



4th International Conference on Materials Science and Manufacturing

Editor:
Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

PROCEEDINGS

ISBN: 978-625-96918-8-6

29-30
May

2025

Turkey

url: <https://matsciman.com>

4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS SCIENCE AND
MANUFACTURING (ICMSM 2025)

May 29-30, 2025

4. ULUSLARARASI MALZEME BİLİMİ VE İMALAT KONFERANSI
(ICMSM 2025)

29-30 Mayıs 2025

PROCEEDING E-BOOK/ BİLDİRİLER KİTABI

KARAMAN/TÜRKİYE

COPYRIGHT © 2025

BY ASES CONGRESS ORGANIZATION

PUBLISHING COMPANY LIMITED

ALL RIGHTS RESERVED. NO PART OF THIS PUBLICATION MAY BE REPRODUCED, DISTRIBUTED OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, INCLUDING PHOTOCOPYING, RECORDING OR OTHER ELECTRONIC OR MECHANICAL METHODS, WITHOUT THE PRIOR WRITTEN PERMISSION OF THE PUBLISHER, EXCEPTIN THE CASE OF BRIEF QUOTATIONS EMBODIED IN CRITICAL REVIEWS AND CERTAIN OTHER NONCOMMERCIAL USES PERMITTED BY COPYRIGHT LAW. ASES CONGRESS ORGANIZATION PUBLISHING® IT IS RESPONSIBILITY OF THE AUTHOR TO ABIDE BY THE PUBLISHING ETHICS RULES.

ASES PUBLICATIONS – 2025©

23.06.2025

ISBN: 978-625-96918-8-6

ICMSM 2025

4th International Conference on Materials Science and Manufacturing

May 29-30, 2025

Online-Live

<https://matsciman.com>

This conference proceedings book is published as an electronic format as e-book.

Tüm Hakları Saklıdır / All Rights Reserved.

* Bu kitapta yazılı olan her türlü bilgi ve yorumun sorumluluğu yazara aittir/ The responsibility for any information and comments written in this book belongs to the authors. It may not be copied or reproduced without permission.

Mayıs, 2025/ May, 2025



4th International Conference on Materials Science and Manufacturing

4th International Conference on Materials Science and Manufacturing (ICMSM 2025), will be held in Turkey during May 29-30, 2025 in online VIRTUAL format.

Conference Topics

- Additive manufacturing
- Biomaterials
- Casting
- Coating
- Composite materials
- Functional materials
- Forming
- Joining
- Labeling and painting
- Manufacturing
- Materials properties
- Materials science and engineering
- Machining
- Mechatronics
- Moulding
- Nano-materials
- New materials
- Shaping processes
- Surface treatment
- Smart materials
- Polymers
- Powder metallurgy
- Production
- Rapid prototyping
- Welding



Important Dates

Abstract Submission Deadline	May 15, 2025
Full Paper Submission Deadline	May 25, 2025
Registration Deadline	May 20, 2025
Conference Date	May 29-30, 2025



Language: Turkish and English

Conference Website
<https://matsciman.com>



ASES
ACADEMY OF SCIENTIFIC AND
EDUCATIONAL STUDIES



General Information

Genel Bilgi

ICMSM 2025

4th International Conference on Materials Science and Manufacturing

May 29-30, 2025

Online-Live

<https://matsciman.com>

Zoom Meeting Information

Please click on the zoom link provided for each session below or the link located in the each session on the program to attend the session of your choice. The Zoom application is free and no need to create an account. Any session can be joined without a password. Meeting passcode will be encrypted and included in the invite link to allow participants to join with just one click without having to enter the passcode. Speakers must be connected to the session 10 minutes before the presentation time.

Technical Information

- Make sure your computer has a microphone and is working.
- You should be able to use screen sharing feature in Zoom.
- Attendance certificates will be sent to you as PDF at the end of the congress.
- Moderator is responsible for the presentation and scientific discussion (question-answer) section of the session.
- Before you login to Zoom please indicate your name surname
exp. NAME SURNAME

Zoom Toplantı Bilgileri

İstediğiniz oturuma katılmak için lütfen aşağıda her oturum için verilen Zoom bağlantısına veya programdaki her oturumda yer alan bağlantıya tıklayın. Zoom uygulaması ücretsizdir ve hesap oluşturmanıza gerek yoktur. Herhangi bir oturuma şifre gerekmeden katılabilirsiniz. Toplantı şifresi şifrelenecek ve katılımcıların şifreyi girmeye gerek kalmadan tek tıklamayla toplantıya katılmasına olanak sağlamak için davet bağlantısına eklenecek. Konuşmacıların sunum saatinden 10 dakika önce oturuma bağlanması gerekmektedir. Tüm kongre katılımcıları canlı bağlanarak tüm oturumları dinleyebilir.

Teknik Bilgiler

- Bilgisayarınızda mikrofon olduğuna ve çalıştığına emin olun.
- Zoom'da ekran paylaşma özelliğine kullanabilmelisiniz.
- Katılım belgeleri kongre sonunda tarafınıza PDF olarak gönderilecektir.
- Moderatör - oturumdaki sunum ve bilimsel tartışma (soru-cevap) kısmından sorumludur.
- Zoom'a giriş yapmadan önce lütfen adınızı soyadınızı belirtiniz. Örnek: AD SOYAD

Communication

İletişim

Principal Contact

E-mail: kongre@matsciman.com

Web page: <https://matsciman.com>



4th International Conference on Materials Science and Manufacturing
May 29-30, 2025-Turkey

ICMSM 2025

4th International Conference on Materials Science and Manufacturing

May 29-30, 2025

Online-Live

<https://matsciman.com>

Moderating a Session

We appreciate all of the moderators' contributions to the conference. The moderators are expected to assist us in the smooth functioning of the conference.

- ❖ Please keep in mind that each presenter has a total of 20 minutes. It's important to have perfect timing.
- ❖ The moderator decides whether to take questions from the audience: at the end of each presentation or at the end of the session.
- ❖ Please remind attendees to send their questions and comments to the Zoom chat.
- ❖ Finally, if any of the presenters in your session does not participate and present her/his paper, please notify us by sending an email to kongre@matsciman.com.

Presentation Information

Each presentation has a **total time limit of 20 minutes**: 15 minutes for the presentation + 5 minutes for questions & answers. The moderator has the authority to rearrange the presentation order in the session. Please arrive at least 5 minutes prior to the start of your session and turn on your camera during your presentation. Please keep in mind that each presenter is required to remain for the duration of the session.



4th International Conference on Materials Science and Manufacturing
May 29-30, 2025-Turkey

ICMSM 2025

4th International Conference on Materials Science and Manufacturing

May 29-30, 2025 Online-Live

<https://matsciman.com>

Committees

Komiteler

Organizing Committee

- Aamer Sharif, Ph.D, Cecos University of IT and Emerging Science, Pakistan.
- Daniel Chuchala, Ph.D, Gdansk University of Technology Poland.
- Ekrem Oezkaya, Ph.D, Institute of Machining Technology, TU Dortmund, Germany.
- Eva Schmidova, Ph.D, University of Pardubice, Czech Republic.
- Fuat Kara, Ph.D, Düzce University, Türkiye.
- Gururaj Bolar, Ph.D, Manipal Academy of Higher Education, India.
- Khaled Giasin, Ph.D, University of Portsmouth, United Kingdom.
- Muhammad Faisal, PhD. Allama Iqbal Open University, Pakistan
- Uğur Köklü, Ph.D, Karamanoğlu Mehmetbey University, Turkey (Conference Chairman)

Science Committee

- A.Tamilarasan, PhD. Er.Perumal Manimekalai Engineering College, India.
- Engin Kocaman, PhD. Zonguldak Bulent Ecevit University, Turkey.
- Erkin Akdoğan, PhD, Karamanoğlu Mehmetbey University, Turkey.
- Grzegorz M. Królczyk, PhD, Opole University of Technology, Poland.
- Hüsni Gerengi, PhD, Duzce University, Turkey.
- Ionut Cristian SCURTU, PhD. Eng., Naval Academy Constanta Romania
- Levent Urtekin, PhD, Kırşehir Ahi Evran University, Turkey.
- LokeshK Sri Ramamurth, PhD, Srinivas Institute of Technology, India.
- Mahmoud Khedr, PhD, Benha University, Egypt.
- Mitsuo Niinomi, PhD, Tohoku University, Japan.
- Mohamed A. Eltaher, PhD. King Abdulaziz University, Saudi Arabia.
- Muhammad Faisal, PhD. Allama Iqbal Open University, Pakistan
- Muhammad Pervej Jahan, PhD. Miami University, United States
- Murat Sarıkaya, PhD, Sinop University, Turkey.
- Mustafa Kuntoğlu, PhD, Selçuk University, Turkey.
- Oğuz Koçar, PhD. Zonguldak Bulent Ecevit University, Turkey.
- Shujian Li, PhD, Hunan University of Science and Technology, China.
- Şakir Yazman, PhD, Selçuk University, Turkey.

*Listed alphabetical order by name



4rd International Conference on Materials Science and Manufacturing
May 29-30, 2025-Turkey

From the President of the Conference,

Greetings to all participants,

It is a great pleasure for me to welcome you to the 4th International Conference on Materials Science and Manufacturing (ICMSM) 2025 Conference.

We hope that this conference will create a friendly occasion for all to share perspectives and research findings from a wide variety of all engineering. We also dearly value possible friendships and partnerships made and insights gained at the conference and hope they will go beyond your participation in the conference, leading to better understanding and appreciation of our profession from an international stance.

With very best wishes,

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

President of ICMSM 2025

Açılış Konuşması

Değerli katılımcılar Uluslararası Malzeme Bilimi ve İmalat konferans başkanı olarak sizleri en kalbi duygularımla selamlıyorum ve konferansımıza hoş geldiniz diyorum. Değerli katılımcılar davetimizi dikkate alarak Uluslararası Malzeme Bilimi ve İmalat Konferansına bildiri ile katılım sağladığınız için çok teşekkür ederiz. Uluslararası Malzeme Bilimi ve İmalat Konferansı çevrimiçi olarak gerçekleştirilecektir. Konferans, malzeme bilimi ve imalat alanındaki teknolojik gelişmeleri ve araştırma sonuçlarını sunmak ve paylaşmak için uluslararası bir platform görevi görecektir. Sanal ortamda dahi olsa sizleri ağırlamaktan ve bilgi paylaşımından dolayı çok mutlu oluyoruz. Umut ediyoruz ki sizlerle verimli ve unutulmaz bir konferans yaşayacağız. Konferansta toplam 10 bildiri sunulacaktır. Türkiye, İtalya ve İrlanda'dan bilim insanlarının yer aldığı bildiriler sunulacaktır. Konferansımızda hem endüstriden hem de akademik camiadan bildiriler bulunmaktadır. Umut ediyorum ki arzulanan Üniversite ile endüstri bir araya gelerek çok başarılı çalışmalar yapılacaktır. Konferansta 2 oturum olacaktır. Bir sonraki konferansta görüşmek temennisiyle

Konferansımıza katıldığınız için tekrar teşekkür ederim.

