eder ve genellikle 0 olarak seçilir.
- β: Dağılımın önceden bilinen yapısını temsil eder (Gauss dağılımı için $\beta = 2$ olarak kullanılır) [6].

UKF algoritmasında kullanılan kovaryans matrisleri sistemin belirsizliklerini modellemek için kritik öneme sahiptir. Durum hata kovaryansı **P**, Denklem 3'te gösterildiği gibi tahmin edilen durumun güvenilirliğini yansıtır ve 10 değeri başlangıçta belirsizliğin yüksek olduğunu belirtmektedir [10,11]. Burada, **I**, 2x2'lik bir birim matrisini ifade eder.

$$\mathbf{P} = 10 * \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Süreç gürültü kovaryansı **Q**, Denklem (4)'te gösterildiği gibi model dinamiklerinden kaynaklanan belirsizlikleri tanımlar.

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Ölçüm gürültüsü kovaryansı **R** ise sensör verilerinin güvenirliğine bağlıdır; bu nedenle ilgili sensörün standart sapmasına göre uyarlanmış ve Denklem (5)'te belirtilmiştir. Bu ayarlar, filtrelemenin hem esnek hem de dengeli olmasını sağlamıştır [10,11].

$$\mathbf{R} = [\sigma_z^2] \tag{5}$$

2.5 Regresyon Modelleri

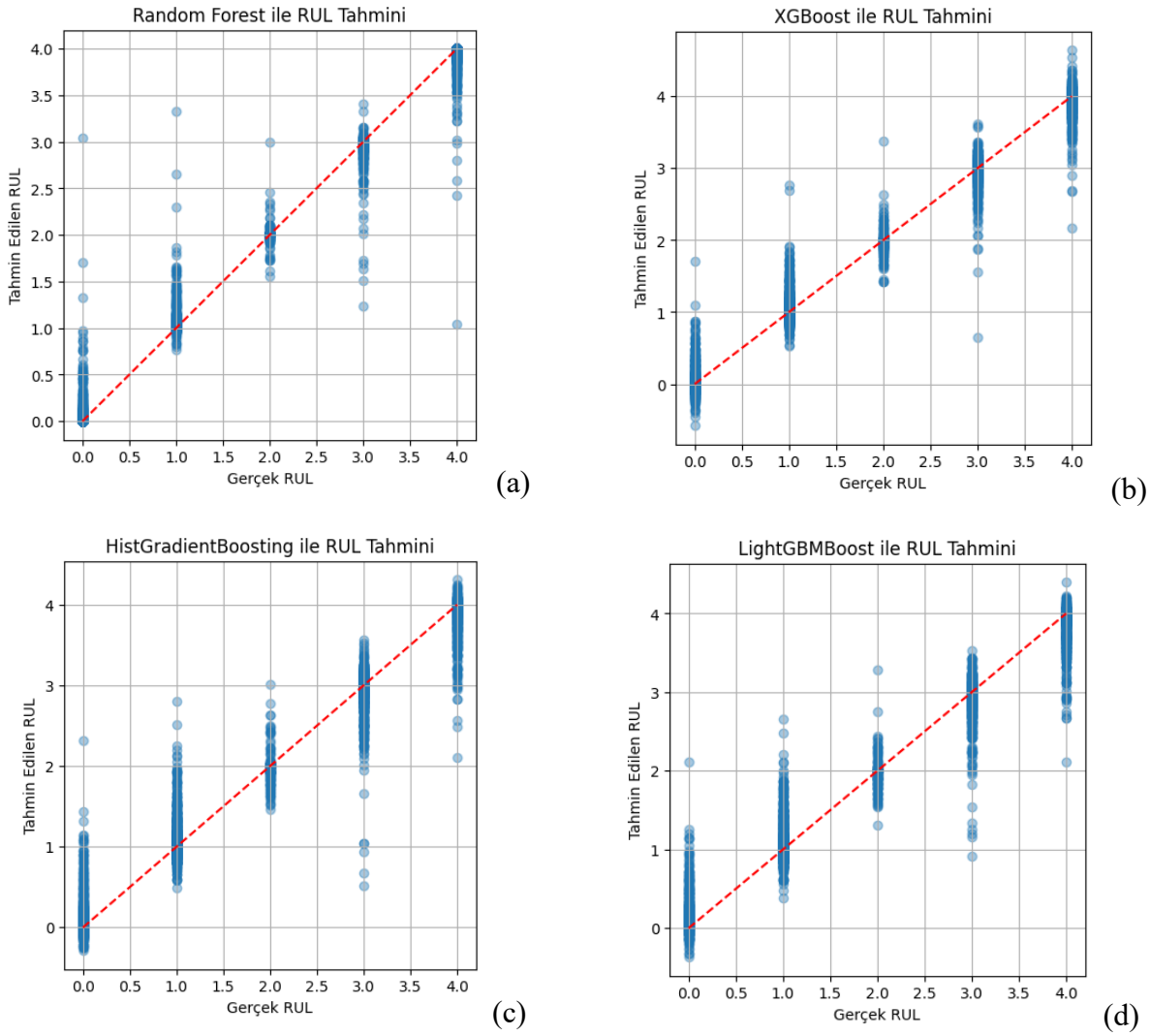
RUL tahmini için Random Forest, XGBoost, HistGradientBoosting ve LightGBM regresyon algoritmaları kullanılmıştır. Model, hem tahminleme hem de öznitelik önem düzeylerini belirlemede etkin bir araç olarak işlev görmüştür. Özellik seçimi sürecinde tüm modeller için SelectFromModel yöntemi uygulanmış ve eşik değeri olarak "median" seçilmiştir. Seçilen özelliklerle modeller eğitilmiş ve ardından tahmin başarımı MAE (Mean Absolute Error) ve R^2 (Determination Coefficient) metrikleriyle değerlendirilmiştir. Model, her bir sensör özniteliğinin RUL tahminine katkısını ölçerek, medyan önem düzeyinin üzerinde yer alan öznitelikleri

korumuş, geri kalanları dışlamıştır. Böylelikle hem hesaplama maliyeti düşürülmüş hem de modelin genelleme kabiliyeti artırılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Veri işleme sürecinde, toplam 250 uçuş örneklem içine alınmış ve her bir uçuş için 50 örnek uzunluğunda kayar pencereler kullanılmıştır. Bu pencerelerden toplamda 10.898 veri örneği (*window*) elde edilmiştir. Her pencere üzerinden UKF filtrelemesi uygulanmış, bu sayede sensör verilerindeki gürültü azaltılmış ve pürüzsüz bir sinyal elde edilmiştir. UKF çıkış verileri kullanılarak öznitelikler (ortalama, standart sapma, eğim vb.) çıkarılmış ve bu öznitelikler daha sonra RUL tahmini için bir regresyon modellerine beslenmiştir. Her sensör serisine UKF ayrı ayrı uygulanmış, zamanla değişen durumun filtrelenmiş hali elde edilmiştir.

Bu çalışmada dört farklı ağaç tabanlı regresyon algoritması kullanılarak özellik seçimi sonrası model performansları karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen RUL - Gerçek RUL grafikleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 4. RUL tahmin sonuçları; (a) Random Forest, (b) XGBoost, (c) HistGradientBoosting, (d) LightGBM

Regresyon başarım sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir. Başarım metriklerini incelediğimizde MAE (Mean Absolute Error) değeri tahmin edilen değerlerin ortalama değerden ne kadar çok saptığını ifade eder. Bu değerin sıfıra yakın olması modelimizin başarımının yüksek olduğunu belirtir. R^2 (Determination Coefficient) değeri ise modelin hedef değişkeni varyansını ne kadar açıkladığını belirtir. R^2 değerinin 1'e yakın olması modelin başarımı için istenilen değerdir [11]. Bunlar göz önüne alındığında Random Forest algoritması en başarılı model olarak karşımıza çıkar.

Tablo 2. Regresyon başarım sonuçları

Model	Özellik Sayısı	MAE	R^2
Random Forest	18	0.084	0.978
XGBoost	18	0.148	0.973
HistGradientBoosting	18	0.206	0.951
LightGBM	19	0.208	0.952

4. Sonuçlar

Bu çalışma, havacılık sistemlerinde gerçek uçuş verilerinden yola çıkarak, Kalman filtresi tabanlı veri füzyonu ve dört farklı ağaç tabanlı regresyon algoritması kullanılarak kalan faydalı ömür tahmini yapılmıştır. Random Forest, elde edilen sonuçlar içerisinde en düşük ortalama mutlak hata (MAE = 0.084) ve en yüksek determinasyon katsayısı (R^2 = 0.978) ile en başarılı model olmuştur. Bu durum, modelin veriyi oldukça iyi öğrendiğini ve test verisi üzerinde yüksek doğrulukla genelleme yapabildiğini göstermektedir. Özellikle 18 özellik ile bu başarıya ulaşması, hem doğruluk hem de model sadeliği açısından avantaj sağlamıştır.

XGBoost Regressor ise benzer sayıda (18) özellikle eğitildiğinde, MAE değeri 0.148 ve R^2 değeri 0.973 olarak gözlemlenmiştir. Random Forest'a kıyasla biraz daha yüksek hata oranına sahip olsa da, varyans açıklama gücü oldukça yüksektir. Bu nedenle, doğruluk-performans dengesi açısından güçlü bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

HistGradientBoosting ve LightGBM modelleri ise sırasıyla 18 ve 19 özellikle eğitilmiş; MAE değerleri yaklaşık olarak 0.206–0.208 ve R^2 değerleri 0.951–0.952 civarında ölçülmüştür. Bu iki model, özellikle işlem hızı ve bellek verimliliği açısından avantajlı olmalarına rağmen, hata oranlarının diğer modellere göre bir miktar yüksek olması, veri setindeki yapısal ilişkileri yakalama konusunda göreli olarak daha zayıf kaldıklarını düşündürmektedir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, Random Forest modeli, hem doğruluk hem de özellik seçimi sonrası etkinliği bakımından öne çıkmaktadır. XGBoost da benzer şekilde yüksek doğruluk sağlaması açısından üretim ortamlarında tercih edilebilir. HistGradientBoosting ve LightGBM modelleri ise özellikle hesaplama süresinin kritik olduğu durumlarda değerlendirilebilir.

Referanslar

1. Jardine, A.K.S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing.

2. Zhang, H., Yang, W., Yan, X., Xu, H. & Yang, C. (2019). Data-driven prognostic method with real-time streaming data in aviation. Aerospace Science and Technology, 85, 169–179.
3. Saha, B. et al. (2009). Battery health prognostics using machine learning. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
4. Yang, H., & Desell, T. (2022). A Large-Scale Annotated Multivariate Time Series Aviation Maintenance Dataset from the NGAFID. *Transportation Research Record* (preprint arXiv:2210.07317).
5. Saxena, A., Celaya, J., Balaban, E., Saha, B., Saha, S., & Goebel, K. (2008). Metrics for Evaluating Performance of Prognostics Techniques. Proceedings of the 1st International Conference on Prognostics and Health Management (PHM08), Denver, CO, pp. 1–17.
6. Wan, E. A., & van der Merwe, R. (2000). The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation. IEEE Symposium on Adaptive Systems.
7. Federal Aviation Administration. (2021). Type Certificate Data Sheet No. 3A12 for Cessna 172.
8. Wikipedia. (2025). Cessna 172. https://tr.wikipedia.org/wiki/Cessna_172
9. Mukaka, M.M., A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research, Malawi Medical Journal. 2012, 24(3), 69–71.
10. Julier, S.J., & Uhlmann, J.K. (2004). Unscented Filtering and Nonlinear Estimation. Proceedings of the IEEE, 92(3), 401–422. https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.823141
11. Simon, D., Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches, John Wiley & Sons. 2006.

PAMUK VE ISIRGAN LİFİ (BİYOBAZLI ELYAF) KARIŞIMLI İPLİKLERDE BÜKÜM FARKININ İPLİK KALİTE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

BEYZAGÜL KİRAZ [1], ERKAN EVRAN [2], CANSU GENÇ[3], ZÜLEYHA DEĞİRMENCİ[4]

[1] Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü Lisans, İzmir, TÜRKİYE
[2] Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ürün Geliştirme ve Tasarım Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans, Gaziantep, TÜRKİYE
[3] Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans, Adana, TÜRKİYE
[4]Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, TÜRKİYE

ÖZET

Bu çalışmada farklı büküm katsayıları ile üretilen %70/30 pamuk -ısırgan karışımlı ve %100 pamuk elyaflarından 8/1 Ne numarasında dört farklı büküm alfalarında (αe 3.5, αe 4, αe 4.2 ve αe 4.5) iplikler üretilmiş ve bu ipliklerin kalite değerleri incelenmiştir. Büküm, ipliklerin eğirilmesi sırasında liflerin bir arada tutulmasını ve mukavemet kazanmasını sağlayarak iplik kalite değerlerini önemli ölçüde etkiler. Optimum büküm katsayısının belirlenmesi bu noktada çok önemlidir. Isırgan lifi keten ve kenevire benzeyen oyuklu yapısı sayesinde doğal yalıtkan özellikli bir malzemedir. Bu lifin daha düşük bükümle daha yüksek mukavemeti sağlayabiliyor olması lifi diğer doğal malzemelerden farklı kılmaktadır. Çalışma kapsamında pamuk lifi ile %30 oranında karıştırılarak üretilmiş ve konvansiyonel pamuktan ayırt edici kalite özellikleri analiz edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar, ısırgan lifinin eklenmesiyle kalite değerlerinde anlamlı değişikliklerin oluştuğunu göstermiştir. "Veriler grafiksel gösterimler ve istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edildi. Bulgular, büküm katsayısının iplik mukavemeti ve düzgünsüzlüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koydu."

.