Saygılarımla

Programme

Program

Thursday, May 29, 2025 Time zone in Turkey (UTC+3) 29 Mayıs Perşembe	
Meeting ID: 269 738 6033 Password: 1234abc https://us06web.zoom.us/j/2697386033?pwd=GSGtfqto16NKItSjCjXR5VFb1hapRx.1&omn=85620543215 Click to connect/bağlanmak için tıklayınız	
10:00-10:20 AM	Invited Speaker Dr. Jia Ge University College Dublin, Ireland Machining of carbon fibre reinforced thermoplastic (CFRTP) composite: from damage mechanisms to process optimization
Session 1	(10:20-11:40 AM) Session Chair: Dr. Jia Ge
10:20-10:40 AM	Data-Driven Welding Quality Assessment: Leveraging IoT and Machine Learning in Industrial Practice <i>Nicola Magaletti, Valeria Notarnicola, Mauro di Molfetta, Stefano Mariani, Angelo Leogrande</i>
Session 2	(10:40-13:20 PM) Session Chair: Dr. Erkin Akdoğan
10:40-11:00 AM	Investigation of the Effect of Cryogenic Treatment on the Hardness Impact Performance of CPR Tool Steel <i>İbrahim Sarıkaya, Fuat Kara</i>
11:00-11:20 AM	Polimer-Nano Kompozitlerinin Çimento Öğütme Yardımcısı Olarak Kullanılması <i>Sonnur Gökçe, Ferda Eser</i>
11:20-11:40 AM	Parçalı Kalıp Sistematiği İle Kalıp İçerisinde Altı Köşe SW22 Formunun Simülasyon Destekli Tasarım Doğrulaması <i>Furkan BELLİBAŞ, Cihan Ali Bahar, Metehan Kayretli, Burak Gülmez</i>
11:40-12:00 PM	Perlit/Epdm Kauçukların Özelliklerinin Değerlendirilmesi <i>Ali Öteleş, İlker Köprü, Salih Hakan Yetgin</i>
12:00-12:20 PM	Molibden Disülfid (Mos2) Katkılı Etilen-Propilen-Dien-Monomer (Epdm) Kauçukların Özelliklerinin İncelenmesi <i>Çağrı Çokaçar, İlker Köprü, Salih Hakan Yetgin</i>
12:20-12:40 PM	Kıkırdak Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin Go Katkılı Pcl İskelelerin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu <i>Alpay Köse, Cem Bülent Üstündağ</i>
12:40-13:00 PM	Fındık Kabuğu Katkılı PLA Kompozit Filamentle Üretilen 3B Parçaların Dayanım Performansı Ve Üretim Parametrelerinin Değerlendirilmesi <i>Fatih Cem Albayrak, Menderes Kam, Ömer Şengül</i>
13:00-13:20 PM	Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen cam ve karbon elyaf takviyeli poliamit kompozitlerin araştırılması <i>Mevlüt Ayran</i>

PROCEEDINGS / BİLDİRİLER

FULL TEXT PRESENTATION / TAM METİN SUNUMLAR

Data-Driven Welding Quality Assessment: Leveraging IoT and Machine Learning in Industrial Practice

Nicola Magaletti, LUM Enterprise s.r.l., Casamassima, Italy, magaletti@lumenterprise.it
Valeria Notarnicola, LUM Enterprise s.r.l., Casamassima, Italy, notarnicola@lumenterprise.it
Mauro di Molfetta, LUM Enterprise s.r.l., Casamassima, Italy, dimolfetta@lumenterprise.it
Stefano Mariani, LUM Enterprise s.r.l., Casamassima, Italy, ste.mariani.23@gmail.com
Angelo Leogrande, LUM Enterprise s.r.l., Casamassima, Italy, leogrande.culture@lum.it

This study explores the application of data analytics and machine learning to optimize welding quality in *Tecnomulipast srl*, a small-to-medium manufacturing enterprise based in Gravina in Puglia, Italy. Specializing in food machinery, the company recently automated its laser welding process using an IoT-enabled system with integrated photographic inspection. The investment, supported by the Apulia Region through the PIA (Programmi Integrati di Agevolazione), enabled Tecnomulipast not only to upgrade its production line but also to undertake a broader digital transformation. This included the development of internal data analytics infrastructures capable of supporting advanced machine learning and artificial intelligence applications. The study focuses on predicting weld bead width (LC), a key quality metric, using a dataset of 1,000 production observations. Input features include laser power (PL), pulse duration (DI), frequency (FI), beam diameter (DF), focal position (PF), travel speed (VE), trajectory accuracy (TR), laser angle (AN), gas flow (FG), gas purity (PG), ambient temperature (TE), and penetration depth (PE). These parameters were used to train and validate several supervised machine learning models such as Decision Trees, Random Forest, K-Nearest Neighbors, Support Vector Machines, Neural Networks, Boosting techniques, and Linear Regression. Model performance was assessed through MSE, RMSE, MAE, MAPE, and R^2 metrics. Ensemble methods like Random Forest and Boosting achieved the best results. Feature importance analysis identified laser power, gas flow, and trajectory accuracy as the most influential variables. The project demonstrates how Tecnomulipast has successfully leveraged public investment to implement digital transformation and adopt data-driven approaches aligned with Industry 4.0.

Keywords: Tecnomulipast, laser welding, machine learning, digital transformation, Industry 4.0.

1. Introduction

The increasing adoption of artificial intelligence and data analytics within production operations represents a paradigm shift for how production efficiency and quality are tracked and optimized. Although big industries have driven such developments, their application within small-to-medium enterprises (SMEs) of traditional industries like food machinery production is sparse and underresearched. This research bridges that gap by examining how a Southern Italian SME, Tecnomulipast srl, adopted a data-driven approach for predicting and controlling weld quality within an IoT-enabled laser welding machine. The main research

question for this research is: To what extent can machine learning models effectively predict weld bead width (LC) as an essential quality metric from real-time process information observed from a digitally transformed welding machine? Despite the proliferation of sensor-rich production environments, extant research is of little help for SMEs that seek to effectively apply machine learning models for real-time quality prediction, especially for highly specialized processes such as laser welding. Most research tends to target big-industry implementation or is restricted within lab-scale experiments. This research offers a new case study of a regionally funded innovation project (via the Apulia Region's PIA program) where a full-scale machine learning infrastructure was implemented and validated using 1,000 production samples. By comparing multiple supervised algorithms and selecting the best performing predictor, this research offers actionable findings into how SMEs can converge with Industry 4.0 values through extensive, interpretable, as well as scalable, data science techniques.

The article continues as follows, the second section presents the analysis of the literature, the third section presents the data and the variables, the fourth section contains the results of the machine learning regressions, the fifth section shows the results of the network analysis, the sixth section contains the conclusions.

2. Literature Review

The following commentary critically examines how recent research in the machine learning and laser welding fields supports and enlightens the Tecnomulipast srl, a small and medium-sized enterprise (SME) located within the region of Apulia, Southern Italy. Tecnomulipast is part of a digital transformation process, investing in the deployment of an automated laser welding system fed by an IoT solution and analytics infrastructure. The chosen articles are theoretically and practically relevant to the challenges and opportunities of the company as aligned with Industry 4.0 philosophies. The research by Wang et al. (2025) lays a solid groundwork by responding to issues of machine learning model generalizability in intelligent welding systems production within automotive production. Their concern for domain adaptation as well as transferability is of specific relevance for Tecnomulipast, an SME, as it, as many SMEs, will have to adapt advanced algorithms to its unique production process, frequently from less of both the necessary data as well as resources compared to large multinational companies. Their multi-sensor data utilization as well as their concern for robustness is closely aligned with the company's approach of adopting an interconnected, sensor-intensive welding environment.

Ma et al. (2025) make a contribution by using an innovative hybrid strategy that integrates a Kolmogorov-Arnold Network (KAN) with a genetic algorithm for deep penetration laser welding optimization. Their two-layer approach is a balance between prediction accuracy and interpretability—two considerations fundamental for industrial environments where technicians need to trust as well as comprehend the judgments made by artificial intelligent systems. For Tecnomulipast, the use of interpretable models is essential given the low density of internal data science capabilities, as well as the necessity for actionable, transparent outputs from artificial intelligent systems.

The paper by Poornima et al. (2024) proposes a hybrid DNN-HEVA model for weld quality prediction of duplex stainless steel butt welds. Although specific to one material, the approach—merging deep learning with geometric analysis—is extensible to other applications, including Tecnomulipast production processes. Application of techniques for shape-aware modeling is of particular significance for their vision-based inspection system, given the prevalence of weld bead and joint geometrical information for quality evaluation. Din et al. (2024) break new ground for visual quality inspection by utilizing Vision Transformers for laser welding image classification. Their multi-model feature aggregation approach presents a direction for Tecnomulipast's photographic process control, as it already samples images during welding processes. The attention mechanism of the transformer could prove crucial for enhancing defect identification, particularly for detecting subtle visual abnormalities that might be overlooked by standard CNNs.

In an applied context, Maculotti et al. (2024) provide a comparison of machine learning models for optimizing laser welding of deep-drawing steel. Their benchmarking strategy is directly applicable to Tecnomulipast's project, wherein several supervised learning models (such as Random Forest, SVM, Neural Networks) were compared. The research highlights trade-offs between model interpretability, performance, and computational cost—considerations critical for SMEs balancing innovation with efficiency of operation. Hartung et al. (2023) provide a machine learning approach for weld geometric reconstruction as part of the overall vision for automation of quality control. Their research can be leveraged further for further development at Tecnomulipast, wherein inline inspection is envisioned as part of the digital transformation journey. Reconstructing weld geometry through sensor readings and regression models is a compelling option for minimizing reliance on human observation and enhancing consistency.

Ying-chao et al. (2023) concentrate on real-time monitoring through emission spectroscopy in laser wire welding. Since Tecnomulipast is not as of yet utilizing spectroscopic techniques, the essential principle—multiple-sensor, real-time weld pool monitoring—is very much relevant. Their research supports the necessity of multistreaming as a means of process control as well as detecting anomalies, consistent with Tecnomulipast's IoT-capable arrangement. Chianese et al. (2022) examine the application of photodiodes for weld gap and penetration depth sensing of welding between copper and steel, especially for the welding of battery tabs. Their application of low-cost, high-frequency sensors could motivate cost-effective sensor integration by Tecnomulipast, most notably for real-time weld penetration sensing without the introduction of high-end vision systems.

Earlier, Cai et al. (2019) had shown how high-speed imaging and machine learning could be used for predicting weld bead width. Their findings confirmed the value of temporal imaging and algorithmic comparison, as exemplified by Tecnomulipast's approach of using photographic information to predict quality factors such as bead width and penetration. Practical deployment of predictive models from image information is one of the key innovations of the Tecnomulipast project. Ozkat et al. (2017) and Sokolov et al. (2020) offer insights from the viewpoint of physics-based, as well as hybrid modeling. Ozkat's multi-physics decoupling addresses variability caused by gaps between parts, while Sokolov's research on keyhole mapping using optical coherence tomography underpins closed-loop control. Although such methods are complex and appropriate for higher-end manufacturing,

they represent longer-term innovation pathways that Tecnomulipast could pursue as its system develops further and its digital infrastructure becomes established.

These articles demonstrate the international trend toward machine learning- and IoT-driven smart manufacturing systems. They endorse the notion that integrating data-driven models, interpretable artificial intelligence, real-time sensor input, and visual monitoring can make laser welding processes more adaptable and efficient. For Tecnomulipast srl, they provide both motivation and backing. This company, a small enterprise implementing digital transformation through support from its region of origin (PIA - Regione of Apulia, Italy), is a demonstration that even SMEs can be front-runners in implementing intelligent, data-driven technologies for optimizing production. By aligning its initiatives with the techniques and tenets examined within this advanced study, Tecnomulipast is an example for other small businesses within its region wishing to adopt Industry 4.0 technologies. The intersection of machine learning, autonomous inspection, and digital networking is not only a powerful tool for quality improvement, but for the larger sustainability and competitiveness of small manufacturers within the changing global industrial context.

Macro-theme	Reference	Key Contribution	Relevance to Tecnomulipast
Generalizable & Scalable ML for Welding	Wang et al. (2025)	Generalizable ML framework for intelligent welding in automotive contexts	Supports the transfer of scalable ML models to SME-level environments like Tecnomulipast's real-world setup
	Maculotti et al. (2024)	Comparison of ML algorithms for laser welding optimization	Helps choose the most efficient and interpretable algorithm given SME constraints and real production data
Interpretable & Hybrid AI Models	Ma et al. (2025)	Interpretable Kolmogorov-Arnold Network with genetic optimization	Offers a transparent model for parameter tuning, suitable for a resource-limited SME
	Poornima et al. (2024)	Hybrid DNN-HEVA model for weld quality prediction	Shows the benefit of combining geometry-aware models with AI, useful in Tecnomulipast's photo-based inspections
Image-Based Monitoring & Vision AI	Din et al. (2024)	Vision Transformer with feature aggregation for weld image classification	Directly relevant to Tecnomulipast's photographic system for monitoring welds in real time
	Cai et al. (2019)	Prediction of weld bead width from high-speed images using various ML algorithms	Validates the image-based predictive approach used by Tecnomulipast
Inline Quality Control & Process Monitoring	Hartung et al. (2023)	Geometry reconstruction using ML for automated weld quality control	Useful for extending Tecnomulipast's inspection system with automated defect detection
	Ying-chao et al. (2023)	Real-time monitoring via emission spectra in laser wire welding	Reinforces the importance of continuous monitoring, even if different sensing tech is used
	Chianese et al. (2022)	Photodiode-based gap and penetration monitoring in dissimilar metal welding	Suggests low-cost sensor strategies for penetration monitoring applicable to SMEs
Process Control & Closed-Loop Systems	Sokolov et al. (2020)	Optical coherence tomography for closed-loop penetration control	Presents a future direction for Tecnomulipast's system evolution towards real-time adaptive control
	Ozkat et al. (2017)	Multi-physics simulation accounting for part-to-part gap in laser welding	Supports hybrid modeling to complement ML, useful for better understanding material-behavior interaction

3. Data and variables

The variables employed for training machine learning models for the prediction of production efficiency of a laser machine within a production firm consist of a mixture of process variables, environmental variables, and quality metrics. The product identifier (PRD2T) provides a distinct reference for each of the produced items, making it possible for them to be

traced through the observations. Laser power (PL), pulse duration (DI), and pulse frequency (FI) determine the essential energy and temporal laser welding process specifications, which directly impact thermal input as well as welding stability. Beam diameter (DF) and focal position (PF) capture spatial accuracy as well as energy concentration on the target material, relevant for the stability of consistent weld penetration. The travel speed (VE) captures the speed of laser movement, impacting productivity as well as thermal diffusion. Trajectory and repeatability (TR) capture the mechanical accuracy of the machine, one of the most critical indicators of uniform weld paths as well as minimizing defects. The laser incident angle (AN) impacts energy absorption as well as weld geometry, of higher significance for reflective or complex materials. Gas flow (FG) and gas purity (PG) capture the weld pool shielding conditions, critical for preventing contamination as well as porosity. Ambient temperature (TE) captures context for thermal fluctuations that could affect stability of process. And finally, penetration depth (PE) as well as bead width (LC) are direct quality indicators of the weld as well as can be employed as target variables as well as efficiency as well as consistency proxies within supervised learning models that can predict the efficiency as well as uniformity of the laser machine (Table 1).

Table 1. Description of Variables.

	Description	Unit of measurement and range	Acronym
Product	Unique identifier for each product produced.	It is represented with a progressive number.	PRD2T
Laser power (W)	Energy supplied by the laser to perform the welding.	Expressed in Watts (W). Usually variable between 1500 W and 1800 W.	PL
Pulse duration (ms)	Time during which the laser remains active for each pulse.	Expressed in milliseconds (ms). Variable between 5 and 8 ms.	DI
Pulse frequency (Hz)	Number of laser pulses per second.	Expressed in Hertz (Hz). Typically variable between 2000 and 2300 Hz.	FI
Beam diameter (μm)	Width of the laser beam at the welding point.	Expressed in microns (μm). Typically between 100 and 130 μm.	DF
Focal position (mm)	Focal distance from the material surface.	Expressed in millimeters (mm). Varies between - 0.5 mm, 0 mm, +0.5 mm, 1 mm.	PF
Travel speed (mm/s)	Speed with which the laser moves during the welding process.	Expressed in mm/s. Varies between 10 and 13 mm/s.	VE
Trajectory and repeatability	Accuracy and repeatability of the laser movement system.	Typical values: < ±0.1 mm, < ±0.15 mm, < ±0.2 mm, < ±0.25 mm.	TR
Laser incidence angle (°)	Angle formed by the laser beam from the material surface.	Typical values: 75°, 80°, 85°, 90°.	AN
Gas flow	Type of gas used to protect the welding pool and keep it pure.	Expressed in l/min for flow	FG
Gas purity	Type of gas used to protect the welding pool and keep it pure.	% for purity.	PG
Ambient temperature (°C)	Temperature of the environment in which the welding is performed.	Variable between 25°C and 28°C.	TE
Penetration (mm)	Depth of the welding in the material.	Expressed in mm. Typically between 1.5 mm and	PE

		3.5 mm.	
Bead width (μm)	Width of the welding line generated by the laser.	Expressed in microns (μm). Typically between 200 μm and 500 μm.	LC

The information pertains to a company whose welding process is automated by a machine fitted with IoT as well as photographic inspection technologies. All variables have 1000 valid values with no missing values. Values seem normalized with z-score standardization, as evidenced by means near zero and standard deviations near one, making them ready for higher-level statistical analysis or machine learning applications. Both process parameters (laser power, pulse length, frequency, speed, beam width, focal position) as well as output characteristics (bead width, penetration) are the main variables. Their distributions have mild asymmetry and platykurtic behavior, with flatter distribution compared to a normal distribution. This is supported by consistently negative kurtosis values as well as by the Shapiro-Wilk test, whose p-values are lower than 0.001 for all variables, rejecting the normality hypothesis. The most relevant output variables, bead width (LC) and penetration (PE), have negative skewness, meaning that the data have heavier tails on the left side of the distribution and that welds most often have values higher than the mean, although by a minor amount. The machine would seem to have good operating stability, as interquartile ranges are thin, and median absolute deviations are low for all variables, meaning there is little dispersion. Since the non-normal distribution of the data, however, could make classical linear models insufficient for identifying underlying patterns, robust or non-parametric statistical analysis could be needed. Gas-related variables such as gas flow (FG) and gas purity (PG) have higher skewness and modes, perhaps as a consequence of batch variation, as well as of the application of different shielding strategies for different welding contexts. In summary, the data represent a technologically mature, well-maintained system, whose well-regulated parameters, however, have usual variation typical of industrial automation processes (Table 2).

Table 2. Descriptive Statistics.

	LC	DI	FI	VE	AN	TE	PL	DF	PF	TR	FG	PG	PE
Valid	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Missing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mode	0.731	0.610	-1.607	0.283	-1.315	1.343	1.164	-0.839	1.145	1.096	-1.646	1.192	-1.326
Median	0.277	0.011	-0.039	0.014	-0.010	-0.010	0.057	-0.024	0.278	0.190	-0.099	0.318	0.267
Mean	- 7.000× 10 ⁻⁹	1.000× 10 ⁻⁹	1.400× 10 ⁻⁸	3.000× 10 ⁻⁹	5.000× 10 ⁻⁹	- 2.100× 10 ⁻⁸	2.600× 10 ⁻⁸	6.000× 10 ⁻⁹	1.050× 10 ⁻⁷	7.800× 10 ⁻⁸	- 3.189×1 0 ⁻¹⁸	3.900× 10 ⁻⁸	6.000× 10 ⁻⁹
Std. Deviation	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001
Coefficient of variation	- 1.429× 10 ⁺⁸	1.001× 10 ⁺⁹	7.146× 10 ⁺⁷	3.335× 10 ⁺⁸	2.001× 10 ⁺⁸	- 4.764× 10 ⁺⁷	3.848× 10 ⁺⁷	1.668× 10 ⁺⁸	9.529× 10 ⁺⁶	1.283× 10 ⁺⁷	- 3.138×1 0 ⁺¹⁷	2.565× 10 ⁺⁷	1.668× 10 ⁺⁸
MAD	0.686	0.876	0.871	0.841	0.967	0.861	1.010	0.863	0.867	0.905	0.927	0.829	0.734
MAD robust	1.017	1.298	1.291	1.247	1.434	1.277	1.498	1.280	1.286	1.342	1.375	1.229	1.089
IQR	2.068	1.751	1.758	1.683	1.934	1.699	2.008	1.728	2.169	2.112	1.855	1.883	1.995
Variance	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001

Skewness	-0.380	0.003	0.076	0.011	0.019	-0.033	0.001	9.900×10 ⁻⁴	-0.211	-0.148	0.001	-0.280	-0.353
Std. Error of Skewness	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
Kurtosis	-1.473	-1.221	-1.188	-1.170	-1.510	-1.198	-1.931	-1.222	-1.473	-1.651	-1.580	-1.471	-1.392
Std. Error of Kurtosis	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155
Shapiro-Wilk	0.856	0.953	0.953	0.957	0.913	0.954	0.749	0.954	0.854	0.811	0.895	0.880	0.894
P-value of Shapiro-Wilk	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001	< .001
Range	3.173	3.456	3.426	3.494	3.675	3.482	2.330	4.474	2.602	2.414	3.431	3.514	3.734
Minimum	-1.838	-1.717	-1.687	-1.739	-1.886	-1.755	-1.166	-2.257	-1.457	-1.318	-1.646	-2.322	-2.085
Maximum	1.335	1.739	1.739	1.755	1.789	1.727	1.164	2.216	1.145	1.096	1.786	1.192	1.649
25th percentile	-1.169	-0.876	-0.884	-0.850	-0.964	-0.825	-1.004	-0.875	-1.024	-1.017	-0.925	-0.936	-1.105
50th percentile	0.277	0.011	-0.039	0.014	-0.010	-0.010	0.057	-0.024	0.278	0.190	-0.099	0.318	0.267
75th percentile	0.899	0.875	0.874	0.832	0.970	0.874	1.004	0.853	1.145	1.096	0.930	0.947	0.889
25th percentile	-1.169	-0.876	-0.884	-0.850	-0.964	-0.825	-1.004	-0.875	-1.024	-1.017	-0.925	-0.936	-1.105
50th percentile	0.277	0.011	-0.039	0.014	-0.010	-0.010	0.057	-0.024	0.278	0.190	-0.099	0.318	0.267
75th percentile	0.899	0.875	0.874	0.832	0.970	0.874	1.004	0.853	1.145	1.096	0.930	0.947	0.889
Sum	-7.000×10 ⁻⁶	1.000×10 ⁻⁶	1.400×10 ⁻⁵	3.000×10 ⁻⁶	5.000×10 ⁻⁶	-2.100×10 ⁻⁵	2.600×10 ⁻⁵	6.000×10 ⁻⁶	1.050×10 ⁻⁴	7.800×10 ⁻⁵	-1.665×10 ⁻¹⁵	3.900×10 ⁻⁵	6.000×10 ⁻⁶

4. Machine Learning

Assessing information on automatic welding within the framework of Industry 4.0 is a strategic action for a small-to-medium company such as Tecnomulipast srl, from Southern Italy operating within the food machinery production industry. IoT technology integration with real-time acquisition systems turns a standard production activity into an intelligent, trackable, and optimizable function. Data analysis from welding enables the company not only to track joint quality with accuracy, minimize process variation, predict anomalies, and enhance overall efficiency, but is critical for raising competitiveness within an industrialized, globalized world. Comparing between machine learning models such as Boosting, Decision Tree, K-Nearest Neighbors, Linear Regression, Neural Networks, Random Forest, Regularized Linear Regression, and Support Vector Machine is of prime relevance as each of the models differs as regards predictive capacity, interpretability, and adaptability to the dataset. Knowing the best-performing algorithm is not only a matter of selecting the best-performing solution, but the one that is stable, efficient, and scalable given available technical and infrastructural capabilities. Technically-scientifically, utilizing the following statistical indicators as evaluation metrics such as MSE (Mean Squared Error), MSE (scaled), RMSE (Root Mean Squared Error), MAE/MAD (Mean Absolute Error / Median Absolute Deviation), MAPE (Mean Absolute Percentage Error), R² (Coefficient of Determination) is methodologically accurate, widely adopted within the industrial data science best practices, and well-accepted within the scientific literature. These metrics enable an integral analysis of model quality by capturing error size (MSE, RMSE), outlier resistance (MAE, MAD), relative

error (MAPE), as well as the capacity of the model for variance explanation of the target factor (R^2). Their joint utilization enables a balanced, objective, reproducible evaluation that is best practice within industrial-grade data science.