ANAHTAR KELİME: Büküm katsayısı; Düzgünsüzlük, Mukavemet; Isırgan Lifi

1- GİRİŞ

Endüstri devrimleri ile her geçen gün gelişen tekstil ve moda sektörü, tüketicinin ürüne ulaşımını kolay kılarak, ucuz ve hızlı alternatifler sunmakta; fakat çevreye ve insanlara kalıcı hasarlar bırakmaktadır. Sürdürülebilirliği destekleyen farkındalığı yüksek tüketiciler, tekstil ve moda sektörünün doğaya verdiği zararı aza indirgemek ve karbon ayak izlerini küçültmek amaçlı bireysel tüketim tercihlerinde değişiklikler yapmaktadırlar. Tekstil ve Moda sektörünün çevreye bıraktığı ayak izi düşünüldüğünde, sürdürülebilir üretim ve tüketim sürecinin yaygınlaşması bir zorunluluk haline gelmektedir. Çevresel farkındalığı yüksek olan tüketicilerin, giyim tercihlerini sürdürülebilir kıyafetlerden yana kullanmaya çalışması, markaların da sürdürülebilirlik üzerine farklı stratejiler geliştirmesini sağlamıştır. [1] (647-688)

İnsanın zaruri ihtiyaçlarından giysileri, aksesuarları ve ev tekstili ürünlerini üreten bu sektörde; hammadde ve yardımcı malzemenin doğal kaynaklı olması, lif üretiminde kullanılan pestisitlerin(kimyasal ilaç, böcek zehri) azaltılması yada pestisit ihtiyacı en az olan liflerin tercih edilmesi, kimyasal madde kullanımının oldukça azaltılması, geri dönüşüm ürünlerinin üretimlere dahil edilmesi, ürün ömrünün daha uzun süreli olması ve üretim-tüketim aşamalarında geri dönüşümün sağlanabilmesi, hatta hiçbir atık oluşumuna sebebiyet vermeyen bir üretim sistemi kurulması; dünyamız için ekolojik ve ekonomik açıdan oldukça önemlidir.
Isırgan elyafı da doğada çözünürlük özelliği ile bu açıdan sürdürülebilirlik kapsamına giren önemli elyaflar arasındadır.[2]

Isırgan otu Urtica dioica L., Urticaceae (nettle) ailesinden uzun ömürlü bir bitkidir. Yaprakları ve gövdesi yakıcı tüylerle kaplanmış, tohumlu, çoğunda sütsü öz bulunmayan, basit yapraklı ve yabancı tozlaşma gösteren, küçük çiçekli, ılıman bölgelerde yetişen yabani bir bitkidir. [3]

Isırgan otu bitkisi, keten ve kenevire benzer şekilde bitkinin %17'sini içerecek oranda yüksek kalitede lif içermektedir. Lif oranının yüksek olması, düşük yoğunluk ve iyi mukavemet değerleri bu bitkinin tekstilde kullanılmasına teknik açıdan olanak sağlamaktadır. Isırgan otundan elde edilen lif, bir tekstil lifi için gerekli tüm nitelikleri yerine getirmektedir. Bu lifin germe davranışı, lif inceliği ve uzunluğu tekstil prosesleri için yeterlidir. Lifin süper nem absorplama kabiliyeti nihai ürün için rahatlık sağlamaktadır. Isırgan lifi el ile dokunulduğunda yumuşak ve hoş bir his verir (Kurban vd. 2011: 89, Cook 1984'ten). Isırgan lifinin kendine özgü karakteristik özelliği olan içi oyuk boşluklu (hollow) lif yapısındaki boşluklarda kalan hava doğal bir yalıtım sağlamaktadır. Yazın serin tutan lif yaratmak için, iplikler lifin merkezindeki boşlukları kapatacak şekilde bükülmekte ve yalıtım azalmaktadır. Kışlık kumaşlar için ipliklere daha düşük büküm verilerek içi boşluklu oyuk lif yapısı muhafaza edilerek sıcaklığın sabit kalması sağlanmaktadır (Kurban vd. 2011: 85, swicofil 2011'den). Son yıllarda sentetik lifli ürünlerin olumsuzlukları ortaya çıktıkça doğal liflere olan ilginin arttığı görülmektedir. Doğal liflerin ise organik yöntemlerle elde edilmesi ve organik sertifikalı ürün olarak tekstil sektörüne kazandırılması istenmektedir. Özellikle pamuk tarımının yapılamadığı iklim bölgelerinde alternatif doğal lif bitkileri içinde ısırgan bitkisi de yer almakta, verimsiz uç tarım alanlarının değerlendirilmesinde öne çıkmaktadır. [4]

Eğirme teknolojisi, liflerin (pamuk, yün, polyester gibi) bir araya getirilerek sürekli bir iplik haline dönüştürülmesini sağlayan yöntem ve makineleri kapsayan bir tekstil üretim sürecidir. Bu teknoloji, ipliğin kalitesini, mukavemetini, düzgünlüğünü ve kullanım alanlarını doğrudan etkiler.

1828'de icat edilen ring eğirme teknolojisi, 1800'lü yıllardan bu yana iplik üretiminde kullanılmakta ve günümüzde kısa elyaf iplikçiliğinde pazar payı en yüksek teknoloji olarak varlığını korumaktadır. [5] (415-426)

Ring eğirme sırasında iplikteki lifler paraleldir ve birlikte dönerek bükülürler, böylece maksimum lif yoğunluğu özde en yüksektir ve iplik çevresine doğru azalır. Lifler ipliğin iç kısmından dış kısmına göç ederek iplik içinde çok güçlü kohezyon oluşturur. [6] (BAYKAL & KUMAŞ, 2024)(389-399)

Büküm işlemi sırasında ipliklere esneme özelliği kazandırılarak, üzerine yüklenen yükü belirli oranda dağıtma ve yük kalktığında ise ilk haline dönme özelliği sağlanmaktadır (Ayyıldız, 2005). Büküm işleminin yapılabilmesi için ipin kendi etrafında döndürülmesi ve bu işlem sırasında ipliğin

iki ucunun da sabit olması gerekmektedir. Büküm sayısı ipin dakikada kaç tur attığına ve dakikada kaç metre çekildiğine göre belirlenir. 7000 defa çevrilip dakikada 20 metre ile çekilirse metrede 350 büküm almış olur. [7] (61-71)

Değişen, gelişen ve küreselleşen dünyada hemen her sektörde olduğu gibi tekstil sektöründe de alıcıların beklentileri sürekli olarak evrilmekte, tüketiciler ise ürün seçimlerinde daha bilinçli ve seçici davranmaktadır. Bu durum, tekstil ürünlerinden beklenen performans ve işlevsellik kriterlerinin artmasına neden olmakta; dolayısıyla ürün kalitesinin önemi her geçen gün daha da belirgin hale gelmektedir.

Kalite, "belli bir mamul veya hizmetin tüketicinin gereksinimlerini karşılama derecesi" olarak, kısaca "kullanıma uygunluk" olarak da tanımlanmaktadır. Günümüz tekstil endüstrisinde kaliteyi denetlemek ve üretimi izlemek için üretim aşamasında (on-line) kullanılmak üzere çeşitli elektronik ölçme ve kontrol sistemleri geliştirilmektedir. Diğer taraftan üretim hattı dışı (off-line) ölçüm ve performans testler için de gelişmiş test ve kontrol cihazları kullanılarak ürün kalitesinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. (Tekstilde İstatistiksel Proses Kontrol Uygulaması Örneği-Terbiye İşletmesi). Tekstil ürünlerinin kalite kontrol işlemleri elyaf, iplik, ham kumaş ve mamul kumaş üretim aşamalarında, yarı mamul ve mamul bazında yapılabildiği gibi ayrıca konfeksiyon sürecinde de yapılabilmektedir. [8] (911-924)

Kalite kontrol bakımından yapılan testler afis, uster ve mukavemet testleridir. Modüler bir sistem olan AFIS'te lif uzunluk, kısa elyaf yüzdesi, incelik, olgunluk ölçümleri ile yabancı madde ve toz ölçümleri, ayrıca bunların çeşitli istatistiki değerlendirmeleri yapılmaktadır. [9]
AFIS cihazından elde edilen bilgiler harman kompozisyonu, işlemler sırasında temel lif özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi, makinelerin işlem parametreleri ve teknolojik proseslerin optimizasyonu ile üretilen ipliğin kalite düzeyinin tahminlenmesi için kullanılabilir. [10] (180-184)

Uster Testi, Düzgünsüzlük(U%) ve kütle değişim varyasyon katsayısı (%CVm) değeri; bir materyalin ölçüme tabi tutulan uzunluğu boyunca olan toplam kütle varyasyonunun miktarını göstermektedir. Uster Tester test cihazı şerit, fitil ve iplik numunelerinin düzgünsüzlük ve hata ölçümlerini, sabit hız ile kondansatör plakaları arasından geçirerek yapmaktadır. Materyal kütlesindeki değişim kondansatör sığasını değiştirmekte, böylece kütle değişim varyasyon katsayısı (%CVm) değerleri ölçülmüş olmaktadır. IPI ifadesi, kesikli liflerden yapılan ipliklerde görülen hatalar olan, ince yer, kalın yer ve neps hatalarını içermektedir. İnce yer (%50/km) değeri, ortalama iplik kalınlığının %50'sine kadar olan iplik kesitlerinin km'deki adedi olarak tanımlanırken, kalın yer (+%50/km) değeri ise; ortalama iplik kalınlığının %150'sine kadar olan iplik kesitlerinin km'deki adedi olarak tanımlanmaktadır. Neps (+%200) değeri ise ortalama iplik kalınlığının %200'ü büyüklüğündeki yerler olarak ifade edilmektedir [8]. Şeritlerdeki neps; birbirlerine karışmış ve düzensiz yapıdaki liflerin oluşturduğu lif düğümleri olarak tanımlanır. Ölçüm birimi ise adet/gr olarak ifade edilmektedir. [11] (65-77)

Mukavemet, ipliğin uygulanan yüke gösterdiği dirençtir. Mukavemetin yüksek olması iplik kopuşunu ve makine duruşlarını azaltarak verimliliğin artmasını sağlar. İplik mukavemetini etkileyen en önemli faktör hammaddedir. Hammaddenin cinsi, elyaf uzunluğu, elyaf inceliği

(micronaire), elyaf uzunluk dağılımı (uniformity) ve elyaf mukavemeti iplik mukavemetine etki eden en önemli faktörlerdir. Bükümün arttırılması belli bir noktaya kadar iplik mukavemetini de artırır. [12]

Çalışmanın birincil amacı; mukavemet, yalıtkanlık, ekolojik ve sürdürülebilir bir lif olan ısırgan elyafını tekstil endüstrisinde kullanabilmek ve bu lifin konvansiyonel pamuktan ayırt edici özelliklerini ortaya koymaktır. Diğer yandan ipliğe uygulanan bükümün iplikteki mukavemeti arttırırken diğer kalite değerlerinde meydana getirdiği değişiklikleri saptamak ve söz konusu ısırgan pamuk karışımlı iplikler için optimum büküm alfasını tespit etmek de çalışmanın önemli hedefleri arasında yer almaktadır.

2- MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında harman karışımında yer alan pamuk ve ısırgan elyafının afis test sonuçları aşağıdaki gibidir:

Tablo 1.Çalışmada kullanılan elyaf özellikleri

Teknik Özellikler	Pamuk	Isırgan
Elyaf Uzunluğu, mm	17,4	18
Elyaf Mukavemeti, g/tex	31,8	52,7

Tablo 2. Yapılan Alfa Denemeleri

	ALFA DENEMELERİ
8/1 Ne	3,5
	4
	4,2
	4,5

8/1 Ne Ring eğirme prensibiyle 4 farklı alfa bükümüyle iplikler üretilmiş ve bu ipliklere uster düzgünsüzlük ve mukavemet testi sırasıyla uster tester 6 ve uster tensojet 4 cihazlarında yapılmıştır.

Sonuçlar grafikler yardımıyla gösterilmiş ayrıca SPSS23 paket programı yardımıyla analiz edilmiştir.

3- Tartışma ve Sonuç:

3.1 Kalite Sonuçları

Tablo 3.%100 Konvansiyonel Pamuk Uster Test Sonuçları

		U	CV	İNCE YER 50	KALIN YER 50	NEPS 140	TÜYLÜLÜK
ALFA	3,5	8,24	10,52	0	7	31	10,60
	4	8,40	10,66	0	6	25	9,16
	4,2	8,15	10,42	0	6	27	9,09
	4,5	8,41	10,66	0	6	27	8,93

Tablo 3'e göre alfa artışı, düzgünsüzlük indeksinde genel olarak bir artışa neden olmuştur. 50-50 ince-kalın yer değerlerinde ise sabitlik gözlenmiş ve belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Bununla birlikte alfa arttıkça iplik çapı azalmakta ve iplik yüzeyinde yer alan lifler ve düğümcükler iplik yapısına katıldığından neps140 ve tüylülük değerlerinde iyileşme sağlanmıştır.

Tablo4.%70 Konvansiyonel Pamuk %30 Isırgan Lifi Uster Test Sonuçları

ALFA	U	CV	İNCE YER 50	KALIN YER 50	NEPS 140	TÜYLÜLÜK
3,5	12,11	15,67	0	145	338	13,49
4	11,60	14,91	0	126	302	11,75
4,2	11,61	14,76	0	103	245	9,33
4,5	11,56	14,88	0	101	250	10,88

Tablo 4'e göre alfa atışı, düzgünsüzlük indeksinde iyileştirmeye neden olmuştur. İnce yer sabit olmakla birlikte kalın yer 50, kademeli olarak bir düşüş söz konusudur. Neps değerlerinde yine %100 konvansiyonel pamukta olduğu gibi düğümcükler iplik yapısına katıldığından iyileşme sağlanmıştır. Tüylülük değerlerinde ise 4,2 alfaya kadar düşüş söz konusu iken 4,5 alfada tekrardan bir artış söz konusudur.