We have estimated the following equation:

$$LC = f(PL, DI, FI, DF, PF, VE, TR, AN, FG, PG, TE, PE)$$

Facing the normalized performance measures of the various machine learning models used for the weld bead width (LC) prediction task, Random Forest is the most precision, stable, and generalization-capacity-rich algorithm. It consistently produces the best outcome for virtually all the evaluation metrics. In particular, it captures the lowest achievable values for MSE, MSE (scaled), RMSE, MAE/MAD, and MAPE—reflecting the smallest prediction error—while also capturing the highest value of R^2 (1.000) that guarantees perfect adaptability within the normalized framework. Boosting is likewise a highly performing algorithm, ranking second best by the majority of the metrics through an R^2 value of 0.806 as well as low error values for MSE (0.241), RMSE (0.174), and MAPE (0.116), reflecting high reliability as well as stability. Neural Networks exhibit competitive efficiency through an R^2 value of 0.758 coupled with relatively low values of MSE as well as MAPE, reflecting their suitability as an alternative. Support Vector Machines as well as Regularized Linear Regression prove mediocre efficiency, whereas K-Nearest Neighbors performs with the worst, through an R^2 value of 0.000 alongside the highest errors for all the metrics. The Decision Tree model performs better than KNN but not as efficiently as ensemble-based methods through its lower generalization capacity. To sum up, Random Forest is the best choice for the task through precision, stability, as well as generalization, whereas Boosting offers a strong alternative with equivalent reliability within predictive welding analytics (Table 3).

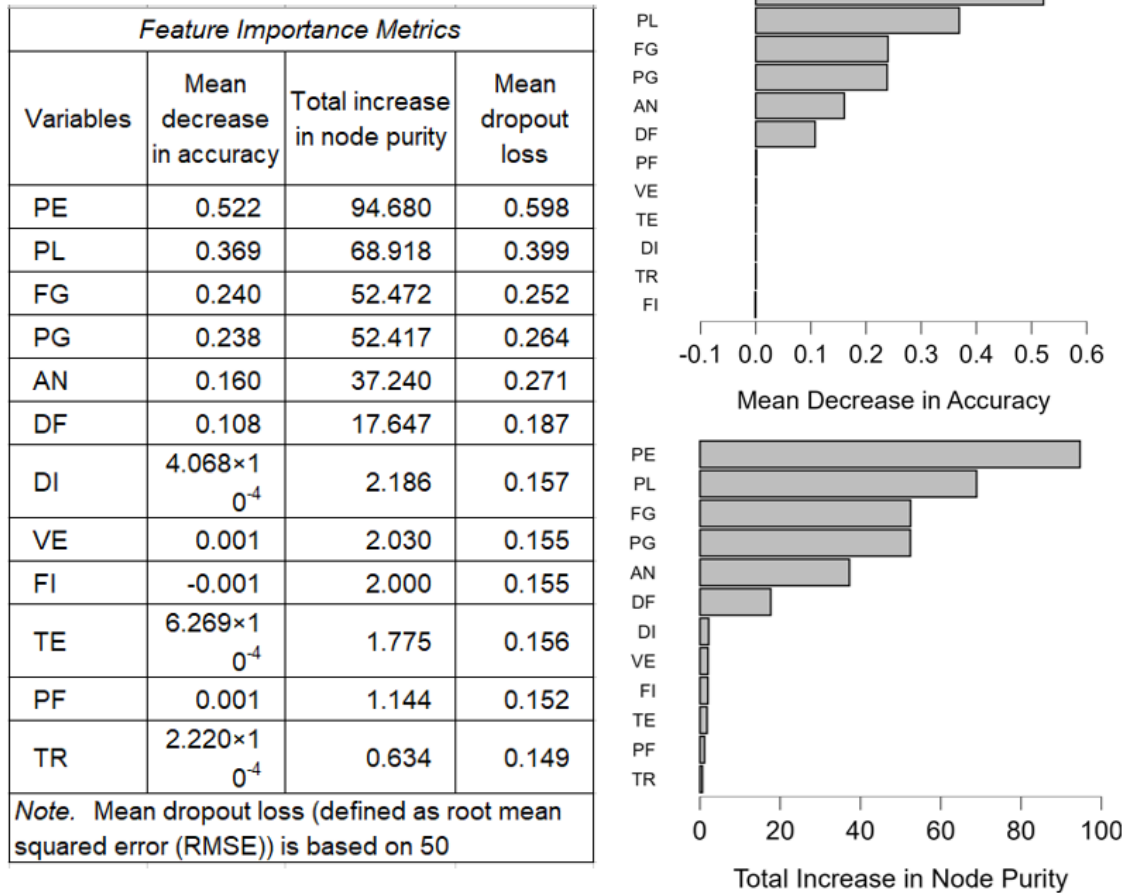
Table 3. Machine learning analysis results with an indication of the performance of the algorithms.

Metric	Boosting	Decision Tree	KNN	Linear Regression	Neural Net	Random Forest	Regularized Linear	SVM
MSE	0.241	0.379	1.000	0.655	0.310	0.000	0.586	0.517
MSE (scaled)	0.179	0.393	1.000	0.393	0.250	0.000	0.536	0.464
RMSE	0.174	0.297	1.000	0.487	0.165	0.000	0.408	0.382
MAE / MAD	0.051	0.000	1.000	0.759	0.228	0.088	0.684	0.620
MAPE	0.116	0.000	1.000	0.312	0.165	0.005	0.803	0.115
R^2	0.806	0.645	0.000	0.516	0.758	1.000	0.452	0.581

Selecting Random Forest as our best-performing model, we can analyze the feature importance values to see how much each of the input variables contributes toward predicting weld bead width (LC) most strongly. The table offers three indicators for each of the variables: Mean decrease in accuracy, Total increase in node purity, and Mean dropout loss. These all measure how much each of the variables contributes toward building the model's predictability. By far the most powerful is clearly PE (penetration depth), with the highest mean decrease in accuracy (0.522), highest increase in node purity (94.680), and highest mean dropout loss (0.598). This is consistent with the expectation that weld penetration is closely correlated with bead width and is a very critical quality determinant of welding in the current scenario. Second is significantly PL (laser power) with a strong decrease in accuracy (0.369), a high node purity (68.918), and a very high dropout loss (0.399). Not unexpectedly, laser power directly controls the energy input during the welding process. Following are FG (gas

flow) and PG (gas purity) with values for all metrics rather near-identical. Both of the parameters are crucial for providing a clean welding environment and for preventing defects, so their influence is not surprising. AN (laser angle) and DF (beam diameter) are moderately important, indicating a secondary but still contributory role toward the quality of the weld. Least of all are DI (pulse duration), VE (travel speed), and FI (pulse frequency). Their very low values for all metrics point toward a minor influence on the output within the specific operating window of this dataset. Least of all is TE (ambient temperature), PF (focal position), and TR (trajectory repeatability). These variables are most likely kept relatively constant during operation, or perhaps have previously had their optimal values optimized, so their variability is minimized, and their statistical impact is low. In conclusion, the Random Forest model singles out the penetration depth, laser power, and gas parameters as the prime drivers of bead width of weld during the automated process of Tecnomulipast srl. These findings not only make sense from the welding physics point of view, but they also offer actionable targets for controlling the process, as well as for optimizing the process, within the context of Industry 4.0 (Figure 1).

Figure 1. Feature Importance Metrics of Random Forest Regression.



The following is an additive feature attribution output for five test cases, as given by the Random Forest model for predicting weld bead width (LC). The values, presumably created by a SHAP or equivalent interpretability procedure, demonstrate the contribution of each attribute, relative to a set value (the "Base" column, constant at -0.045 for all cases).

In both instances, the value predicted is much less than the base, varying between -1.226 and -1.390 . This is a decrease from the base because of the cumulative adverse effects of some of the main features, specifically PE (penetration depth), PL (laser power), FG (gas flow), and PG (gas purity).

PE is consistently the greatest negative contributor in all cases, ranging from -0.38 to -0.384 . This is consistent with what is observed in the feature importance as well: the greatest contribution is by penetration depth, significantly pulling the prediction down.

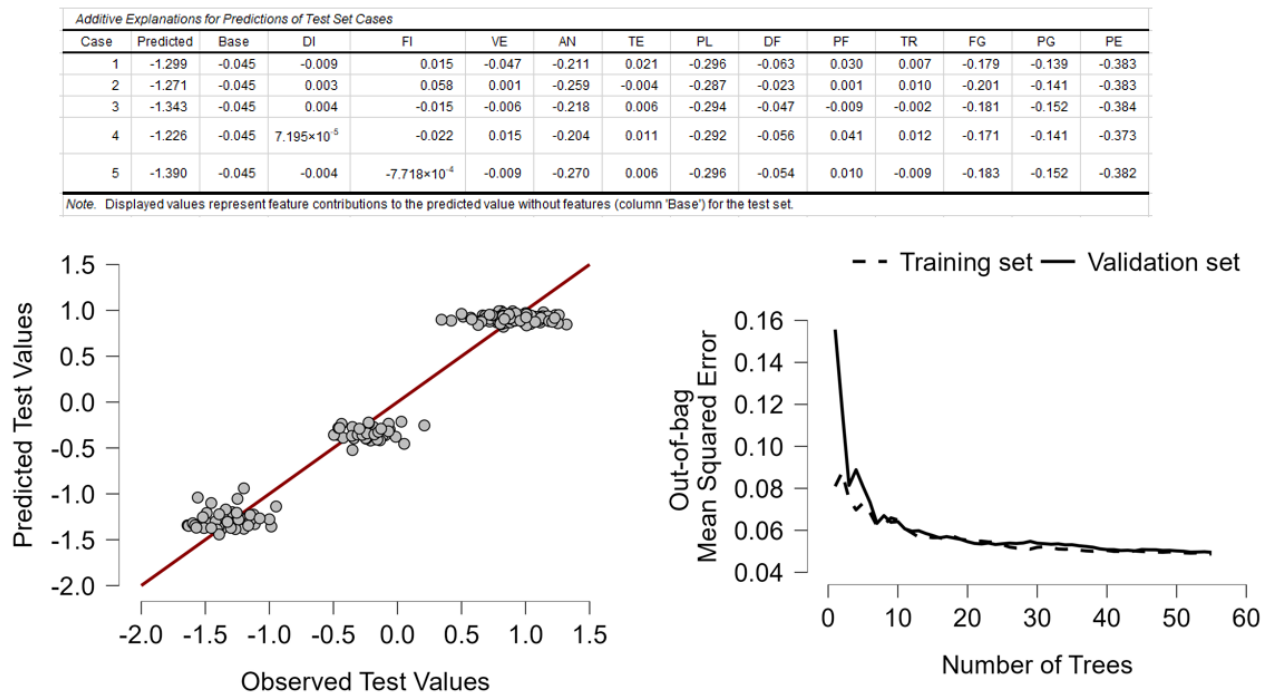
PL is seen to have strong negative effect, from -0.287 to -0.296 . This is consistent with its function of regulating power input—greater power can result in wider bead width, and such deviations from optimal power values would contribute negatively within these given test cases.

FG and PG have strong to moderate negative effects, supporting the significance of gas parameters for weld quality. The steady values for all the cases (approximately between -0.17 and -0.20 for FG, and between -0.13 and -0.15 for PG) demonstrate stable, though considerable, impact on the estimated outcome.

The other variables, such as DF (beam diameter) and AN (angle of incidence), have negative contributions across all instances, though less so. Their directional regularity assures constant though secondary impacts on the model's projections.

In contrast, variables such as VE (speed of travel) and PF (position of focus) display slight positive or zero effects, occasionally helping raise the prediction by a slight amount. FI (pulse frequency), DI (pulse duration), TR (repeatability of trajectory), and TE (ambient temperature) have near-zero or low effects, consistent with their low values of feature importance. In conclusion, such findings uphold interpretability and internal consistency of the Random Forest model. The most salient features—penetration depth, laser power, and gas flow settings—exhibit the highest and most uniform effects on the predictions for varying test cases. This reflects the model's capability for yielding trustworthy, understandable information for quality control of welding for applications such as real-time predictive systems within the context of Industry 4.0 (Figure 2).

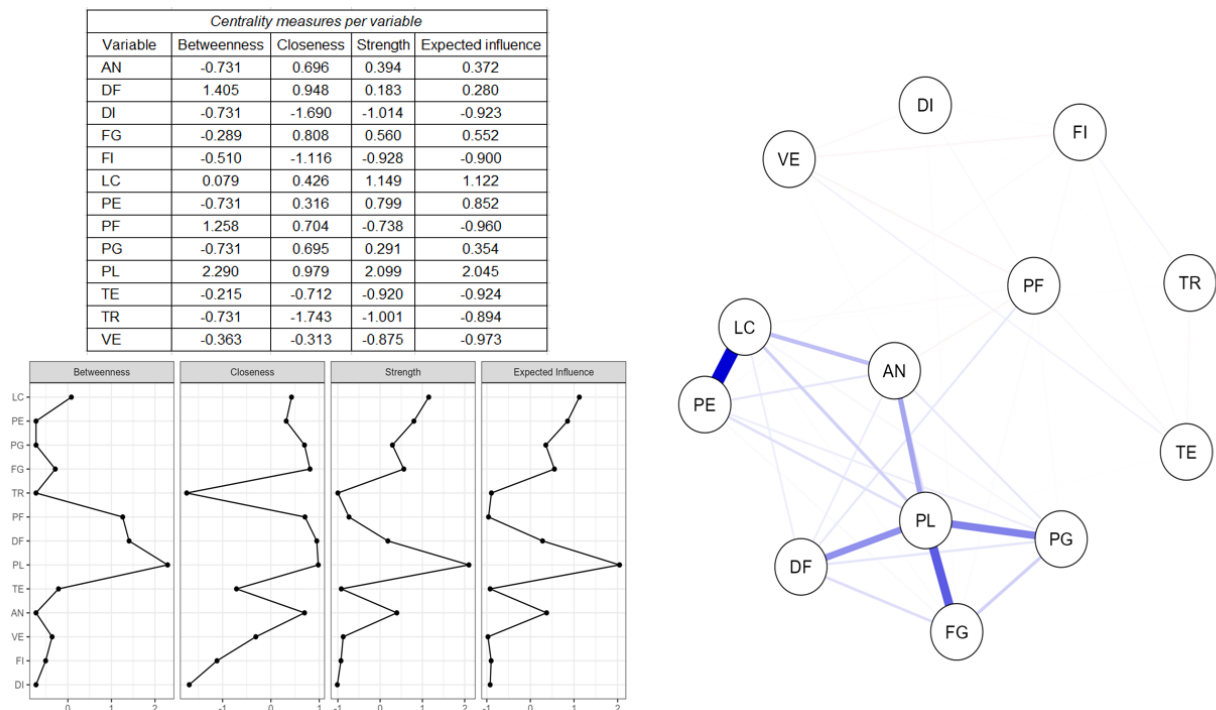
Figure 2. Predictions using Random Forest Regression.



5. Network analysis

After performing a machine learning analysis, it is logical, therefore, to apply network analysis with centrality metrics because machine learning models are good at predicting but do not necessarily capture the internal dynamics of interdependencies among variables. Network analysis offers a structural representation of the relationships, giving further insight into the interplay of variables with each other within the system. By examining centrality metrics like betweenness, closeness, strength, and expected influence, one can determine where variables are central, where they are bridges, and where they are on the periphery. For example, PL (laser power) is ranked highest for all centrality metrics, meaning that it is the most powerful, influencing role within the network of variables. This is as expected given its probable significance within predictive models. DF (beam diameter) and PF (focal position) have significant betweenness, meaning they are connectors between variables, potentially affecting multiple paths even though they are not necessarily the most direct influencers. In contrast, for variables such as DI, FI, and TR, there are negative values for all metrics, suggesting they are not so much central and potentially have isolated effects on the system. Furthermore, network analysis offers the ability to corroborate the machine learning by comparing network metrics with importances from the model, as well as identifying redundant, weakly connected variables, facilitating reduction of dimensions and feature choice. Having the ability to see possible chains of influence among variables improves interpretability of intricate models, such as within industrial environments where behavior of the system is as critical as is predictive accuracy. In all, the combination of network analysis with centrality metrics following machine learning creates a fuller, system-level view that helps interpret models, streamline processes, as well as make informed choices on variable significance as well as role interplay (Figure 3).

Figure 3. Network Analysis.



6. Conclusions

The paper showcases the real-world application value of IoT-enabled data acquisition systems coupled with machine learning methods for improving weld quality prediction for a small-to-medium-sized manufacturing company. In a real-case study of Tecnomulipast srl based in

Gravina in Puglia, supported by public funds through the PIA program, the research showcases how a digitalized production environment can make sophisticated predictive analytics available for laser welding. Among the machine learning algorithms applied, Random Forest was identified as the best-performing algorithm, indicating the best prediction accuracy for all the considered performances (MSE, RMSE, MAE, MAPE, and R^2). The chosen model not only produced low prediction errors, but for detailed interpretability, feature significance analysis as well as additive contribution methods could be employed. Penetration depth (PE), laser power (PL), and gas flow parameters (FG, PG) were recognized as the main factors affecting weld bead width (LC), yielding actionable insights for process improvement as well as quality control.

In addition, the application of network analysis based on centrality indicators provided a complementary view of interdependencies among variables. This methodology disclosed structural interconnections between parameters, corroborating machine learning evidence and allowing for better interpretability of models. Laser power and beam geometry turned out to be central variables within the topology of the system, indicating their decisive impact not only on output quality but on process dynamics as well. Altogether, the research affirms that a union of machine learning with network analysis yields predictive capabilities, as well as systemic insight. For SMEs, looking forward to adapting to Industry 4.0, this dual strategy addresses a scalable, transparent, and efficient framework for optimizing production through data.

7. Acknowledgement

Results obtained in the research and development project "Tecnomulipast" - Codice Pratica 683TK4 - a valere sul Bando Programmi Integrati di Agevolazioni PIA Piccole Imprese (Art 27 Reg. Regionale 17/2014 e smi).

8. References

Wang, P. E., Ghassemi-Armaki, H., Pour, M., Zhao, X., Ma, J., Sattari, K., & Carlson, B. (2025). Applicable and generalizable machine learning for intelligent welding in automotive manufacturing. *Welding in the World*, 1-36.

Ma, S., Leng, J., Chen, Z., Du, Y., Zhang, X., & Liu, Q. (2025). Intrinsically and Post-Hoc Interpretable Kolmogorov-Arnold Network and Genetic Algorithm for Laser Deep Penetration Welding Parameters Optimization. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.

Poornima, C. L., Rao, C. S., & Varma, D. N. (2024). Predicting weld quality in duplex stainless steel butt joints during laser beam welding: a hybrid DNN-HEVA approach. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 23(04), 801-836.

Din, N. U., Zhang, L., Nawaz, M. S., & Yang, Y. (2024). Multi-model feature aggregation for classification of laser welding images with vision transformer. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 36(5), 102049.

- Maculotti, G., Genta, G., & Galetto, M. (2024). Optimisation of laser welding of deep drawing steel for automotive applications by Machine Learning: A comparison of different techniques. *Quality and Reliability Engineering International*, 40(1), 202-219.
- Hartung, J., Jahn, A., & Heizmann, M. (2023). Machine learning based geometry reconstruction for quality control of laser welding processes. *tm-Technisches Messen*, 90(7-8), 512-521.
- Ying-chao, F., Yi-ming, H., Jin-ping, L., Chen-peng, J., Peng, C., Shao-jie, W., ... & Huan-wei, Y. (2023). On-Line Monitoring of Laser Wire Filling Welding Process Based on Emission Spectrum. *SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS*, 43(6), 1927-1935.
- Chianese, G., Franciosa, P., Nolte, J., Ceglarek, D., & Patalano, S. (2022). Characterization of photodiodes for detection of variations in part-to-part gap and weld penetration depth during remote laser welding of copper-to-steel battery tab connectors. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 144(7), 071004.
- Cai, W., Wang, J., Cao, L., Mi, G., Shu, L., Zhou, Q., & Jiang, P. (2019). Predicting the weld width from high-speed successive images of the weld zone using different machine learning algorithms during laser welding. *Math. Biosci. Eng*, 16(5), 5595-5612.
- Ozkat, E. C., Franciosa, P., & Ceglarek, D. (2017). Development of decoupled multi-physics simulation for laser lap welding considering part-to-part gap. *Journal of Laser Applications*, 29(2).
- Sokolov, M., Franciosa, P., Al Botros, R., & Ceglarek, D. (2020). Keyhole mapping to enable closed-loop weld penetration depth control for remote laser welding of aluminum components using optical coherence tomography. *Journal of Laser Applications*, 32(3).

FINDIK KABUĞU TOZU KATKILI PLA KOMPOZİT FİLAMENTLE ÜRETİLEN 3B PARÇALARIN DAYANIM PERFORMANSI VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Fatih Cem ALBAYRAK¹, Menderes KAM², Ömer ŞENGÜL³

¹Düzce Üniversitesi, fatihcemalbayrak@gmail.com

²Düzce Üniversitesi, mendereskam@duzce.edu.tr

³Milli Eğitim Bakanlığı, omersengullll@hotmail.com

Özet

Teknolojinin hızla ilerlemesi ve doğal kaynakların giderek tükenmesi, sürdürülebilir üretim yöntemlerine ve atık malzemelerin etkin şekilde yeniden kullanımına olan ihtiyacı her zamankinden daha önemli hale getirmiştir. Son yıllarda, çevresel etkileri en aza indirirken endüstriyel performans gereksinimlerini karşılayabilen çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir kompozit malzemelerin geliştirilmesine yönelik ilgi artmıştır. Bu ihtiyaç özellikle otomotiv, ulaşım, inşaat ve spor ekipmanları gibi hafif ve dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulan sektörlerde kendini göstermektedir.

Biyolojik olarak parçalanabilir polimerler arasında Polilaktik Asit (PLA), yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi ve kompostlanabilir doğası nedeniyle dikkat çekmektedir. PLA'nın tarımsal atık ürünleriyle, özellikle fındık kabuğu gibi katkı maddeleriyle güçlendirilmesi, hem malzemenin mekanik özelliklerini geliştirme hem de atıkların değerlendirilmesine katkı sağlama açısından umut verici bir yaklaşımdır. Bu çalışmada, literatür taramasına dayalı olarak fındık kabuğu katkılı PLA kompozitlerin mekanik performansları ve optimum katkı oranları araştırılmıştır. Ayrıca, bu kompozitlerin Üç Boyutlu (3B) yazıcılarda üretimi sırasında kullanılan baskı parametreleri (katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, doluluk oranı gibi) incelenmiş; üretim sonrası çekme, eğilme ve darbe dayanımı testleri ile malzemelerin yapısal bütünlükleri değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, PLA matrisine fındık kabuğu tozu eklenmesinin mekanik dayanımı artırdığını ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunduğunu göstermektedir. Çalışma, bu tür kompozitlerin endüstriyel ölçekte eklemeli imalat uygulamalarında kullanılabilecek dayanıklı, ekonomik ve çevre dostu filamentlerin geliştirilmesine olanak sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, yerel doğal katkıların kullanımı, üretimin yerleştirilmesine katkı sağlayarak daha dirençli ve bağımsız bir tedarik zinciri oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, PLA kompozit filament, Fındık kabuğu, Mekanik dayanım, Biyobozunur malzemeler, Sürdürülebilirlik..

1. GİRİŞ

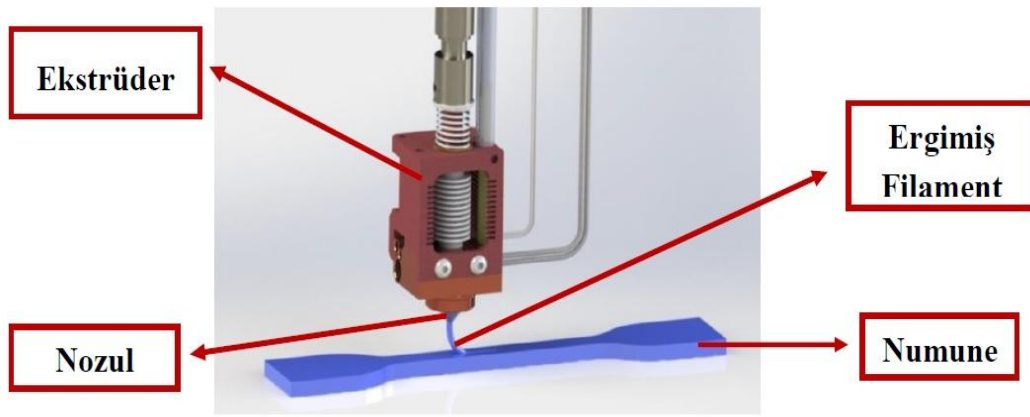
Günümüzde plastik atıkların çevreye verdiği zararın ve biyolojik olarak çözünür malzemelere olan ilginin büyük bir hızla arttığı bilinmektedir. Özellikle Üç Boyutlu (3B) baskı teknolojilerindeki gelişmeler, sürdürülebilir malzemelerin kullanımını teşvik etmektedir [35]. Polilaktik asit (PLA), biyolojik olarak çözünür ve çevre dostu bir plastik olmasına rağmen, düşük mekanik dayanıklılığı, özellikle endüstriyel uygulamalarda sınırlamalar getirmektedir. PLA'nın fiziksel performansını artırmak için yapılan çeşitli çalışmalar, bu malzemenin verimliliğini ve dayanıklılığını artırmaya yönelik yeni yöntemler aramaktadır [45]. Bu

noktada, fındık kabuğu gibi doğal ve yenilenebilir katkı maddelerinin kullanımı öne çıkmaktadır. Fındıkkabuğu, PLA filamentine katıldığında, malzemenin mekanik özelliklerini geliştirebilir ve çevresel etkilerini olumlu yönde değiştirebilir. Biyoplastikler ve özellikle PLA, son yıllarda çevre dostu alternatifler arayışında en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almıştır. PLA'nın biyolojik olarak çözünebilen yapısı, çevre üzerindeki plastik kirliliğini azaltma potansiyeli sunar.