Tablo 5.%70 Konvansiyonel Pamuk %30 Isırgan İpliğindeki Tek Yönlü Anova

ANOVA					
	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
% U	,276	3	,092	1,318	,334
	,559	8	,070		
	,835	11			
% CV	,251	3	,084	,575	,647
	1,165	8	,146		
	1,416	11			
İNCE %- 50	,000	3	,000	.	.
	,000	8	,000		
	,000	11			
KALIN %+50	24,667	3	8,222	1,028	,430
	64,000	8	8,000		
	88,667	11			
NEPS % +140	78,250	3	26,083	,647	,607
	322,667	8	40,333		
	400,917	11			
H	6,476	3	2,159	17,590	,001
	,982	8	,123		
	7,458	11			

Büküm alfasındaki değişiklik tüylülük üzerinde anlamlı bir etki yaratmıştır ancak diğer kalite değerlerinde(uster ,cv,ince 50 ,kalın 50, neps) anlamlı bir etki söz konusu değildir.

Tablo 6. %70 Konvansiyonel Pamuk %30 Isırgan ve %100 Konvansiyonel Pamuk Hammadde Kıyası Tek Yönlü Anova

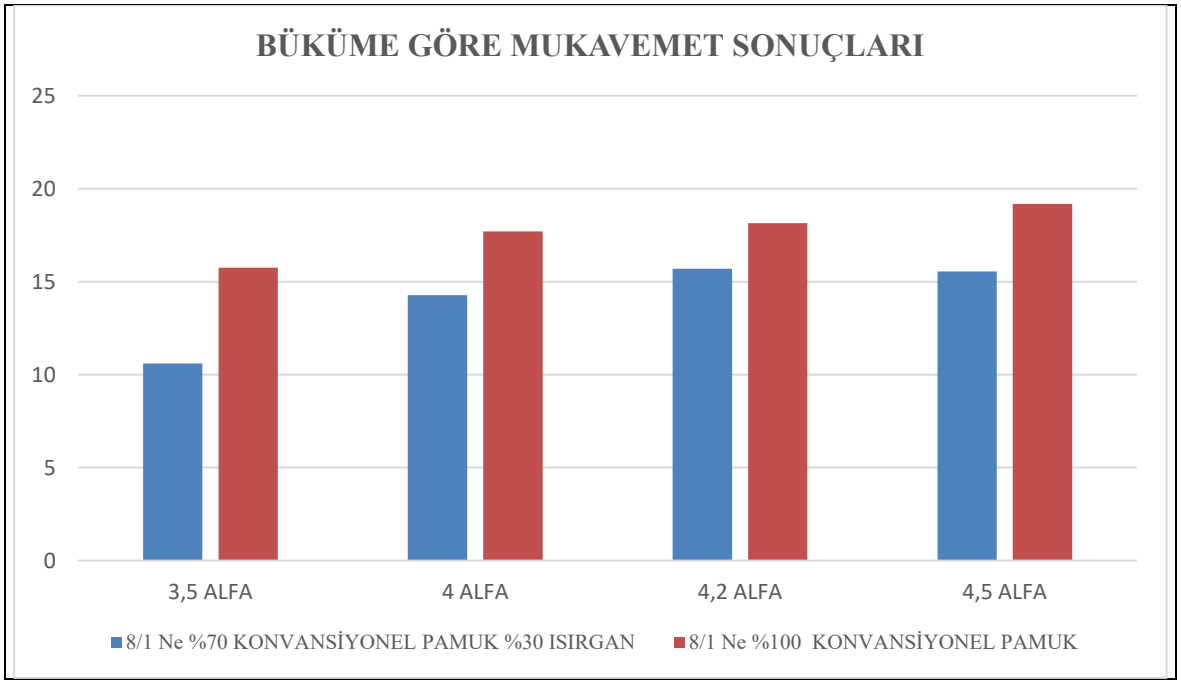
ANOVA					
	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
%U	76,720	1	76,720	790,111	,000
	2,136	22	,097		
	78,856	23			
5CV	132,211	1	132,211	451,605	,000
	6,441	22	,293		
	138,652	23			
İNCE%- 50	40,042	1	40,042	18,776	,000
	46,917	22	2,133		
	86,958	23			
KALIN %+50	90037,500	1	90037,500	82,872	,000
	23902,333	22	1086,470		
	113939,833	23			
NEPS %+140	433090,667	1	433090,667	207,763	,000
	45859,833	22	2084,538		
	478950,500	23			
H	20,535	1	20,535	11,384	,003
	39,685	22	1,804		
	60,220	23			

Tablo 6'a göre %100 konvansiyonel ve %70 konvansiyonel %30 ısırgan karışımlı ipliklerin ikili karşılaştırılmasında uster, cv, neps, h değerleri istatiksel olarak anlamlı sonuçlanmıştır.

3.2 Performans Analizleri:

3.2.1 Mukavemet:

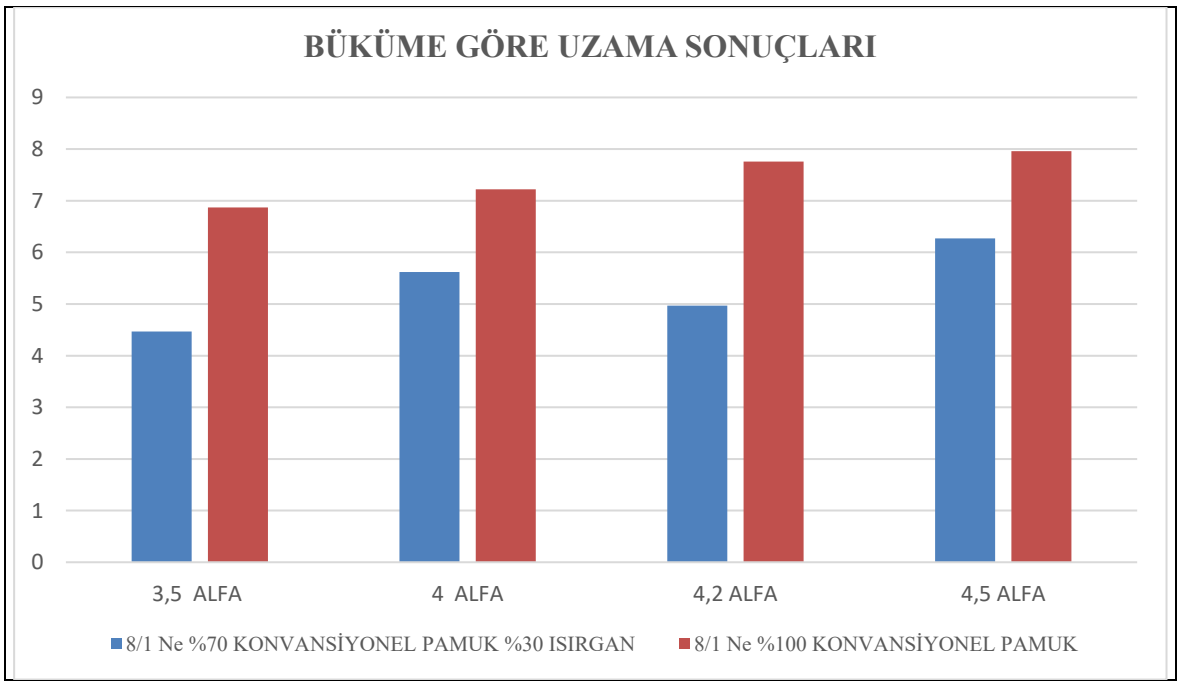
Şekil 1: Büküme Göre Mukavemet Sonuçları



Şekil 1 'de görüldüğü üzere, alfa değerindeki artış ile %100 konvansiyonel ipliğinde mukavemet değerlerinde artan bir eğilim söz konusudur. Ancak %70 konvansiyonel pamuk %30 ısırgan karışımlı iplikte 4,2 alfaya kadar mukavemet artmakta, bu değerden sonra ise azalma meydana gelmektedir. Mukavemetin 4,2 seviyesine kadar yükselmesi, bu noktaya dek lifler arasında optimum bir tutunmanın sağlandığını göstermektedir. Ancak, alfa değeri 4,2'yi aştığında, artan büküm nedeniyle lifler arasında oluşan aşırı sürtünme ve gerginlik ipliğin esnekliğini azaltmakta ve kırılganlığını artırmaktadır. Bu nedenle, kritik büküm noktasının 4,2 alfadan sonra aşılması ipliğin mekanik özelliklerinde olumsuz bir değişime yol açmakta; mukavemette düşüşe sebep olmaktadır. Aynı alfada iki ayrı karışım kıyaslandığında ısırgan elyafının mukavemete etkisi üzerinde bir artış olmadığı görülmektedir

3.2.2 Uzama

Şekil 2: Büküme Göre Uzama Sonuçları



Uzama değeri, ipliğin esneme ve kabiliyetini gösterir. Yüksek uzama, ipliğin daha elastik olduğunu, düşük uzama ise daha kırılgan olduğunu göstermektedir. Uzama değeri ipliğin kopana kadar olan uzama değerini % olarak ifade etmektedir. % Uzama = (Uzama miktarı/Başlangıç uzunluğu) x 100 formülü ile hesaplanır.

Şekil 2'ye göre, %70/30 pamuk-ısırgan karışımında alfa arttıkça uzama değeri artarken, 4,2 alfa kritik bir değer olup sonrasında anlık bir düşüş devamında artış gözlenmiştir. Bu durum, bükümle birlikte ısırgan liflerinin boşluklu yapısını kaybedip uzama yeteneğinin azalmasından kaynaklanabilir. %100 pamukta ise uzama değeri düzenli olarak artmıştır.

Tablo 7. %70 Konvansiyonel Pamuk %30 Isırgan İpliğindeki Tek Yönlü Anova

MUKAVEMET	56410,250	3	18803,417	,482	,704
	312224,000	8	39028,000		
	368634,250	11			
UZAMA	6,821	3	2,274	1,211	,366
	15,014	8	1,877		
	21,834	11			
ÖZGÜL MUKAVEMET	21,564	3	7,188	,871	,495
	66,055	8	8,257		
	87,619	11			

Alfa artışının %70 konvansiyonel pamuk %30 ısırgan ipliğindeki mukavemet, uzama ve özgül mukavemet değerleri istatiksel olarak incelendiğinde anlamlı bir etki söz konusu değildir.

Tablo 8. %70 Konvansiyonel Pamuk %30 Isırgan ve %100 Konvansiyonel Pamuk Hammadde Kıyası Tek Yönlü Anova

MUKAVEMET	601571,670	1	601571,670	,284	,599
	46536830,499	22	2115310,477		
	47138402,170	23			
UZAMA	32,573	1	32,573	18,469	,000
	38,801	22	1,764		
	71,374	23			
ÖZGÜL MUKAVEMET	12182068,558	1	12182068,558	231,563	,000
	1157376,536	22	52608,024		
	13339445,094	23			

Tablo 8 'e göre %100 konvansiyonel ve %70 konvansiyonel %30 ısırgan karışımlı ipliklerin ikili karşılaştırılmasında mukavemet değerleri dışında uzama ve özgül mukavemet istatiksel sonucu anlamlıdır.

Tablo 9. Korelasyon

Correlations

		HAM MADDE	BÜKÜM ALFASI	U	CV	İNCE	KALIN	NEPS	H	MUKAVE-MET	UZAMA	ÖZGÜL MUKAVEMET
HAM MADDE		1	,000	-,986**	-,976**	-,679**	-,889**	-,951**	-,584**	-,113	,676**	-,956**
			1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,003	,599	,000	,000
		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
BÜKÜM ALFASI		,000	1	-,040	-,052	-,127	-,117	-,137	-,567**	-,218	,371	,134
		1,000		,852	,809	,553	,585	,523	,004	,307	,074	,531
		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
U		-,986**	-,040	1	,991**	,714**	,922**	,968**	,619**	,206	-,695**	,918**
		,000	,852		,000	,000	,000	,000	,001	,335	,000	,000
		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
CV		-,976**	-,052	,991**	1	,675**	,938**	,971**	,633**	,231	-,674**	,913**
		,000	,809	,000		,000	,000	,000	,001	,277	,000	,000
		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
İNCE		-,679**	-,127	,714**	,675**	1	,610**	,702**	,567**	,436*	-,463*	,579**
		,000	,553	,000	,000		,002	,000	,004	,033	,023	,003
		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

KALIN	-,889**	-,117	,922**	,938**	,610**	1	,963**	,613**	,335	-,644**	,800**
	,000	,585	,000	,000	,002		,000	,001	,110	,001	,000
	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
NEPS	-,951**	-,137	,968**	,971**	,702**	,963**	1	,668**	,314	-,645**	,878**
	,000	,523	,000	,000	,000	,000		,000	,135	,001	,000
	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
H	-,584**	-,567**	,619**	,633**	,567**	,613**	,668**	1	,321	-,528**	,417*
	,003	,004	,001	,001	,004	,001	,000		,126	,008	,042
	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
MUKAVEMET	-,113	-,218	,206	,231	,436*	,335	,314	,321	1	,073	,073
	,599	,307	,335	,277	,033	,110	,135	,126		,736	,735
	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
UZAMA	,676**	,371	-,695**	-,674**	-,463*	-,644**	-,645**	-,528**	,073	1	-,531**
	,000	,074	,000	,000	,023	,001	,001	,008	,736		,008
	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
ÖZGÜL MUKAVMET	-,956**	,134	,918**	,913**	,579**	,800**	,878**	,417*	,073	-,531**	1
	,000	,531	,000	,000	,003	,000	,000	,042	,735	,008	
	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Hammadde oldukça etkili bir parametredir. Hammadde ile düzgünsüzlük, cv, neps, kalın yer ve özgül mukavemet arasında negatif yönlü çok güçlü bir ilişki vardır. Hammadde ince yer,

tüylülük ve uzama arasında da yine negatif yönlü orta seviyede güçlü bir ilişki vardır. Büküm alfasındaki değişiklik ile tüylülük dışında hiçbir özellik üzerinde anlamlı bir etki yaratmamıştır.