Polilaktik asit (PLA), yeşil bileşimi nedeniyle çevre dostu malzemeler arasında önemli bir seçenek haline gelen biyolojik olarak parçalanabilir plastik polimerdir. Yine de, PLA'nın mekanik mukavemetindeki kısıtlamalar, özellikle yapısal kullanımlarda uygulanabilirliğini sınırlamıştır. PLA'yı geliştirmek için uygulanabilir bir çözüm, kompozit malzemeler oluşturmayı içerir. Örneğin, Türkiye tarım sektörünün ayrılmaz bir parçası olan fındıktan elde edilen fındık kabuğutozu, çevresel sürdürülebilirlik çabaları için yerel ve organik bir güçlendirici madde olarak hizmet eder. Çiftlik atıklarını yararlı malzemelere dönüştürmek, çevre dostu üretim yöntemlerini teşvik eder ve ekonomik değeri artırır [45]. Fındık kabuğu tozunu PLA ile karıştırmak, hafif özelliklerini ve doğal olarak parçalanma yeteneğini korurken kompozit malzemenin mukavemetini artırır. Bu biyobazlı kompozitler, özellikle katkı maddesi üretimi (3B baskı) gibi çağdaş üretim süreçlerinde önemli faydalar sunar. Bu tür teknikler, yaratıcı tasarım seçenekleri ve üretim uyarlanabilirliği sağlayarak yeni ürünlerin elde edilmesini kolaylaştırır. Bu araştırma, fındık kabuğu tozu ile zenginleştirilmiş PLA kompozit malzemelerin üretimini ve endüstriyel kullanıma uygunluğunu inceleyecektir. PLA, biyolojik olarak parçalanabilir yapısının yanı sıra çeşitli sektörlerde de kullanılmaktadır. Gıda ambalajı, tekstil, otomotiv bileşenleri ve tıbbi malzemeler gibi farklı endüstrilerde yeşil bir seçenek olarak hizmet vermektedir [56]. Gıda endüstrisinde PLA'nın gıda ile temas özellikleri ve şeffaflığı onu hijyenik ve estetik nedenlerle arzu edilir hale getirir. Tekstilde elyaf olarak kullanımı, özellikleri nedeniyle özellikle spor ve günlük giyilebilir ürünlerde ilgi uyandırmıştır. Otomotiv sektörü, PLA'nın hafif ve dayanıklı yapısından yararlanarak yakıt verimliliğini artırırken iç döşeme parçaları için çevre dostu çözümler sunmaktadır. PLA, biyoyumlu yapısı nedeniyle dikiş implantları ve geçici tıbbi cihazlar dahil olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptir. Esnekliği, önemli faydalar sağlayan katkılı üretim yöntemleriyle de devreye girer [56]. PLA, kırtasiye ve mühendislik gibi çeşitli alanlarda hızlı prototipleme ve özel tasarımlarda yaygın olarak kullanılır. Ek olarak, PLA yalnızca güncel teknolojilerle ilgili olmakla kalmaz, aynı zamanda çevre dostu üretim süreçleriyle de uyumludur. Kompozit malzemeler, her iki bileşenin de olumlu özelliklerini geliştirmek için genellikle plastik olan birincil bir matrisin başka bir güçlendirici malzemeyle birleştirilmesiyle oluşur. Fındık tozu ile güçlendirilmiş PLA kompozitleri, hem çevre hem de mühendislik yönlerinden önemli avantajlar sağlar. Fındık kabuğu tozu, kompozitin mekanik özelliklerini artıran bol miktarda selüloz ve lignin içermesi nedeniyle doğal bir takviye görevi görür. Ayrıca hafifliği ve esnekliği koruyarak PLA'nın çevre dostu özelliklerini korur. Bu biyoplastik sistemlere fındık tozu eklemek, yerel tarımsal atıkları etkili bir şekilde yeniden kullanarak dairesel ekonomi prensipleriyle de uyumludur.

Fındık tozu ile güçlendirilmiş PLA kompozitleri, malzeme mühendisliğinde çevre dostu olma ve yakın kaynakların kullanımı konusunda önemli bir vaat sunmaktadır. Kompozitin

formülasyonu ve unsurları, endüstri uygulamaları için etkililik ve performanslarında önemli bir rol oynar. Bu araştırma, bu kompozitlerin üretim sürecini ve uygulama kapsamını inceleyecektir. Bu çalışmanın, literatürdeki boşluğu doldurmak için önemli bir katkı sağlaması beklenmektedir. Fındık kabuğu tozu katkılı PLA filamentlerinin mekanik ve çevresel özelliklerinin sistematik bir şekilde incelenmesi, PLA'nın dayanıklılığını artıracak yeni yöntemlerin geliştirilmesine katkı sunacaktır. Ayrıca, katman kalınlıkları ve doldurma şekilleri gibi parametrelerin fındık kabuğu katkılı PLA filamentlerinin performansı üzerindeki etkilerinin daha önce kapsamlı bir şekilde ele alınmamış olması, bu çalışmanın özgünlüğünü ve önemini artırmaktadır. Sonuçlar, endüstriyel uygulamalarda daha sürdürülebilir ve çevre dostu filamentlerin kullanımını teşvik edebilir. Şekil 1'de Fused Depositin Modelling (FDM) / Eriyik Yığma Modelleme (EYM) tekniği ile test numunesi üretimi gösterilmektedir.



Şekil 1. FDM / EYM tekniği ile test numunesi üretimi [39].

Bu çalışmanın amacı, PLA ve fındık kabuğu katkılı filamentlerin mekanik ve çevresel dayanıklılık özelliklerini karşılaştırmak ve böylece sürdürülebilir 3B baskı filamentlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktır. Şekil 2'de kompozit üretim aşamaları gösterilmiştir.

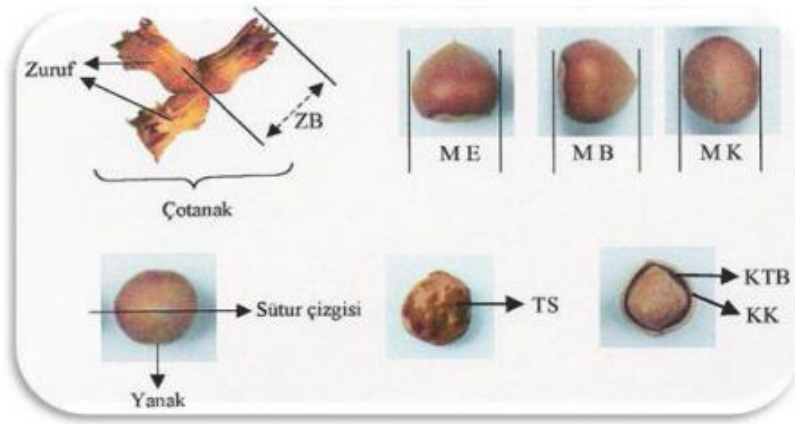


Şekil 2. Kompozit malzeme üretim aşamaları [56].

1.1 Fındık Kabuğu Tozu Kullanımının Avantajları

Fındık tozu, PLA kompozit malzemelerini çevresel sürdürülebilirlik ve performans açısından faydalar sunarak geliştirir. Doğal ve yenilenebilir bir Kaynak olan fındık kabuğu tozu, biyolojik çeşitliliğin korunmasına yardımcı olur ve atık yönetimi için değerlidir. Fındık üretiminden kalan artıkların geri dönüştürülmesi, çevresel etkiyi azaltır ve sürdürülebilir üretim uygulamalarını destekler [56]. Fındık kabuğu tozu, sadece bir katkı maddesi olmaktan öte, çevre dostu bir üretim stratejisinin ayrılmaz bir parçası haline gelir. Fındık kabuğu tozu, lifli yapısı nedeniyle kompozit malzemenin mekanik karakteristiği üzerinde faydalı etkilere sahiptir.

Şekil 3’de fındık kabuğunun şekli ve özellikleri ve Tablo 1’de ise fındık kabuğunun içeriği yüzde olarak verilmiştir [29].



Şekil 3. Fındık kabuğunun şekli ve özellikleri [29].

Tablo 1 . Fındık kabuğunun içeriği [29].

İçerik	%
Hemiselüloz	24.8
Selüloz	22.2
Nem	10.12
Yağ	1.54
Kül	1.26
Lignin	37

Doğal rengi ve dokusu, kompozit malzemelerin görünümünü geliştirerek çeşitli kullanımlar için daha arzu edilir hale getirir. İç tasarımlara ve ambalaj ürünlerine dahil edildiğinde görsel çekicilik katar ve çevre bilincine olan bağlılığı vurgular. PLA kompozitlerine fındık kabuğu tozu eklendiğinde teknik performans artarken, çevre sorumluluğunu estetikle bütünleştiren yenilikçi bir malzeme stratejisi ortaya çıkıyor.

1.2 PLA'nın Özellikleri

PLA, doğada çözünebilen bir plastik türüdür. Sürdürülebilir kaynaklardan genelde mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yapılmaktadır ve bu sayede çevreye dost bir özellik taşımaktadır. Plastik yapısı, düşük erime noktası ve kolay işlenmesi sayesinde özellikle 3B yazıcılar ve eklemeli imalat yöntemlerinde sıkça kullanılmaktadır.

170–180 °C sıcaklıkta işlem yapılabilen PLA, yüksek akışkanlık gösterebilir; böylece karmaşık şekillerde parçaların yapımı mümkün hale gelir. Mekanik açıdan PLA, özellikle

çekme dayanımı (20-70 MPa arasında) ve sertlik gibi özellikleriyle öne çıkar. Fakat bu özellikler, çevre koşullarına özellikle nem ve ısıya karşı duyarlıdır [12]. PLA, ıslak yerlerde veya düşük ısıda zamanla mekanik güç kaybeder; bu durum da bazı mühendislik işlerinde dikkatli malzeme seçimi gerektirir. PLA'nın en büyük faydalarından biri, doğal olarak bozulabilir olmasıdır. Doğada, uygun sıcaklık ve nem ile mikroplar tarafından parçalanarak karbondioksit ve suya dönüşebilir. Bu özellik, onu petrol temelli plastiklere göre daha çevre dostu bir seçenek yapar. Ama bu bozunma genellikle kontrollü şartlarda yani endüstriyel kompostlama süreçlerinde daha iyi oluyor. Kısacası PLA; işlenebilirliği, mekanik özellikleri ve çevresel yararları ile öne çıkan modern üretim süreçlerinde çeşitli kullanımlar sunan bir malzemedir. [9].

1.3 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri, geleneksel üretim yollarına başka bir alternatif olarak geliştirilmiş ve malzeme israfını azaltmaya çalışırken tasarım esnekliğini de artıran yeni süreçlerdir. Şu zaman, mühendislik ve dizayn alanlarında yaygın bir şekilde kullanılan bu yollar; özellikle karmaşık yapılar, hafif parça ve özel ürünler yapmak için ideal çözümler sağlamaktadır. En sık yöntemler arasında FDM, SLA (Stereolithography) ve SLS (Selective Laser Sintering) vardır. Bu teknikler, hem polimer hem de kompozit bazlı malzemelerin yapımında etkili sonuçlar sağlamakta ve fındık kabuğu tozu eklenmiş PLA gibi yeni nesil kompozitlerin işlenmesinde önemli fırsatlar oluşturmaktadır. FDM yöntemi, erimiş PLA ipliğinin katman katman serilmesiyle çalışan kolay ama etkili bir tekniktir. Bu sayede fındık kabuğu tozu katkılı PLA materyaller uygun sıcaklık ve parametrelerle işlenerek hem yapısal hem de fonksiyonel açıdan optimize edilebilir. SLA ise ışığa duyarlı sıvı reçinelerin lazer ışığıyla sertleşmesi prensibine dayanır. Yüksek yüzey kalitesi ve hassas detay gereken uygulamalarda öne çıkan bu yöntem estetik beklentilerin ön planda olduğu fındık kabuğu tozu karışımli özel ürünlerde tercih edilebilir. SLS yöntemi ise toz haldeki malzemelerin lazer yardımıyla birleştirilmesini sağlar. Bu metod, özellikle yüksek direnç ve karışık şekillere sahip parçalar için uygundur [28]. Fındık kabuğu tozu katkılı PLA'nın SLS ile işlenmesi, hem sağlamlık hem de hafiflik yönünden önemli artılar sunabilir. Sonuç olarak, her bir eklemeli imalat yolu, belirli bir uygulama amacı için yararlar ve sınırlamalar sunmaktadır. Bu nedenle, fındık kabuğu tozu katkılı PLA gibi karışım malzemeler için uygun yolun seçimi, nihai ürünün kalitesi ve işlevselliği açısından çok önemlidir. Eklemeli imalat teknolojileri sadece özgün tasarımlar oluşturmakla kalmaz aynı zamanda malzeme kullanımı ve üretim verimliliğini artırmayı mümkün kılmaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Fındık Kabuğu Tozu Katkılı PLA Kompozit Filamentlerin Üretimi

Fındık kabuğu tozu ile yapılan PLA kompozit filamentleri, çevre dostu yapıları ve performanslarını artırmaları nedeniyle ilgi görüyor. Üretim süreci uygun hammaddenin seçilmesiyle başlar. Polilaktik asit (PLA), mısır nişastası gibi doğal kaynaklardan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilen bir termoplastiktir. Fındık kabuğu tozunu bu polimere dahil

etmek, yalnızca mekanik özelliklerini geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel etkileri de azaltır. Üretimden kalan fındık malzemesinin değerlendirilmesi, atık yönetimi ve ekonomik uygulanabilirlik açısından önemli faydalar sağlar.



Şekil 4. Fındık kabuğunun geri dönüşümü [34].

PLA ve fındık kabuğu tozunun düzgün karıştırılması için genellikle termal veya çözelti bazlı karıştırma yöntemleri tercih edilir. Termal karıştırma, polimer viskozitesini artırmak için belirli sıcaklıklarda malzemelerin eritilmesini ve birleştirilmesini içerir ve daha kapsamlı bir karışım elde edilir. Öte yandan, çözelti karıştırma, fındık kabuğu tozu ile birleştirilmeden önce PLA'nın uyumlu çözücülerde çözülmesini gerektirir. Bu yaklaşım, fındık kabuğu tozu yüzeyinde ince bir polimer kaplama oluşturarak kompozitin mukavemetini artırır [34].

2.2 Karıştırma Yöntemleri

PLA ile fındık kabuğu tozunun etkili bir şekilde bütünleştirilmesi, karıştırma aşamasında uygulanan tekniklerin doğruluğuna bağlıdır. Karışımın homojen olması, kompozit malzemenin genel performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu nedenle çeşitli karıştırma yöntemleri değerlendirilir. En yaygın kullanılan teknikler arasında yüksek hızlı karıştırma, çift vidalı ekstrüzyon ve tabaka karıştırma yer alır.

Yüksek hızlı karıştırma, kısa sürede etkili bir karışım sağlar. Bu yöntemde uygulanan yüksek enerji sayesinde fındık kabuğu tozu partikülleri daha iyi dağılır; ancak aşırı ısınma PLA'nın termal kararlılığını bozabilir. Bu nedenle sıcaklık kontrolü kritik bir parametredir [35].

Çift vidalı ekstrüzyon yöntemi ise viskozitesi yüksek malzemelerin homojen şekilde karıştırılması için uygundur. Bu sistemin sunduğu mekanik hareket, malzemelerin eşit şekilde

dağılmasını sağlarken aynı zamanda oluşabilecek gazların ortamdan uzaklaştırılmasına da yardımcı olur.

Tabaka karıştırma yöntemi ise, malzemelerin farklı katmanlar halinde birleştirilerek sıkıştırılması prensibine dayanır. Özellikle fındık kabuğu tozunun ince yapısı bu teknikle PLA içerisine daha etkili şekilde entegre edilebilir. Böylece kompozitin hem fiziksel hem de mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanabilir.

2.3 Ekstrüzyon Süreci

PLA'nın fındık kabuğu tozuyla başarılı bir şekilde harmanlanması, kullanılan karıştırma tekniklerinin hassasiyetine dayanır. Karışımın düzgünlüğü, nihai malzemenin genel kalitesini önemli ölçüde etkiler [56]. Bu nedenle, yüksek hızlı harmanlama, çift vidalı ekstrüzyon ve katman harmanlama gibi bir dizi karıştırma yöntemi değerlendirme için dikkate alınır.

Yüksek hızlı harmanlama, hızlı bir şekilde kapsamlı bir harman oluşturur. Bu teknikte kullanılan yoğun enerji, fındık kabuğu tozu parçacıklarının eşit şekilde dağılmasına yardımcı olur, ancak aşırı ısı PLA'nın termal kararlılığını etkileyebilir. Bu nedenle sıcaklığın düzenlenmesi hayati önem taşır.

Çift vidalı ekstrüzyon yöntemi, yüksek viskoziteli karışım malzemeleri için düzgün bir şekilde uygundur. Bu sistem tarafından kolaylaştırılan mekanik hareket, malzemelerin eşit şekilde dağılmasını garanti eder ve çevreden kaynaklanabilecek gazların ortadan kaldırılmasına yardımcı olur.

Harmanlama yöntemi, çeşitli malzemelerin ayrı katmanlarda entegre edilmesini ve sıkıştırılmasını içerir. Bu yaklaşım kullanılarak fındık tozunun ince yapısı, kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yol açan PLA'ya daha iyi dahil edilebilir [14].

Fındık kabuğu tozu katkılı PLA kompozitlerin üretimi, karışımın ısıtılıp kalıptan geçirilerek istenen şekilde filamentin oluşturulduğu temel bir adım olan ekstrüzyon işlemini içerir. Bu prosedürün başarısı vida konfigürasyonları, sıcaklık ayarları ve basınç koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Ekstrüderin sıcaklığı PLA'nın akış özelliklerini etkiler. Fındık kabuğu tozuyla uygun erime ve bağlanma için optimum sıcaklık aralığını korumak çok önemlidir. Aşırı sıcaklıklar bozulmaya neden olabilir [56]. Ayrıca nem seviyesi ve fındık parçacıklarının boyutu ekstrüzyon kalitesini belirlemede önemli rol oynar. Bu işlem sırasında, filamentin güçlü ve katkı üretimine uygun olması gerekir. Bu nedenle, ekstrüzyon sırasında meydana gelen değişiklikler son ürünün kalitesini büyük ölçüde etkiler.

2.4 Eklemeli İmalat Süreci ve Üretim Parametreleri

3B yazıcılarda ürün basımı sırasında kullanılan üretim parametreleri (katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, doluluk oranı gibi) incelenmiştir. Bu parametrelerin etkileri Katkılı üretim, 3B baskı olarak da adlandırılır, etkinliği ve çevre dostu olma özelliğini artıran yaklaşımlarla üretim sektörünü dönüştürüyor. Bu çığır açan teknoloji, karmaşık yapılar oluşturmak için kademeli malzeme uygulaması kullanarak geleneksel üretim yöntemlerini altüst ediyor. İşletmeler

giderek artan bir şekilde katkılı üretimi benimsedikçe avantajları belirginleşiyor - malzeme israfını azaltma, daha hızlı prototipleme ve yaratıcılık ve kapsamlı kişiselleştirme yeteneği gibi. Bununla birlikte, bu avantajlara rağmen malzeme seçiminde zorlukları, büyük ölçekli çıktılarda olası gecikmeleri ve bu teknolojiyi entegre etmek için gereken önemli ön yatırımı vurguluyor. Bu makale, katkılı üretim avantajlarını ve dezavantajlarını inceleyerek, avantajlarının dezavantajlarından daha büyük olduğu sonucuna varıyor.

Katkılı üretim dikkate değer bir avantajı, malzeme israfını önemli ölçüde azaltma kapasitesidir. Buna karşılık, geleneksel üretim teknikleri genellikle istenen şekilleri elde etmek için daha büyük bloklardan fazla malzemeyi kesmeyi içeren çıkarmalı yöntemlerle önemli miktarda atık üretir. Bu, başlangıçtaki malzemenin %90'ına kadar atılmasına ve ekonomik ve çevresel sonuçlara yol açabilir. Tersine, katkılı üretim, ürünleri katman katman hassasiyetle üretmek için yalnızca gerekli malzemeleri kullanır. Bu yaklaşım yalnızca kaynakları korumakla kalmaz, aynı zamanda daha çevre dostu üretim yöntemlerine olan artan ihtiyaca da karşılık gelir. Atıktaki azalma daha küçük karbon ayak izini destekler ve doğal kaynaklar üzerindeki yükü azaltarak katkı üretimini daha çevre dostu bir seçenek olarak konumlandırır [7]. Ek olarak, malzemeleri yeniden kullanma kapasitesi bu yöntemin sürdürülebilirliğini artırır ve şirketlerin yaklaşan girişimler için fazla malzemeleri yeniden kullanmalarına olanak tanır. Atık azaltımı yoluyla katkı üretimi, çevreye duyarlı tüketiciler ve işletmelerle yankı uyandıran daha etik ve sürdürülebilir bir üretim ortamı için zemin hazırlar. Bu teknoloji, hızlı prototiplemeyi kolaylaştırarak ve yeniliği teşvik ederek ürün geliştirmeyi dönüştürür. Katkılı üretiminin hızlı prototip üretim hızı, yeni ürünün pazara sunulma süresini önemli ölçüde hızlandırır. Geleneksel üretim teknikleri genellikle uzun bir kurulum süresi ve karmaşık takım prosedürü gerektirir ve bu da ürün geliştirmede önemli gecikmelere neden olabilir. Ancak katkılı üretim, tasarımcıların ve mühendislerin bir ürünün birçok versiyonunu hızlı bir şekilde üretmesine ve değerlendirmesine olanak tanır ve bu da geliştirme sürecinin çevikliğini artırır [23].

Eklemeli imalat sürecinde, üretim parametrelerini doğru bir şekilde ayarlamak, PLA/fındık kabuğu tozu kompozitlerin performansını artırmak için çok önemlidir. Dikkate alınması gereken temel üretim parametreleri nozul sıcaklığı, baskı hızı, doluluk oranı, yazdırma şekli ve katman kalınlığıdır. Nozul sıcaklığı genellikle 180-220 °C aralığında ayarlanır. Fındık kabuğu tozunun eklenmesi bu sıcaklık aralığında ince ayar gerektirebilir. Yüksek sıcaklıklar malzeme akışını artırır ancak yapısal sorunlara yol açabilirken düşük sıcaklıklar katman yapışmasını tehlikeye atabilir [15-,18,20]. 30-50 mm/sn'lik bir baskı hızının korunması daha düzgün katman yerleşimine yol açar. Akış kontrolü, pürüzsüz ve tutarlı bir filament çıkışı sağlamaya yardımcı olur.

3B yazdırma işleminde ürünlerin doluluk oranının % 60-70 üzerinde olması basım süresini ve malzeme sarfiyatını artırırken dayanım değerlerinde çok fazla artış olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle doluluk oranlarının belirlenmesinde % 70'in üzerine çıkmasına gerek olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır [67].