Sonuç olarak, büküm değişikliğinin anlamlı bir etkisi gözlenmediği için eğirme işlemi sırasında optimum büküm değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Isırgan elyafının pamuk elyafına göre daha az pestisit ve su ihtiyacı olması, negatif yönlü bir etkisinin olmaması ile, pamuk elyafına alternatif olarak kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

1- Balkış, M. (2025). TEKSTİL VE MODA SEKTÖRÜNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR VEGAN MODA. Sanat ve Tasarım Dergisi. (35), s. 647-688

2- CAN, Ö., & AYVAZ, K. M. (2017). Tekstil ve Modada Sürdürülebilirlik. Akademia Sosyal Bilimler Dergisi. 3(1) s.110-119

3- BAŞARAN, F. N., & BEKİROĞLU, E. (2020). ISIRGAN BİTKİSİNDEN ELDE EDİLEN LİFLERLE ÜRETİLEN RİNG VE OPEN-END İPLİKLERİN MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ. Ulak Bilge Sosyal Bilimler Dergisi. (46) s.286-301

4- ÖZDEMİR, S., & TEKOĞLU, O. (2011). EKOLOJİK TEKSTİL ÜRÜNLERİNDE KULLANILAN HAMMADDELER*. Akdeniz Sanat.

5- BAYKAL, P. D., & AKBAŞ, Ö. (2024). Kompakt Penye İplik Üretiminde Kopça Türünün İplik Kalitesine ve Kopça Ömrüne Etkileri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. 39(2) s.415-426

6- BAYKAL, P. D., & KUMAŞ, Z. (2024). Eğirme Türünün Haşıl Sonrası İplik Özelliklerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(2), s. 389-399.

7- AYTAÇ, A., YILMAZ, B., & DENİZ, V. (2008). KORD BEZİ ÜRETİMİNDE BÜKÜM YÖNÜ. İşletme Fakültesi Dergisi, 9(1), s. 61-71.

8- PARLAKYİĞİT, P. (2022). Tekstilde İstatistiksel Proses Kontrol Uygulaması Örneği. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(4), s. 911-924.

9- ÜLKÜ, Ş., & ÖMEROĞLU, S. (2002). GELİŞTİRİLMİŞ LİF ÖLÇÜM SİSTEMİ AFIS'İN PENYE PAMUK İPLİKÇİLİĞİNDE KULLANIMI. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7(1).

10- ÜREYEN, M., & KADIOĞLU, H. (2006). RİNG PAMUK İPLİKLERİ İLE HVI LİF ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İNTERAKSİYONLAR. TEKSTİL ve KONFEKSİYON, 16(3), s. 180-184.

11- TAN, S., & BABAARSLAN, O. (2024). KISA LİF İPLİKÇİLİĞİNDE KULLANILAN TARAK MAKİNESİNDE TAMBUR HIZ DEĞİŞİMİNİN PROSES ÇIKTILARINDA KALİTEYE OLAN ETKİSİ. TEKSTİL VE MÜHENDİS, 31(134), s. 65-77.

12- ULUDERE, Ö. (2009). KONVANSİYONEL VE ORGANİKPENYE PAMUK İPLİKLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. Yüksek Lisans Tezi, GAZİ ÜNİVERSİTESİ, EĞİTİM BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, Ankara.

A SYSTEMATIC REVIEW OF GOAL PROGRAMMING APPLICATIONS IN LOCATION ALLOCATION PROBLEMS

ABDULHAMID ERTUĞRUL[1], SÜLEYMAN METE[1], EREN ÖZCEYLAN[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye

Abstract:

Location-Allocation Problems (LAPs) play a pivotal role in optimizing spatial resource planning across critical sectors such as healthcare, logistics, emergency response, and public infrastructure. Goal Programming (GP) has emerged as a robust and flexible multi-objective optimization technique for addressing the often conflicting goals inherent in these problems. This paper presents a systematic review of 88 studies that integrate GP into LAP modeling, covering the literature up to 2025.

The review encompasses classical GP formulations—such as weighted and lexicographic models—as well as advanced variants, including fuzzy, stochastic, and multi-choice GP. The studies are classified based on methodological approach and application domain, with a comparative analysis of objectives (e.g., cost minimization, equity, response time), constraints, data types, and solution techniques.

The findings indicate a strong emphasis on minisum/median-based LAPs, reflecting a prevalent focus on minimizing total cost or distance, while alternative modeling approaches remain comparatively limited. Although weighted GP is the most frequently applied variant, few studies incorporate uncertainty through fuzzy or stochastic frameworks. Additionally, no reviewed study addressed the location of community centers, pointing to a notable gap in the planning of social infrastructure. The integration of GP with decision-support tools such as the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Data Envelopment Analysis (DEA) is also discussed. This review serves as a comprehensive reference for researchers and practitioners by mapping current practices, identifying research gaps, and proposing future directions—particularly the broader.

Keyword: Location allocation problems, weighted, preemptive, multi objective goal programming, literature review

1. Introduction

Location–Allocation Problems (LAPs) represent a fundamental class of combinatorial optimization models focused on determining the optimal siting of facilities and the allocation of demand points to those facilities (Lee et al., 1979) (Karatas et al., 2018). These problems play a critical role across strategic, tactical, and operational levels of decision-making in domains such as industrial engineering, supply chain management, urban planning, disaster response, and public service systems (Barzinpour et al., 2014) (CHANG Xiang-yun et al., 2009). The objectives in LAPs typically include minimizing transportation or operational costs, improving service response times, maximizing service coverage, and ensuring balanced utilization of resources or capacities across facilities(Eydi et al., 2024)(Hallak et al., 2019). Depending on the context, these objectives can reflect fairness in regional access, redundancy in emergency systems, or sustainability goals.

Goal Programming (GP), first introduced by Charnes and Cooper in the 1960s, is an established multi-objective optimization approach that extends classical linear programming to handle multiple and often conflicting goals. Instead of optimizing a single aggregate objective, GP seeks to minimize the weighted deviations from desired aspiration levels, allowing decision-makers to explicitly express and manage trade-offs among objectives. This methodological flexibility makes GP especially suitable for solving LAPs, where planners often need to balance economic efficiency with service equity, geographic coverage, or risk minimization(Tavakkoli-Moghaddm R et al., 2008) (Arabzad et al., 2017). Moreover, variants such as Fuzzy GP, Lexicographic GP, and Weighted GP offer further adaptability to real-world uncertainty and preference hierarchies, as observed in several recent applications.

Early applications of Goal Programming in location–allocation modeling, such as the work by(Lee et al., 1981), illustrated its capability in addressing multi-criteria facility siting decisions. Their model integrated several conflicting objectives to determine not only the optimal number of facilities but also their precise geographic distribution in relation to shipping destinations. Over the past few decades, research in multi-objective location modeling has grown significantly, with GP emerging as a widely adopted technique in sectors including emergency response, healthcare delivery, education, supply chain management, and public infrastructure planning(Farahani et al., 2010) . This evolution underscores the increasing need for models that can account for real-world uncertainties such as fluctuating demand, supply chain disruptions, and infrastructure vulnerability—factors particularly relevant in time-critical or high-stakes environments.

Today, GP employed across a diverse array of location–allocation problems, including the siting of fire stations, ambulance dispatch centres, hospitals, schools, relief distribution hubs, and industrial warehouses(Farahani et al., 2010) . These models are particularly valuable in balancing competing priorities such as cost efficiency, service accessibility, response time, and spatial equity. However, despite this methodological advancement and broad applicability, the literature remains fragmented. There is a lack of comprehensive, systematic reviews that focus on GP-based LAP models, making it difficult to draw generalized insights or identify best practices across domains.

Hybrid approaches that integrate Goal Programming with other multi-criteria decision-making techniques—such as the Analytic Hierarchy Process (AHP) or the Analytic Network Process (ANP)—have significantly expanded the applicability and flexibility of GP in modelling complex decision environments. For instance, (Badri, 1999) developed a model combining AHP-derived weights with weighted GP to support global manufacturing site selection, incorporating diverse objectives related to financial performance, political risk, and operational feasibility within a unified framework. These hybrid models are particularly useful in structuring subjective preferences and aligning them with quantifiable system goals, making them well-suited for real-world applications involving competing priorities.

Building on these methodological developments, this paper conducts a systematic literature review of research integrating Goal Programming into Location–Allocation Problems. The review spans over four decades of scholarly work and covers a range of application domains including healthcare planning, humanitarian logistics, education infrastructure, environmental management, and supply chain network design. By synthesizing the existing body of knowledge, the study aims to map methodological trends, classify problem structures and solution approaches, and identify research gaps. Ultimately, the review provides a comprehensive foundation for advancing multi-objective facility location modeling in both theory and practice.

2. Literature Search Strategy

To A structured multi-step search strategy was employed to identify and curate relevant literature for this review. The process involved both database querying and manual reference screening to ensure comprehensiveness.

Databases searched: The following academic databases were systematically queried: Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar. Searches utilized combinations of relevant keywords, including "goal programming", "multi-objective optimization", "location-allocation", and "facility location".

Supplementary search:

To minimize omission of key studies, the reference lists of foundational review articles—such as (Farahani et al., 2010), (Boonmee et al., 2017), and (Dönmez et al., 2021)— were manually screened to identify additional eligible papers not captured through initial database queries.

Inclusion criteria: Studies were included if they met the following conditions:

- Explicitly formulated a location–allocation problem using goal programming or a goal-based multi-objective optimization approach.
- Focused on strategic or long-term facility location decisions, excluding studies solely addressing short-term tactical allocation (e.g., vehicle-to-site assignment).
- Focused on strategic or long-term facility location decisions, excluding studies solely addressing short-term tactical allocation (e.g., vehicle-to-site assignment).
- Provided adequate methodological detail (e.g., mathematical formulation, objectives, constraints) to enable structured comparison and classification.
- Were published in peer-reviewed journals, academic conferences, or theses up to the 2025.

Exclusion criteria: Studies were excluded if they:

- Did not incorporate Goal Programming in their LAP modeling (e.g., used only weighted sum, ε-constraint, or compromise programming).
- Focused solely on routing, scheduling, or inventory management without a facility location component.
- Were duplicate publications, non-peer-reviewed reports, or extended abstracts lacking full methodological exposition.

3. Data Extraction and Classification

Following the PRISMA 2020 guidelines for systematic reviews (Page et al., 2021), a structured data extraction and classification process was conducted to ensure transparency, reproducibility, and consistency in comparative analysis.

In line with PRISMA 2020 recommendations, a flow diagram was developed to visually represent the study selection process. This diagram illustrates the number of records identified through database searches, the number of duplicates removed, the number of records screened, and the final number of studies included in the review. The flowchart enhances transparency by clearly documenting the inclusion and exclusion decisions at each stage of the systematic review process. Fig.1, shows the flow chart of PRISMA.

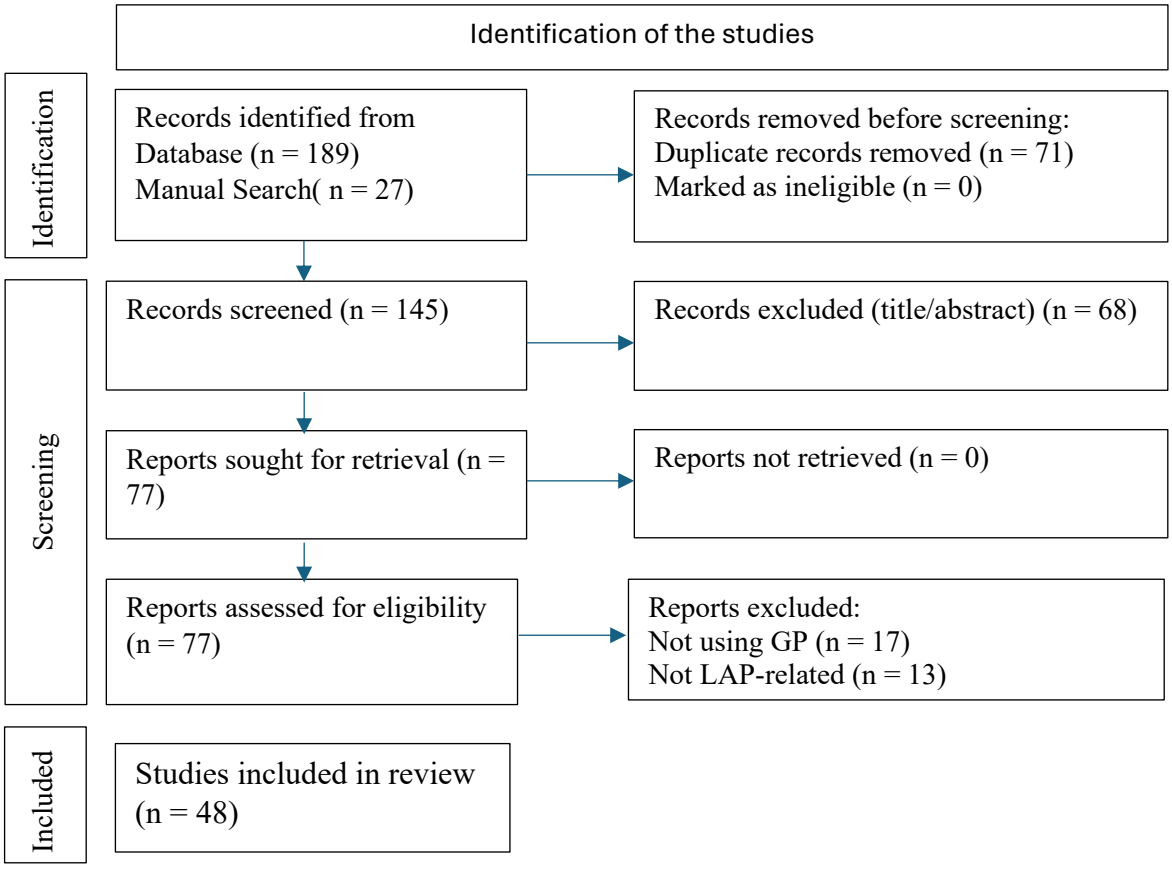


Figure 1. PRISMA flow chart

The extracted information was categorized across several dimensions as follows:

- Reference details: Basic bibliographic information, including author names and year of publication.
- Application domain/sector: Studies were grouped into major sectors such as healthcare, emergency logistics, supply chain management, disaster relief, education, energy, finance, and other relevant fields.
- Type of facility/service considered: This included the nature of the facilities involved—such as hospitals, warehouses, shelters, schools, or mobile service hubs.
- Objective variables: Each study's objective functions were recorded, noting the number of goals, the types of objectives (e.g., cost minimization, service coverage, equity).
- Type of Goal Programming (GP) applied: The modeling approach was classified into variants such as weighted GP, lexicographic GP, preemptive GP, fuzzy GP, or hybrid GP frameworks.
- Uncertainty handling: Information was extracted on whether the study addressed uncertainty, and the specific approach used—such as stochastic modeling, fuzzy sets, or robust optimization.
- Data type and problem size: The nature of the datasets (e.g., real-world vs. simulated), along with problem scale, data source, and contextual relevance, were recorded where available.
- Real case application: If the study applied its model to a real scenario, details on the country, setting, and data provenance were noted.
- Key findings and contributions: A concise summary of each study's primary contribution was developed, highlighting methodological innovation or practical insights relevant to facility location planning.
- The extracted data from the validated studies were compiled into a structured master spreadsheet using Microsoft Excel. This dataset served as the basis for descriptive quantitative analysis across multiple dimensions relevant to Goal Programming applications in Location–Allocation Problems.

The following analytical categories were examined:

- Publication trends: The number of studies was analyzed by year to observe temporal trends in research activity.
- Sectoral distribution: Studies were categorized according to their application domains, including sectors such as healthcare, emergency logistics, supply chain, education, and disaster relief.
- Goal Programming variants: The types of GP models used in the studies were recorded and classified—e.g., weighted GP, fuzzy GP, lexicographic/preemptive GP, and hybrid approaches.
- Uncertainty modeling: The frequency and methods of uncertainty treatment were documented, including approaches such as stochastic modeling, fuzzy sets, and robust optimization.

- Number of objectives: The distribution of models based on the number of objectives—single vs. multiple—and the nature of these objectives (e.g., cost, coverage, equity) was analyzed.
- Charts and summary tables were generated using Excel to visually represent these categories and facilitate interpretation of patterns across the literature. These analytical dimensions were selected based on their relevance to both methodological rigor and practical application, and they align with established guidelines for conducting systematic reviews in multi-objective optimization and location modeling literature.

4. Comparison with Existing Literature Reviews

While several prior reviews have examined either Location–Allocation Problems (LAPs) or Goal Programming (GP) independently, this study is, to the best of our knowledge, the first comprehensive and systematic review explicitly focused on the intersection between GP and LAPs. Unlike broader LAP reviews(Masudin, 2019) (Ayati et al., n.d.) that emphasize general logistics or urban planning perspectives, the present work provides a domain-specific classification and methodological synthesis of 45 peer-reviewed studies that integrate GP within LAP models.

Existing GP-centered reviews (Jones et al., 2016) and (Tamiz et al., 1995) typically survey the evolution of GP techniques across various application areas without dedicated treatment of LAP structures or sectoral contexts. In contrast, this review develops a detailed taxonomy linking GP variants (weighted, preemptive, fuzzy, hybrid) to specific LAP formulations (LAP formulations (capacitated, hierarchical, stochastic)) and application domains such as healthcare, humanitarian logistics, and education. Furthermore, it identifies research gaps—particularly the limited use of GP–LAP models in community infrastructure and equity-oriented planning—that remain largely unaddressed in the existing literature.

Accordingly, this paper contributes a unique methodological and thematic synthesis by offering a focused, LAP-specific mapping of GP applications, supported by structured classification, domain coverage, and a forward-looking research agenda. In addition to the four core review articles discussed, several complementary literature reviews were also examined to ensure comprehensive coverage across both domains (see Tables A1 and A2 in the Appendix). However, most of these studies either treat GP and LAP separately, address broad optimization contexts without methodological integration, or lack an LAP-specific synthesis. This further underscores the novelty and contribution of the present review. Table 1 and 2 shows the previews litrerature reviews for GP and LAP's.

Table I. Literature reviews for GP

Author(s)	Year	Title	Scope	Relevance to GP + LAP
(Soyibo, 1985)	1985	Goal Programming Methods and Applications: A Survey	Early systematic review of GP formulations and applications in management and economics.	Core GP foundation; no LAP context.

Author(s)	Year	Title	Scope	Relevance to GP + LAP
(Schniederjans Marc J, 1995)	1995	Introduction to Goal Programming	Comprehensive book summarizing GP development, models, and applications up to mid-1990s.	Key GP taxonomy reference; LAP not discussed.
(Tamiz et al., 1995)	1995	A Review of Goal Programming and Its Applications	First structured classification of GP by variant (weighted, lexicographic) and application area.	Essential GP taxonomy; some minor LAP references.
(Azmi Rania et al., 2010)	2010	A Review of Goal Programming for Portfolio Selection	Reviews GP applications in finance and portfolio optimization contexts.	Strong on GP methodology, unrelated to LAP.
(Jones et al., 2016)	2016	A Review of Goal Programming	Updated and extended GP taxonomy; includes fuzzy, stochastic, and hybrid GP developments.	General GP devalopment, applications of goal programming
(Ignizio, 1978)	1978	A Review of Goal Programming: A Tool for Multiobjective Analysis	Foundational concepts of GP	No reference to LAP
(Hasmukhbhai et al., 2023)	2023	Practical and Adaptable Applications of Goal Programming	Diverse GP use cases	LAP only lightly touched

Table 2. Literature reviews for LAP

Author(s)	Year	Title	Scope	Relevance to GP + LAP
(Azarmand Zeinab et al., 2009)	2009	Location-Allocation Problem (Book Chapter)	Reviews classic LAP models and classifications (discrete, continuous, network).	Theoretical LAP foundation; no GP inclusion.
(Farahani et al., 2010)	2010	Multiple Criteria Facility Location Problems: A Survey	Surveys multi-objective and multi-criteria location problems and solution methods.	GP implied as a multi-objective tool.
(Boonmee et al., 2017)	2017	Facility Location Optimization Model for Emergency	Reviews deterministic, stochastic, dynamic, and	Strong LAP review; no GP, but useful for

Author(s)	Year	Title	Scope	Relevance to GP + LAP
		Humanitarian Logistics	robust facility location models.	humanitarian LAP context.
(Dönmez et al., 2021)	2021	Humanitarian Facility Location Under Uncertainty: Critical Review and Future Prospects	Reviews facility location under uncertainty in humanitarian logistics.	focuses on uncertainty models
(Masudin, 2019)	2019	Location-Allocation Problems in the prespec tive Supply Chain: Approaches and Applications	Reviews LAP approaches in supply chains and logistics.	Useful for contextual LAP background; no GP focus.
(Ayati et al., n.d.)	2024	Optimizing Location Allocation in Urban Management	Urban-focused LAP	GP not considered

5. Descriptive Analysis

This section presents a structured quantitative overview of 48 peer-reviewed studies that integrate Goal Programming into Location–Allocation Problems (GP–LAP), spanning the period from 1976 to 2025. The objective of this analysis is to identify trends and methodological patterns across the literature by examining key aspects derived directly from the validated dataset.

The analysis focuses on the following dimensions:

- Publication trends: Distribution of studies over time to capture the evolution of research interest in GP–LAP models.
- Application domains: Categorization of studies by sector, including healthcare, emergency logistics, disaster relief, education, energy, finance, and supply chain management.
- Goal Programming variants used: Classification of GP models employed, such as weighted GP, fuzzy GP, lexicographic/preemptive GP, and hybrid formulations.
- Uncertainty modeling: Assessment of whether and how uncertainty was addressed in the modeling approach, based on available study details.
- Objective structure: Overview of the number of objectives considered in each study, as specified in the model formulation.

Descriptive statistics and visualizations were generated using Excel to summarize these aspects. The selected dimensions reflect both the methodological practices and practical applications found in the literature and provide a foundation for the comparative analysis presented in the following sections.

6. Publication Trends

The temporal distribution of Goal Programming–based Location–Allocation Problem (GP–LAP) studies reveals a steady evolution from early foundational work to a more diversified and applied research landscape. The earliest contributions date back to the late 1970s, with pioneering efforts by (Werczberger, 1976)and (Lee et al., 1979) laying the groundwork for multi-objective facility location modeling using GP. This was followed by notable studies in the early 1980s, including (Lee et al., 1981)and (Kwak et al., 1985), which further formalized GP applications in location decision-ma ng.

The 1990s witnessed continued, albeit limited, contributions such as (Badri, 1999), who integrated GP with AHP for global manufacturing site selection. A significant increase in research activity began post-2005, with studies exploring complex real-world LAP contexts. The period from 2014 to 2021 marked the most substantial growth, with a peak in 2014 and 2017 (each contributing four studies), and ongoing activity through 2025. Table.3 shows the periods and the number of publications in it.

Table 3. Periods with number of publications

Period	Count
Before 1985	6
1985-1994	4
1995-2004	4
2005-2014	12
2015-Present	22

Key sectors driving this growth include:

Healthcare and education, with studies like (Miç et al., 2019) and (Hallak et al., 2021). Humanitarian logistics and disaster planning, represented by works such as (Tavakkoli-Moghaddm R et al., 2008) and (CHANG et al., 2009). Advanced modeling under uncertainty, such as (Arabzad et al., 2017)using fuzzy GP, and more recently (Eydi et al., 2024) addressing uncertainty in multi-objective LAPs.

This trend highlights the increasing recognition of Goal Programming as a robust and adaptable approach for solving complex, multi-objective facility location problems. Over time, the models have become more sector-specific, context-sensitive, and methodologically diverse. Fig.2, shows publication trends by period.

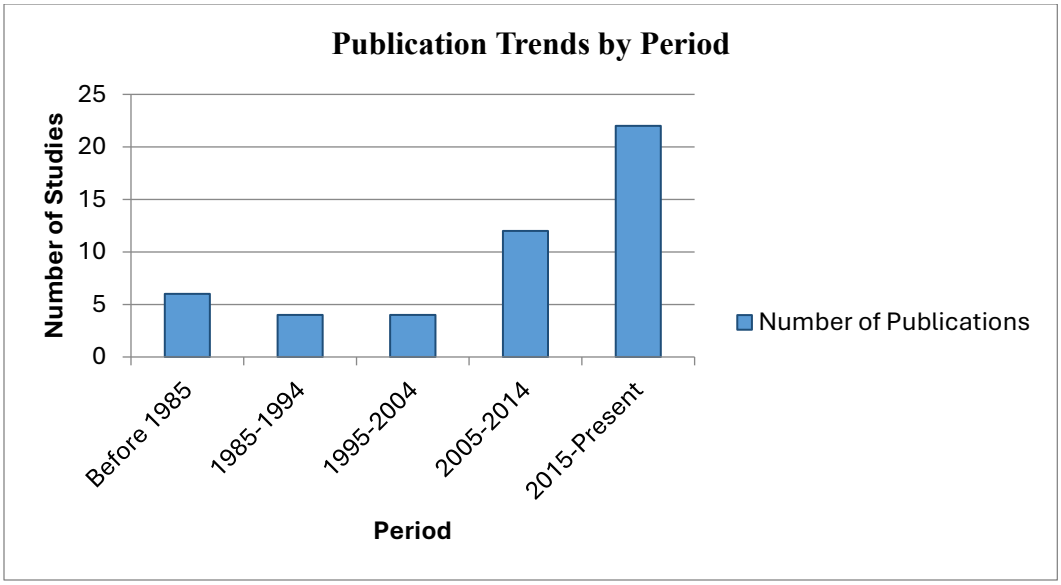


Figure 2. publication trends by period shelling)

7. Application Domains

Goal Programming (GP) has demonstrated notable versatility in addressing Location–Allocation Problems (LAPs) across diverse real-world domains. The reviewed studies reveal distinct thematic concentrations—most prominently in supply chain and industrial logistics, humanitarian and disaster relief, healthcare, and public service planning. The most prominent sector is Supply Chain and Industrial Logistics, which constitutes the largest share of contributions. This prominence reflects GP's capacity to handle trade-offs between cost, service level, and sustainability within complex distribution networks. For instance, (Barzinpour et al., 2014) applied GP to design a reverse logistics network, balancing cost and coverage constraints. (Cedolin et al., 2018) proposed a GP-based model for industrial facility location and distribution planning, while (Arabzad et al., 2017) extended this application to green supply chain network design using fuzzy GP. (Jamalnia et al., 2014) integrated fuzzy QFD with GP to address both quantitative and qualitative aspects of global supply chain planning, and (CHANG Xiang-yun et al., 2009) applied preemptive GP in optimizing multi-echelon reverse logistics systems. Other studies, such as (Flores et al., 2020) developed multi-level GP frameworks for industrial and manufacturing facility network design.

A substantial body of literature focuses on Humanitarian and Disaster Relief, where GP supports decision-making under conditions of urgency, scarcity, and equity concerns. (Tavakkoli-Moghaddm R et al., 2008) formulated a multi-objective GP model for the location and allocation of relief centers. (CHANG Xiang-yun et al., 2009) addressed disaster recovery logistics in post-crisis scenarios using GP, while (Praneetpholkrang et al., 2021) emphasized equity in emergency shelter site selection. Recent studies such as (Khodadadi et al., n.d.) and (Eydi et al., 2024) explored post-earthquake and mobile hub planning respectively—the former through fuzzy GP and the latter via stochastic GP integrated with metaheuristics. (Paldrak et al., 2023) proposed a fuzzy weighted goal programming approach for locating emergency assembly areas in post-

disaster contexts, optimizing the trade-off between facility cost and victims' travel distances under uncertain aspiration levels. (Flores et al., 2023) focused on post-disaster service allocation through mobile units in flood-prone regions, reflecting the growing complexity and urgency in humanitarian LAPs.

In the Healthcare sector, GP has been utilized to improve accessibility, equity, and cost-efficiency. (Hallak et al., 2019) used GP to locate primary healthcare centers in northern Syria, incorporating capacity and coverage considerations. (Fang et al., 2015) modeled the trade-off between efficiency and accessibility in medical facility siting. (Hallak et al., 2021) developed a GIS-integrated GP model to address the co-location of health and education services in conflict-affected zones. (Wichapa et al., 2017) focused on medical waste management using fuzzy GP, while (Kuvvetli, 2023) applied GP to pandemic preparedness planning.

Though less represented, the domain of Public and Social Services includes meaningful applications that link LAPs with broader social planning. (Hallak et al., 2021) applied GP to evaluate and allocate social entrepreneurship projects in crisis areas. (Karatas et al., 2018) designed a risk-based GP model for public facility location under probabilistic constraints. Early contributions by (Werczberger, 1976) and (Bhattacharya et al., 1992) laid theoretical foundations for public service LAPs. Additionally, (Alsalloum et al., 2006) (Ibraheem Alsalloum et al., 2003)proposed GP models for school siting and educational resource allocation under uncertainty, specifically addressing rural and conflict-affected areas.

Several Emerging Areas have recently gained attention in GP–LAP literature. In the Energy and Environment sector, (San Cristóbal, 2012), (Ching-Ter Chang, 2015), and applied GP to renewable energy infrastructure planning, hybrid energy system design, and location optimization of energy facilities. In Education, (Hallak et al., 2021), as well as (Ibraheem Alsalloum et al., 2003), addressed the siting of schools and education centers in marginalized or crisis settings. Urban and environmental planning studies by (Zhan et al., 2011) and (gang et al., n.d.) further demonstrate GP's adaptability, using spatial models to optimize sustainable facility locations.

Finally, some studies proposed General or Theoretical Frameworks without direct empirical implementation. (Lee et al., 1979) developed early integer GP formulations for location modeling, and (T. Uno et al., 2007) introduced a conceptual GP–LAP framework that has influenced subsequent theoretical development. Similarly, foundational works by Masood (Abdulla Badri, 1996) and (Zanakis, 1981) contributed to methodological discussions on GP modeling structures, emphasizing their general applicability across decision contexts.

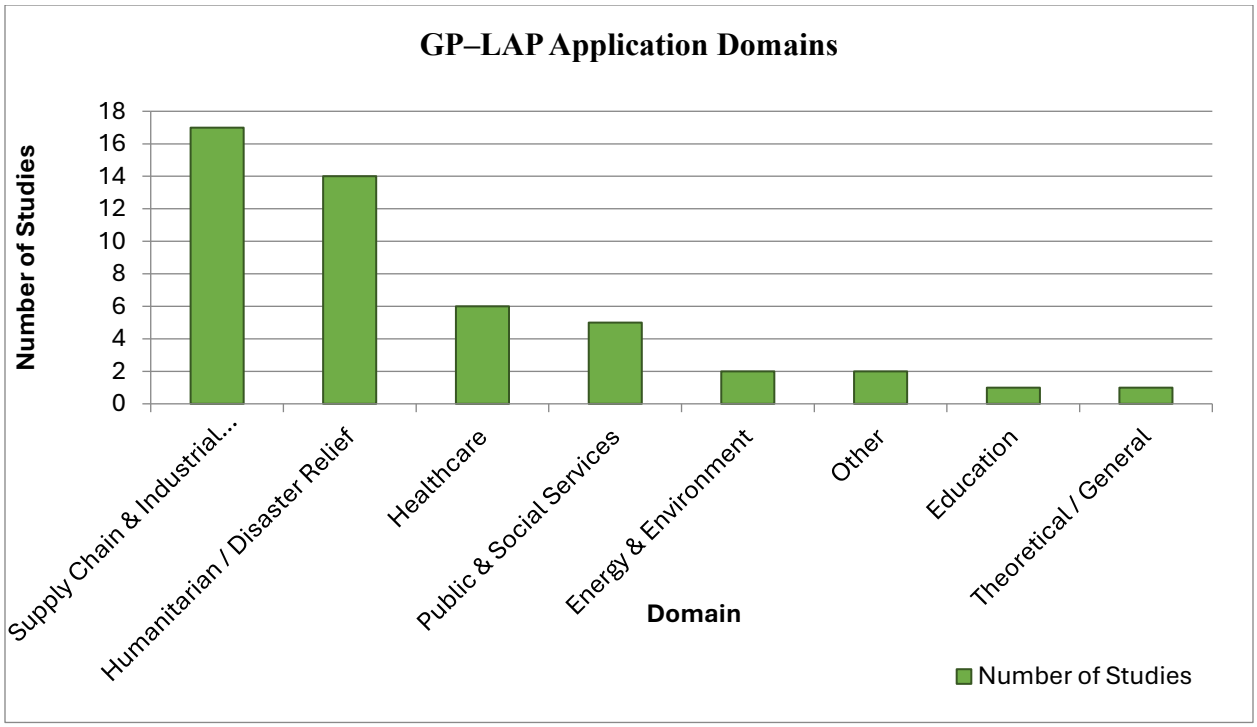


Figure 3. GP-LAP Application Domains

Taken together, these diverse applications underscore GP's role as a flexible, multi-objective decision-making framework adaptable to both practical and conceptual dimensions of location–allocation problems. Fig.4, illustrate application domains for GP-LAP. Table 4. shows the number of studies of every domain.

Table 4. Application Domains in GP-LAP

Unified Sector	# studies	studies
Supply Chain & Industrial Logistics	17	(Lee et al., 1979); (Lee et al., 1981); (Schniederjans et al., 1982); (Kwak et al., 1985); (Abdulla Badri, 1996); (Badri et al., 1998); (Badri, 1999); (T. Uno et al., 2007); (Tavakkoli-Moghaddm R et al., 2008); (Chang et al., 2009); (Jamalnia et al., 2014); (Ghodratnama et al., 2015); (Hadipour et al., 2015); (Mehrbod et al., 2014); (Cedolin et al., 2018); (Arabzad et al., 2017); (Eydi et al., 2024)
Humanitarian / Disaster Relief	14	(Kanoun et al., 2010); (Zhan et al., 2011); (Barzinpour et al., 2014); (Trivedi et al., 2017); (Akbari et al., 2018); (Hallak et al., 2019); (Hong et al., 2020); (Flores et al., 2020); (Praneetpholkrang et al., 2021); (Paldrak et al., 2023); (Flores et al., 2023); (Khodadadi et al., n.d.); (Araz et al., 2007); (Kınay et al., 2019)
Healthcare	6	(Zanakis, 1981); (Alsalloum et al., 2003); (Alsalloum et al., 2006); (Wichapa et al., 2017); (Miç et al., 2019); (Kuvvetli, 2023)

Public & Social Services	5	(Werczberger, 1976); (Bhattacharya et al., 1992); (Fang et al., 2015); (Karatas et al., 2018), (Ertuğrul et al., 2025)
Energy & Environment	2	(San Cristóbal, 2012); (Chang, 2015)
Other	2	(Sinha et al., 1987); (Bhattacharya et al., 1992);
Education	1	(Hallak et al., 2021)
Theoretical / General	1	(gang et al., 1984)

8. Types of Goal Programming Used

The systematic review revealed a diverse range of Goal Programming (GP) approaches employed in Location-Allocation Problems (LAP). These applications can be broadly grouped into four families: Weighted GP, Preemptive GP, Fuzzy GP, and Hybrid or Extended GP.

Weighted Goal Programming (WGP) emerged as the most commonly adopted method. Early and foundational uses include (gang et al., 1984) and (Badri et al., 1998), who applied classical WGP in industrial and international facility location scenarios. (Cristóbal, 2012), (Miç et al., 2019), and (T. Uno et al., 2007) represent later WGP applications in healthcare and public planning. Several studies also integrated AHP or other weighting tools, such as (Badri, 1999), (Jamshidi, 2017), and (Miç et al., 2019). Other refinements included satisfaction functions as in (Kanoun et al., 2010), or hybridization with lexicographic logic (Ertuğrul et al., 2025).

Preemptive (Lexicographic) GP was primarily used in early LAP studies, including (Werczberger, 1976), (Schniederjans et al., 1982), (Zanakis, 1981), and (Kwak et al., 1985). These models addressed industrial site selection under strict prioritization rules. Later, (Fang et al., 2015) and (Barzinpour et al., 2014) applied preemptive logic in public facility siting, balancing equity with operational objectives. Notably, (Bhattacharya et al., 1992) (Bhattacharya et al., 1993)proposed lexicographic integer GP models for strategic facility location, highlighting early use of strict goal hierarchies, Recently (Kınay et al., 2019). used it to determine shelter location, they Combines stochastic constraints with goal programming in a humanitarian context.

Fuzzy Goal Programming (FGP) models were widely applied in contexts with uncertainty and ambiguity. Studies such as (Arabzad et al., 2017), (Cedolin et al., 2018), (Hadipour et al., 2015), and (Khodadadi et al., n.d.) developed fuzzy formulations in supply chains and healthcare. Advanced models combined FGP with robust optimization e.g., (Ghodratnama et al., 2015) or integrated it with fuzzy QFD (Jamalnia et al., 2014) or fuzzy AHP (Wichapa et al., 2017). (Araz et al., 2007) made a numerical example to determine emergency vehicles.

Finally, hybrid or extended GP models demonstrated the method's evolving complexity. These included: multi-choice GP (Ching, 2015), goal attainment GP (Eydi et al., 2024), iterative GP (Karatas et al., 2018), and probabilistic formulations such as chance-constrained stochastic GP (Zhan et al., 2011). More recently, (Olfati et al., 2025) proposed a sequential optimization algorithm combining individual goal resolution with GP.

9. Uncertainty Handling

Uncertainty is an inherent and critical challenge in real-world Location–Allocation Problems (LAP), particularly in fields such as healthcare, emergency response, and humanitarian logistics. Key sources of uncertainty include fluctuating demand, incomplete data, and ambiguous decision-maker preferences. The reviewed literature demonstrates that researchers have employed various modeling strategies to address these challenges—most prominently through Fuzzy Goal Programming (FGP) and hybrid extensions.

FGP enables the representation of imprecise goals, tolerances, and priorities using fuzzy membership functions, allowing decision-makers to model vagueness in aspirations and trade-offs. This approach was used in studies such as (Arabzad et al., 2017), (Cedolin et al., 2018), (Hadipour et al., 2015), and (Khodadadi et al., n.d.). Several of these models were further enhanced by integrating fuzzy AHP, fuzzy QFD, or robust optimization techniques. For instance, (Jamalnia et al., 2014) applied fuzzy GP with QFD to capture both quantitative and qualitative stakeholder preferences, while (Ghodratnama et al., 2015) and (Mehrbod et al., 2014) used fuzzy-robust frameworks to model uncertainty in hub locations.

In disaster planning contexts, studies such as (Wichapa et al., 2017) and (Trivedi et al., 2017) embedded fuzzy AHP within GP models, allowing for linguistic assessments and expert-driven criteria weighting. These hybridizations were particularly effective in modeling uncertainty where numerical precision was not feasible.

Outside of fuzzy logic, (Zhan et al., 2011) developed the only study to use stochastic goal programming with chance constraints, explicitly incorporating probability distributions to handle uncertain emergency logistics conditions.

Among the 48 reviewed studies:

- 16 studies (33,3%) incorporated uncertainty-handling methods, primarily through fuzzy logic (e.g., FGP, fuzzy AHP, fuzzy QFD) and, in one case, stochastic GP.
- 32 studies (66.6%) did not explicitly address uncertainty, instead relying on deterministic formulations.

The findings indicate a clear preference in the GP–LAP literature for fuzzy-based approaches to modeling uncertainty, reflecting their adaptability in data-scarce or preference-sensitive environments such as disaster relief and public health. However, the majority of studies (over 70%) did not incorporate uncertainty handling at all, highlighting a critical gap in current research. Future work could enhance the realism and robustness of GP–LAP models by integrating stochastic, robust, or hybrid uncertainty modeling, especially in high-risk or dynamic environments. Table 5, shows the distributions of studies according to the GP Type

Table 5. GP Studies Type

GP_Family	studies
Fuzzy GP	(Hadipour et al., 2015); (Arabzad et al., 2017); (Cedolin et al., 2018); (Khodadadi et al., n.d.); (Bhattacharya et al., 1992); (Jamalnia et al., 2014); (Bhattacharya et al., 1993); (Ghodratnama et al., 2015); (Paldrak et al., 2023); (Wichapa et al., 2017); (Mehrbod et al., 2014); (Trivedi et al., 2017)); (Araz et al., 2007)
Hybrid/Extended GP	(Eydi et al., 2024); (Tavakkoli-Moghaddm R et al., 2008); (Karatas et al., 2018); (Ching, 2015); (Zhan et al., 2011), (Ertuğrul et al., 2025)
Preemptive GP	(Lee et al., 1979); (Lee et al., 1981); (Flores et al., 2020); (Flores et al., 2023); (Schniederjans et al., 1982); (CHANG et al., 2009); (Fang et al., 2015); (Barzinpour et al., 2014); (Badri et al., 1998); (Kwak et al., 1985); (Werczberger, 1976); (Sinha et al., 1987); (Kınay et al., 2019)

10. Number of Objectives Modelled

The reviewed GP–LAP studies demonstrate considerable variation in the number of objectives modeled, reflecting the growing complexity and realism of modern location–allocation problems. While traditional formulations often focused on one or two objectives, the literature has evolved to address multi-dimensional goals including equity, risk, sustainability, and resilience.

In the current review:

- 2 to 3 objectives were most common, appearing in 25 studies (53.1%), with typical goals involving cost minimization, service coverage, and accessibility or fairness.
- 4 to 6 objectives were modeled in 12 studies (26.6%), often incorporating additional goals such as environmental impact, social equity, or capacity utilization.
- A smaller number of studies (9 studies, 20.0%) modeled 7 or more objectives, indicating applications with highly complex trade-offs—often in strategic supply chains, post-disaster logistics, or multi-sectoral planning scenarios.
- The most comprehensive model involved 11 objectives, highlighting the potential of Goal Programming to accommodate highly nuanced decision contexts.

This distribution underscores the flexibility of GP formulations to support both focused and highly elaborate multi-objective models. The upward trend in the number of objectives suggests increasing efforts to reflect the real-world complexity of LAPs—especially in sectors like humanitarian logistics, healthcare, and sustainability-focused planning.

11. LAP Types Analysis

The reviewed literature on Goal Programming–based Location–Allocation Problems (GP–LAP) reveals a wide variety of problem formulations tailored to specific operational needs, data structures, and decision environments. Based on structural and mathematical characteristics, these models can be grouped into the following categories:

Capacitated LAPs: These models include explicit constraints on the capacity of facilities—such as the number of patients a clinic can serve or the volume a warehouse can store—ensuring feasible and balanced demand allocation. This formulation is common in healthcare, emergency shelters, and post-disaster logistics. Representative studies include (Hadipour et al., 2015), (Kamran et al., 2016).

Covering-based LAPs (SCP, MCLP): These models emphasize service accessibility, aiming to cover all or a majority of demand points within a certain distance or time threshold. They are widely used in emergency services and healthcare where response times and coverage guarantees are critical. Notable examples include (Miç et al., 2019), (Ching, 2015), (Araz et al., 2007).

Multi-echelon / Hierarchical LAPs: These models capture layered network structures—such as central depots linked to regional or local facilities—often integrating distribution or transportation decisions. They are especially useful in supply chains and disaster recovery systems. Representative studies include (Hong et al., 2020), (Flores et al., 2020), and (CHAet al., 2009)

Integrated / Hybrid LAPs: These flexible formulations blend multiple LAP types or incorporate additional objectives, such as environmental sustainability, equity, risk mitigation, or stakeholder preferences. They are suitable for multi-dimensional problems involving complex trade-offs. Key studies include (Arabzad et al., 2017), (Badri, 1999), (Cristóbal, 2012), and (Praneetpholkrang et al., 2021).

Center-based LAPs (p-Center): Focused on minimizing the maximum distance between any demand point and its assigned facility, these models ensure equitable access—especially for underserved or remote populations. Though less common, they are critical for planning in equity-sensitive domains. A representative example is (Karatas et al., 2018).

Mobile / Dynamic LAPs: This class deals with time-dependent or scenario-based location–allocation decisions, such as mobile hubs, field hospitals, or temporary emergency units. They allow for flexible response to evolving or uncertain conditions. Relevant studies include (Eydi et al., 2024), who optimized mobile service hubs under uncertain demand, and (Flores et al., 2023), who modeled mobile units for flood response.

General / Unspecified LAPs: Some studies did not provide clear classification of the LAP type, either due to high-level conceptual modeling or limited methodological detail. These include early or theoretical works such as (Zanakis, 1981) and (T. Uno et al., 2007). While offering valuable insights into GP modeling, they do not conform to a specific LAP structure. Table 6, shows the studies according to number of objectives

Table 6. Number of goals

#Objectives	n_studies	studies
2	11	(Bhattacharya et al., 1993); (Ibraheem Alsalloum et al., 2003); (Alsalloum et al., 2006); (T. Uno et al., 2007); (CHANG et al., 2009); (Zhan et al., 2011); (Jamalnia et al., 2014); (Mehrbod et al., 2014); (Arabzad et al., 2017); (Paldrak et al., 2023); (Eydi et al., 2024)
3	14	(Bhattacharya et al., 1992); (Badri, 1996); (Tavakkoli-Moghaddm R et al., 2008); (Barzinpour et al., 2014); (Ghodratnama et al.,); (Hadipour et al., 2015); (Karatas et al., 2018); (Wichapa et al., 2017); (Akbari et al., 2018); (Praneetpholkrang et al., 2021); (Kuvvetli, 2023);(Khodadadi et al., n.d.), (Araz et al., 2007), (Kınay et al., 2019)
4	5	(Kwak et al., 1985); (Sinha et al., 1987); (Cedolin et al., 2018); (Hong et al., 2020); (Flores et al., 2020)
5	2	(Schniederjans et al., 1982); (Hallak et al., 2021)
6	5	(Lee et al., 1979); (gang et al., 1984); (Fang et al., 2015); (Trivedi et al., 2017); (Flores et al., 2023)
7	3	(Werczberger, 1976); (Cristóbal, 2012); (Chang, 2015)
8	2	(Lee et al., 1981); (Badri, 1999);(Ertuğrul et al., 2025)
9	3	(Kanoun et al., 2010); (Miç et al., 2019); (Miç et al., 2019)
11	1	(Badri et al., 1998)
81 individual goals grouped into 6 priority levels	1	(Zanakis, 1981)

12. Comparative Analysis and Synthesis

The reviewed GP–LAP studies demonstrate significant methodological diversity in how multi-objective location–allocation problems are formulated and solved. However, several patterns emerge when comparing modeling strategies, application domains, and analytical depth.

Studies adopting Weighted Goal Programming (WGP) typically focused on balancing cost with service objectives such as coverage and equity. These models were especially common in healthcare and public service planning e.g., (Miç et al., 2019); (Kuvvetli, 2023), where transparent trade-off analysis was essential for decision-makers. In contrast, Preemptive (Lexicographic) GP was prominent in earlier industrial location studies e.g., (Werczberger, 1976); (Kwak et al., 1985), where strict priority structures were suitable for policy-driven or regulatory environments.

Fuzzy Goal Programming (FGP) was predominantly used in uncertain or data-scarce contexts, particularly in humanitarian logistics and disaster management. These studies incorporated linguistic variables, satisfaction functions, or fuzzy AHP to handle subjective preferences and data imprecision. Notable examples include (Trivedi et al., 2017) and (Khodadadi et al., n.d.), which addressed shelter site selection under ambiguity. In contrast, stochastic GP was rare, with only one study (Zhan et al., 2011) applying chance-constrained formulations.

Structurally, minisum-type LAPs (e.g., p-median) were by far the most dominant, particularly in logistics and supply chains, reflecting a persistent focus on minimizing total distance or cost. While effective for efficiency goals, such models often overlook equity, which covering and center-based models attempt to address by emphasizing access and fairness.

Application domains influenced model complexity and objectives. Studies in healthcare and humanitarian serviceswere more likely to use three or more objectives, incorporate uncertainty, and rely on real-world data. Conversely, supply chain models leaned toward deterministic formulations with fewer goals and a focus on cost-efficiency.

Importantly, several studies employed hybrid LAP models that combine elements from multiple LAP types or extend classical models with new objectives such as sustainability or resilience. Examples include (Arabzad et al., 2017), who balanced cost, coverage, and emissions in a green supply chain; (Praneetpholkrang et al., 2021), who combined GP with ε-constraint and coverage in emergency facility planning; (Olfati et al., 2025), who integrated sequential optimization procedures for post-disaster logistics; and Badri (1999), who incorporated AHP into GP for global factory siting across financial, political, and operational dimensions.

Overall, the reviewed literature shows that the selection of GP type, LAP formulation, and solution approach is often driven more by the application context and data availability than by unified modeling principles. While models are increasingly tailored to real-world constraints, there remains clear room for expanding the integration of uncertainty handling, multi-level structures, and validated case studies, particularly in critical sectors such as humanitarian response and public service delivery. These directions represent promising opportunities for future GP–LAP research to develop more robust and context-sensitive decision-support tools.

13. Research Gaps and Future Directions

Despite the methodological diversity and rich application domains of GP–LAP studies, several key gaps remain, both in modeling sophistication and practical relevance.

First, a substantial proportion of studies (approximately 73%) did not incorporate any explicit uncertainty-handling mechanism, despite the inherent variability in demand, supply conditions, and decision-maker preferences in real-world LAPs. While fuzzy goal programming (FGP) has been moderately utilized, stochastic GP and robust optimization approaches are significantly

underexplored, even in high-risk contexts such as disaster relief or emergency logistics. This points to a clear research opportunity to develop hybrid fuzzy–stochastic GP models and data-driven probabilistic frameworks.

Second, most reviewed studies emphasized traditional minisum objectives, such as minimizing cost or total distance. However, equity-focused formulations, including center, covering, or fair-allocation models, remain underrepresented—despite their social significance in public service delivery. There is a growing need for value-sensitive LAP models that prioritize accessibility and fairness, especially in underserved or vulnerable populations.

Third, although some studies implemented hybrid or multi-level frameworks, multi-echelon and hierarchical LAP models remain rare. These models, which combine location with downstream distribution, routing, or service delivery, are crucial for integrated planning in complex systems, such as health supply chains, emergency networks, and urban infrastructure.

Fourth, the literature reveals a complete absence of GP–LAP applications in community-based infrastructure planning, such as locating community centers, social support facilities, or neighborhood resilience hubs. No study in the reviewed set directly addressed this important domain, despite its increasing relevance in post-crisis recovery, equitable urban planning, and social cohesion. This represents a critical gap and a promising avenue for future research.

Fifth, empirical validation remains limited. Many models are tested only on hypothetical or simulated data without real-world datasets, GIS-based inputs, or stakeholder engagement. This limits their practical transferability. Future work should prioritize real-world case studies, spatial data integration, and participatory modeling frameworks.

Finally, the field remains methodologically fragmented, with limited cross-disciplinary integration. There is a lack of convergence between GP–LAP modeling and fields such as urban studies, environmental planning, and data science. Advancing this integration, alongside improved reporting standards for models, objectives, and data, would significantly enhance the field's rigor and impact.

- Key Research Priorities Moving Forward
- Develop uncertainty-aware GP–LAP models using stochastic, fuzzy, and robust methods.
- Expand equity-driven formulations, especially in healthcare, education, and humanitarian logistics.
- Increase adoption of multi-echelon, dynamic, and hybrid LAP structures for complex systems.
- Address the complete gap in modeling community infrastructure and social service facilities.
- Emphasize empirical validation and spatial-data integration for realistic decision support.
- Promote interdisciplinary collaboration and standardized model documentation.

14. Conclusion

This systematic review explored the integration of Goal Programming (GP) within Location–Allocation Problems (LAP), analyzing 48 peer-reviewed studies published between 1976 and 2025. The review provides a structured synthesis of modeling approaches, GP variants, application domains, and methodological trends. Weighted and fuzzy GP models emerged as the most commonly applied variants, particularly in healthcare, disaster relief, and supply chain contexts. Despite this diversity, significant gaps persist. Uncertainty remains poorly addressed in most models, and equity-based formulations are still underutilized. Moreover, advanced structures—such as multi-echelon or dynamic LAPs—are rarely adopted, and no studies were found applying GP–LAP models to community infrastructure or social facilities, highlighting a critical blind spot in the literature. In addition to identifying these gaps, the review highlights the limited empirical validation across the field, with many studies relying on hypothetical datasets and lacking real-world applicability. This underscores the need for future research to adopt more realistic data, engage stakeholders, and address complex socio-technical challenges through interdisciplinary modeling. By offering a comprehensive overview of the state of GP–LAP research, this paper provides a foundation for both scholars and practitioners seeking to develop fairer, more resilient, and uncertainty-aware location-allocation models in real-world environments. The findings of this review hold practical relevance for policymakers, humanitarian organizations, and healthcare planners. By leveraging GP-based LAP models, decision-makers can systematically balance multiple competing objectives—such as cost, equity, and response time—under real-world constraints. These models provide a structured framework to support resource allocation, facility planning, and emergency preparedness, particularly in data-scarce or high-risk environments.

15. References

1. Badri, M. A. (1996). A multi-criteria approach to global facility location-allocation problem. International Journal of Information and Management Sciences. https://www.researchgate.net/publication/262563773
2. Akbari, A., Pelot, R., & Eiselt, H. A. (2018). A modular capacitated multi-objective model for locating maritime search and rescue vessels. Annals of Operations Research, 267(1–2), 3–28. doi: 10.1007/s10479-017-2593-1.
3. Alsalloum, O. I., & Rand, G. K. (2006). Extensions to emergency vehicle location models. Computers and Operations Research, 33(9), 2725–2743. doi: 10.1016/j.cor.2005.02.025.
4. Arabzad, S. M., Ghorbani, M., & Ranjbar, M. J. (2017). Fuzzy Goal Programming for Linear Facility Location-Allocation in a Supply Chain; The Case of Steel Industry. In International Journal of Research in Industrial Engineering (Vol. 6, Issue 2). doi.org/10.22105/riej.2017.49157
5. Araz, C., Selim, H., & Ozkarahan, I. (2007). A fuzzy multi-objective covering-based vehicle location model for emergency services. Computers and Operations Research, 34(3), 705–726. doi: 10.1016/j.cor.2005.03.021.
6. Ayati, A., Hashemi, M. M., Saffar, M., & Naji, H. R. (2024). Optimizing location allocation in urban management: A brief review. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.06032
7. Azarmand, Z., & Neishabouri Jami, E. (2009). Location allocation problem. In R. Zanjirani Farahani & M. Hekmatfar (Eds.), Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies (pp. 93–109). Heidelberg: Physica-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2
8. Azmi, R., & Tamiz, M. (2010). A review of goal programming for portfolio selection. In New Developments in Multiple Objective and Goal Programming (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 638, pp. 15–33). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10354-4
9. Badri, M. A. (1999). Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem. International Journal of Production Economics, 62(3), 237–248.doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00249-7
10. Badri, M. A., Mortagy, A. K., & Alsayed, A. (1998). A multi-objective model for locating fire stations. European Journal of Operational Research, 110(2), 243–260. doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00247-6
11. Barzinpour, F., & Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 70(5–8), 1291–1302. doi: 10.1007/s00170-013-5379-x.
12. Bhattacharya, U., Rao, J. R., & Tiwari, R. N. (1992). Fuzzy multi-criteria facility location problem. Fuzzy Sets and Systems, 51(3), 277–287. https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90018-Y.
13. Bhattacharya, U., Rao, J. R., & Tiwari, R. N. (1993). Bi-criteria multi facility location problem in fuzzy environment. Fuzzy Sets and Systems, 56(2), 145–153. https://doi.org/10.1016/0165-0114(93)90139-9.

14. Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. In International Journal of Disaster Risk Reduction (Vol. 24, pp. 485–498). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.ijdrr.2017.01.017.
15. Cedolin, M., Göker, N., Dogu, E., & Esra Albayrak, Y. (2018). Facility location selection employing fuzzy DEA and fuzzy goal programming techniques. Advances in Intelligent Systems and Computing, 641, 466–476. doi: 10.1007/978-3-319-66830-7_42.
16. CHANG Xiang-yun, Fan Ti-jun, & Xia Ying. (2009). A goal programming model for reverse logistics network planning. 2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2009, 1, 451–456. doi: 10.1109/ICIII.2009.115.
17. Ching-Ter Chang. (2015). Multi-choice goal programming model for the optimal location of renewable energy facilities. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 41, pp. 379–389). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2014.08.055.
18. Dönmez, Z., Kara, B. Y., Karsu, Ö., & Saldanha-da-Gama, F. (2021). Humanitarian facility location under uncertainty: Critical review and future prospects. In Omega (United Kingdom) (Vol. 102). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.omega.2021.102393.
19. Ertuğrul, A., Mete, S., & Özceylan, E. (2025). Location Allocation Model for Community Centers Using GIS and Multi-Objective Goal Programming in War Weary Area: A Case Study in Syria. IEEE Access, 13, 60284–60302. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3553816.
20. Eydi, A. R., & Saeedi Saghez, S. (2024). A p-center mobile hub location in a dynamic environment with capacity constraints and multiple allocation. Ain Shams Engineering Journal, 15(6). doi: 10.1016/j.asej.2024.102712.
21. Fang, L., & Li, H. (2015). Multi-criteria decision analysis for efficient location-allocation problem combining DEA and goal programming. RAIRO - Operations Research, 49(4), 753–772. doi: 10.1051/ro/2015003.
22. Farahani, R. Z., SteadieSeifi, M., & Asgari, N. (2010). Multiple criteria facility location problems: A survey. In Applied Mathematical Modelling (Vol. 34, Issue 7, pp. 1689–1709). doi: 10.1016/j.apm.2009.10.005.
23. Flores, I., Ortuño, M. T., & Tirado, G. (2023). A goal programming model for early evacuation of vulnerable people and relief distribution during a wildfire. Safety Science, 164. doi: 10.1016/j.ssci.2023.106117.
24. Flores, I., Ortuño, M. T., Tirado, G., & Vitoriano, B. (2020). Supported evacuation for disaster relief through lexicographic goal programming. Mathematics, 8(4). doi: 10.3390/math8040648
25. Gang, & Yun. (1984). a mixed Zero-One Integer Goal Programming Approach to Facility Location Allocation Problem with Multiple Objectives.
26. Ghodratnama, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Azaron, A. (2015). Robust and fuzzy goal programming optimization approaches for a novel multi-objective hub location-allocation problem: A supply chain overview. Applied Soft Computing Journal, 37, 255–276. doi: 10.1016/j.asoc.2015.07.038.
27. Hadipour Hassan, Azizmohammadi Roozbeh, Khoshnoud Mohammad, & Mahmoudabadi Abbas. (2015). A fuzzy goal programming approach for facility location problem (Case study: Service providers). doi: 10.1109/IEOM.2015.7093767.

28. Hallak, J., Koyuncu, M., & Miç, P. (2019). Determining shelter locations in conflict areas by multiobjective modeling: A case study in northern Syria. International Journal of Disaster Risk Reduction, 38. doi: 10.1016/j.ijdrr.2019.101202.
29. Hallak, J., & Polat, E. G. (2021). A MCDM Based on Goal Programming and GIS-Based Risk Assessment for the Evaluation of Educational Locations in Conflict Areas. Foundations of Computing and Decision Sciences, 46(4), 361–391. doi: 10.2478/fcds-2021-0022.
30. Hasmukhbhai, C. P., Khanna, R., & Patel, K. A. (2023). Practical and adaptable applications of goal programming: A literature review. Journal of Advanced Zoology, 44(S5). https://doi.org/10.53555/jaz.v44iS5.2017
31. Hong, J. D., & Jeong, K. (2020). Cross-evaluation based super efficiency DEA approach to designing disaster recovery center location-allocation-routing network schemes. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 10(4), 485–508. doi: 10.1108/JHLSCM-03-2020-0019.
32. Alsalloum, O. I., & Rand, G. K. (2003). A goal-programming model applied to the EMS system at Riyadh City, Saudi Arabia. Lancaster University Management School. http://www.lums.lancs.ac.uk/
33. Ignizio, J. P. (1978). A review of goal programming: A tool for multiobjective analysis. Journal of the Operational Research Society, 29(11), 1109–1119. https://www.jstor.org/stable/3009284
34. Jamalnia, A., Mahdiraji, H. A., Sadeghi, M. R., Hajiagha, S. H. R., & Feili, A. (2014). An integrated fuzzy QFD and fuzzy goal programming approach for global facility location-allocation problem. International Journal of Information Technology and Decision Making, 13(2), 263–290. doi: 10.1142/S0219622014500400
35. Jamshidi, H. (2017). An Empirical Application of Goal Programming and AHP in Real Estate Assessment. Journal of Management Research, 9(3), 1. doi: 10.5296/jmr.v9i3.11074
36. Jones, D., & Tamiz, M. (2016). A review of goal programming. International Series in Operations Research and Management Science, 233, 903–926. doi: 10.1007/978-1-4939-3094-4_21
37. Kamran, M. A., & Karimi, B. (2016, March). *A resource allocation model in a healthcare emergency center using goal programming*. In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (pp. 600–608). Kuala Lumpur, Malaysia. https://www.researchgate.net/publication/313576503
38. Kanoun, I., Chabchoub, H., & Aouni, B. (2010). Goal programming model for fire and emergency service facilities site selection. INFOR, 48(3), 143–153. doi: 10.3138/infor.48.3.143
39. Karatas, M., & Yakıcı, E. (2018). An iterative solution approach to a multi-objective facility location problem. Applied Soft Computing Journal, 62, 272–287. doi: 10.1016/j.asoc.2017.10.035
40. Khodadadi, S., Kargar Tasooji, T., Shariat-Mohayman, A., & Kalantari, N. (2024). A multi-objective simultaneous routing, facility location and allocation model for earthquake emergency logistics. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.22487
41. Kuvvetli, Y. (2023). A goal programming model for two-stage COVID19 test sampling centers location-allocation problem. Central European Journal of Operations Research, 31(1), 1–20. doi: 10.1007/s10100-022-00797-2

42. Kwak, N. K., & Schniederjans, M. J. (1985). A goal programming model as an aid in facility location analysis. Computers & Operations Research, 12(2), 151–161. https://doi.org/10.1016/0305-0548(85)90040-1
43. Lee, S. M., Green, G. I., & Kim, C. S. (1981). A multiple criteria model for the location-allocation problem. International Journal of Production Research, 19(5), 525–535. doi.org/10.1016/0305-0548(81)90026-5
44. Lee, S. M., & Sharp Franz, L. (1979). Optimising the Location-Allocation Problem with Multiple Objectives. International Journal of Physical Distribution & Materials Management, 9(6), 245–255. doi: 10.1108/eb014448
45. Masudin, I. (2019). Location-Allocation Problems in the Perspective of Supply Chain: Approaches and Applications. Jurnal Teknik Industri, 20(1), 1–11. doi: 10.22219/jtiumm.vol20.no1.1-11
46. Mehrbod, M., Tu, N., & Miao, L. (2014). A hybrid solution approach for a multi-objective closed-loop logistics network under uncertainty. Journal of Industrial Engineering International, 11(2), 237–252. doi: 10.1007/s40092-014-0089-z
47. Miç, P., Koyuncu, M., & Hallak, J. (2019). Primary health care center (PHCC) location-allocation with multi-objective modelling: A case study in Idleb, Syria. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(5). doi: 10.3390/ijerph16050811
48. Olfati, M., Krömer, P., Fanati Rashidi, S., Mirjalili, S., & Snášel, V. (2025). A goal programming-based algorithm for solving multi objective optimization problems. Annals of Operations Research. doi: 10.1007/s10479-025-06646-0
49. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. Journal of Clinical Epidemiology, 134, 178–189. doi: 10.1016/j.jclinepi.2021.03.001
50. Paldrak, M., Ergin, S. G., Erdem, G., & Tacoğlu, M. T. (2023). Fuzzy Goal Programming Approach to Multi-objective Facility Location Problem for Emergency Goods and Services Distribution (pp. 521–531). doi: 10.1007/978-3-031-39774-5_58
51. Praneetpholkrang, P., Huynh, V. N., & Kanjanawattana, S. (2021). A multi-objective optimization model for shelter location-allocation in response to humanitarian relief logistics. Asian Journal of Shipping and Logistics, 37(2), 149–156. doi: 10.1016/j.ajsl.2021.01.003
52. San Cristóbal, J. R. (2012). A goal programming model for the optimal mix and location of renewable energy plants in the north of Spain. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 16, Issue 7, pp. 4461–4464). doi: 10.1016/j.rser.2012.04.039
53. Schniederjans, M. J., Kwak, N. K., & Helmer, M. C. (1982). An application of goal programming to resolve a site location problem. International Journal of Systems Science, 13(12), 1603–1613. http://dx.doi.org/10.1287/inte.12.3.65
54. Schniederjans, M. J. (1995). *Goal programming: Methodology and applications*. Kluwer Academic
55. Sinha, S. B., & Sastry, S. V. C. (1987). A GOAL PROGRAMMING MODEL FOR FACILITY LOCATION PLANNING. In Plann. Sci (Vol. 21, Issue 4). doi.org/10.1016/0038-0121(87)90030-9.

56. Soyibo, A. (1985). Goal Programming Methods and Applications: A Survey. Journal of Information and Optimization Sciences, 6(3), 247–264. doi: 10.1080/02522667.1985.10698826
57. Uno, T., Katagiri, H., & Kato, K. (2007). A goal programming model for multiobjective facility location problems in a competitive environment. Scientiae Mathematicae Japonicae, 66(3), 349–358. doi.org/10.32219/isms.66.3_349.
58. Tamiz, M., Jones, D. F., & El-Darzi, E. (1995). A review of goal programming and its applications. Annals of Operations Research, 58(1), 39-53. https://doi.org/10.1007/BF02032309
59. Tavakkoli-Moghaddam, R., Siadat, A., & Kaboli, A. (2008, April). A decision framework for location-allocation problems: A case study in tea industry. In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology (ICMIT) (pp. 1061–1065). IEEE.10.1109/ICMIT.2008.4654515.
60. Trivedi, A., & Singh, A. (2017). A hybrid multi-objective decision model for emergency shelter location-relocation projects using fuzzy analytic hierarchy process and goal programming approach. International Journal of Project Management, 35(5), 827–840. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.12.004
61. Werczberger, E. (1976). A goal-programming model for industrial location involving environmental considerations 1 *. In Environment and Planning A (Vol. 8). doi.org/10.1068/a08017.
62. Wichapa, N., & Khokhajaikiat, P. (2017). Solving multi-objective facility location problem using the fuzzy analytical hierarchy process and goal programming: a case study on infectious waste disposal centers. Operations Research Perspectives, 4, 39–48. doi: 10.1016/j.orp.2017.03.002
63. Zanakis, S. H. (1981). A method for large-scale integer goal programming with an application to a facility location/allocation problem. In J. N. Morse (Ed.), Organizations: Multiple Agents with Multiple Criteria (pp. 491–508). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi.org/10.1007/978-3-642-45527-8_38.
64. Zhan, S. L., & Liu, N. (2011). A multi-objective stochastic programming model for emergency logistics based on goal programming. Proceedings - 4th International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, CSO 2011, 640–644. doi: 10.1109/CSO.2011.44

TICMET '25

The 6th International Conference of Materials and Engineering Technology

6. Uluslararası Malzeme ve Mühendislik Teknolojileri Konferansı

TÜBİTAK

PROCEEDING BOOK

6-9 OCTOBER, 2025

GAZİANTEP UNIVERSITY
MÂVERA CONGRESS AND ART CENTER

GAZİANTEP - TÜRKİYE

Konferans Hakkında Detaylı Bilgi | Detailed Information About the Conference : www.ticmet.org