2.5 Mekanik Özellikler

Son zamanlarda, sürdürülebilir malzemelerin bulunması, özellikle biyokompozitler alanında büyük bir hız kazanmıştır. Tarım atıklarının polimer matrislere eklenmesi, hem çevreyi koruma hem de daha iyi malzeme performansı için umut verici bir yol sağlamaktadır. Bu yeniliklerden biri fındık kabuğu tozu katkılı PLA kompozitlerdir. Bu kompozit sadece daha iyi mekanik özellikler göstermekle kalmaz ama aynı zamanda önemli çevresel yararlar ve maliyet etkinliği de sunar. Ancak, her yeni materyalde olduğu gibi işleme sürekliliği dayanıklılık ve pazar kabulündeki olası sınırlamaları ele almak çok önemlidir. Bu çalışma, fındık kabuğu tozu katkılı PLA karışımlarının değerlerini araştırırken, aynı zamanda sıkça kabul edilmelerine karşı olan argümanları da gözden geçirecektir [19].

Fındık kabuğu tozu katkılı PLA karışımlarının mekanik dayanımı, saf PLA'ya göre büyük ölçüde artırılmıştır ve bu onu çeşitli kullanım yerleri için ilginç bir seçenek yapar. Fındık kabukları, daha büyük güçlere zarar görmeden katlanabilen bir karışıma dönüşen yüksek çekme gücü ile bilinir. Bu özellik, otomobil ve uçak üretimi gibi malzeme bütünlüğünün çok önemli olduğu sektörlerde özellikle önemlidir. Ayrıca, fındık kabuklarının PLA yapısına eklenmesi, karışımın darbe direncini geliştirerek darbeleri emmesini sağlar ve zor koşullarda hasara karşı koymasına yardımcı olur. Bu nitelik, malzemeyi kutular veya koruyucu ekipmanlar gibi yüksek darbe kuvvetlerine maruz kalan parçalar için uygun hale getirir. Ayrıca, fındık kabuğu tozu katkılı ürünler daha iyi yorgunluk dayanımı sağlar [56]. Geleneksel PLA malzemeleri zamanla yorulabilir ve bu da sürekli strese maruz kalan ürünlerde malzeme hasarına neden olabilir. Ama fındık kabuklarının eklenmesi, bu bileşimlerin ömrünü uzatır, onları daha güvenilir kılar ve değiştirme ihtiyacını azaltır. Mekanik özelliklerdeki bu gelişme, bu bileşimlerden yapılan ürünlerin işlevselliğini artırmakla kalmaz aynı zamanda bunları geleneksel malzemelere uygun seçenekler olarak yerleştirerek farklı alanlarda daha çok benimsenmesini sağlar.

Mekanik yararlar dışında, fındık kabuğu tozu katkılı PLA, çevre dostu malzemelere olan artan istekle uyumlu büyük faydalar sunar. Fındık kabukları gibi tarımsal atıkları kullanmak, sürdürülebilirliği destekleme ve atıkları azaltma yönünde bir adım olur. Aksi takdirde çöpe gidecek atıkları yeniden kullanarak üreticiler döngüsel bir ekonomi oluşturabilir ve atık yok etmeyle ilgili ekosistem etkisini en aza indirebilirler. Ayrıca PLA kendisi doğal olarak parçalanabilen bir madde; bu da bu karışımdan yapılan ürünlerin zamanla yok olacağı anlamına gelir; kirlenmeyi ve yıllarca doğada kalacak geleneksel plastiklere kıyasla depolama alanlarına binen yükü azaltır.

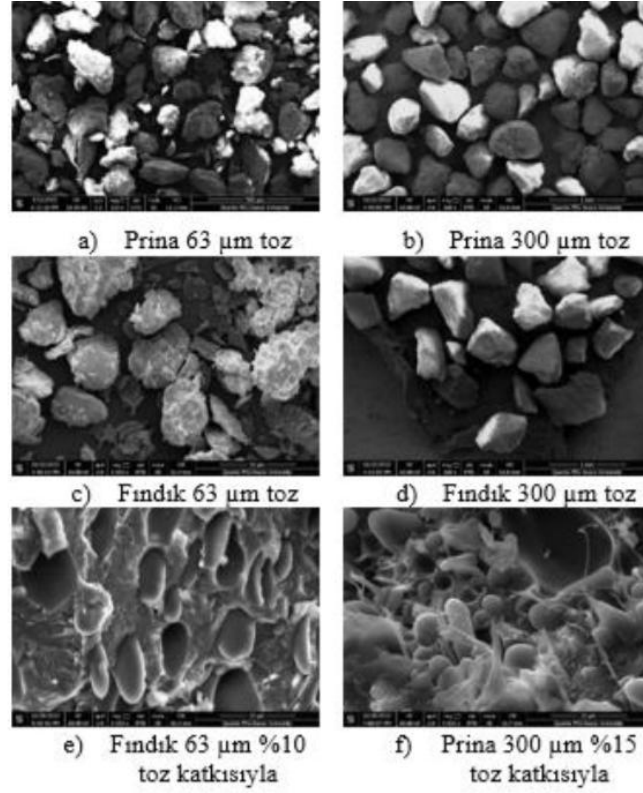
2.6 Optimizasyon Süreci

Optimizasyon, üretim verimliliğini artırmayı ve nihai ürün performansını en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan kritik bir aşamadır. Bu, fındık kabuğu tozu oranı, ekstrüzyon sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi çeşitli faktörlerin değerlendirilmesini içerir. Aşırı yüksek ısı, PLA'nın bozulmasına yol açabilirken düşük sıcaklıklar zayıf akışa neden olur. Nozul boyutu, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi ayarların ideal sınırlar içinde optimum olarak ayarlanması, hem mukavemeti hem de bitişi büyük ölçüde etkiler. Optimizasyonun amacı, üretim sürecinde hem teknik hem de ekonomik verimliliği artırmak için bu faktörlerin optimum kombinasyonlarını belirlemektir [12].

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu araştırmada, katkı maddesi imalatıyla üretilen PLA kompozit malzemelere fındık kabuğu tozu eklenmiştir. İşlem sırasında toplanan veriler, kompozitlerin dayanıklılığını ve esnekliğini değerlendirmek için önemli olan mekanik testlerle analiz edilmiştir. Çekme ve darbe testleri, fındık kabuğu tozunun değişen oranlarının mekanik performansı nasıl etkilediğini açıkça göstermektedir. Sonuçlar, %10 fındık kabuğu tozu katkısı eklemenin mekanik mukavemeti önemli ölçüde artırdığını; ancak oran %20'yi aştığında işlenebilirlik ve genel mekanik performans düştüğünü göstermektedir. Bu sonuç, fındık kabuğu tozu ve PLA matrisi arasındaki entegrasyon seviyesiyle doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla uygun katkı maddesi oranının belirlenmesi, daha eşit ve dayanıklı malzeme performansları elde edilmesini sağlar. Termal değerlendirmeler ayrıca kompozit malzemelerin ısıya verdiği tepkiyi değerlendirmede önemli içgörüler sağlar. Termogravimetri (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizleri, fındık kabuğu tozunu katkı maddesi olarak eklemenin PLA'nın termal kararlılığını ve erime özelliklerini artırabileceğini ortaya koymaktadır. Bu ekleme, malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırmakla kalmaz, aynı zamanda üretim sırasında işlenebilirliğini de iyileştirir. Bu kompozit malzemeler biyolojik olarak parçalanabilir yapıları nedeniyle çevresel sürdürülebilirlikte önemli faydalar sağlar.

Mikro yapıların incelenmesi, fındık kabuğu tozunun PLA matrisi içinde nasıl dağıldığına dair ayrıntılı bir içgörü sağlayarak homojenliğini ve etkileşimini gösterir. Elektron mikroskobu görselleri, fındık kabuğu tozunun katmanlar arasında güçlü bir şekilde bağlandığını ve bunun da düzgün bir dağılımla iyileştirilmiş mekanik ve termal özelliklere yol açtığını gösterir. Mikro yapıdaki geliştirilmiş homojenlik, malzemenin genel performansını olumlu yönde etkilemiştir. Bu kapsamlı bulgular, fındık kabuğu tozu ile aşılınmış PLA kompozitinin hem çevresel hem de teknik faydaları olan sürdürülebilir ürünler yaratma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 5'te fındık tozu katkılı kompozit yapıların mikroyapısı gösterilmiştir.



Şekil 5. Tozların mikro yapı görüntüleri [56].

4. Öneriler

Çalışma sonuçları, katkılı üretim süreçlerinde fındık kabuğu tozu ile aşılınmış PLA kompozit malzemelerin etkinliğini vurgulamaktadır. %10 fındık kabuğu tozu eklemek mekanik ve termal özellikleri iyileştirir ancak daha yüksek oranlar daha düşük işlenebilirliğe ve genel performansa yol açar. Başarılı ürün geliştirme için optimum katkı oranının bulunması çok önemlidir.

Gelecekteki araştırmalar, çeşitli doğal lif veya biyolojik olarak parçalanabilir katkı maddelerinin PLA ile birlikte fındık kabuğu tozu ile kombinasyonunu araştırabilir. Keten lifi veya bambu gibi malzemelerin kullanılması mekanik özellikleri ve biyoyumluluğu artırabilir.

Farklı üretim yöntemleriyle elde edilen sonuçları karşılaştırarak çeşitli katkı üretim teknolojilerinin kompozit malzemelerle nasıl kullanılabileceğini keşfetmek için daha fazla araştırma yapılmalıdır. Tasarım ve üretim optimizasyonu için CAD kullanımı, bu malzemelerin hem mühendislik hem de ticari ortamlarda uygulanabilirliğini artırabilir [12].

Fındık kabuğu tozu ile aşılınmış PLA kompozitleri, ambalaj, otomotiv ve inşaat gibi çeşitli sektörler için çevre dostu ve teknik olarak etkili bir seçenek sunar. Yaklaşan araştırmalar için, akademik ve endüstriyel alanlara önemli katkılarda bulunmak üzere malzemeleri geliştirmeye ve sürdürülebilir üretim yöntemleri oluşturmaya öncelik vermek önemlidir [56].

Teşekkür

Bu çalışmada, BAP-2025.22.01.1575 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle destekleyen Düzce Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- 1 Yu, L., Dean, K., & Li, L. (2006). Polymer blends and composites from renewable resources. *Progress in Polymer Science*, 31(6), 576-602.
- 2 Ekerer, F. A. (2007). *Alumina-Sic Partikül Destekli T/M Al-Matriksli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
- 3 Bükim, H. (2009). *Fındık kabuğu dolgulu polipropilen kompozitlerin SEBS ve SEBS-g-MA ile modifikasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- 4 Kazemi Najafi, S., & Najafi, S. K. (2014). The effect of walnut shell flour on the mechanical properties and biodegradability of polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(14), 40529.
- 5 Çantı, E. (2016). *Üç boyutlu yazıcılar için polimer nanokompozit filamentlerin üretimi ve karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).
- 6 Sezer, H., Eren, O., & Börklü, H. (2016, Mayıs). *Karbon fiber takviyeli ABS filament üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. 3D Printing Technologies International Symposium, İstanbul.
- 7 Tian, X., Liu, T., Wang, Q., Dilmurat, A., & Li, D. (2017). Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1609-1618.
- 8 Hamamcı, B. (2018). Yeşil kompozitlerde biyopolimerlerin kullanımının önemi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 12-24.
- 9 Kaygusuz, B., & Özerinç, S. (2018). 3 Boyutlu yazıcı ile üretilen PLA bazlı yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(1), 1-6.
- 10 Rahman, M. E., Islam, M. A., Uddin, M. J., & Hossain, M. S. (2018). Production and Characterization of Walnut Shell and Polystyrene-Based Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(7), 903-914.
- 11 Willberg-Keyriläinen, P., Orelma, H., & Ropponen, J. (2018). Injection molding of thermoplastic cellulose esters and their compatibility with poly (lactic acid) and polyethylene. *Materials*, 11(12), 2358.
- 12 Aydın, M., Çantı, E., & Yıldırım, F. (2019). Farklı yazdırma parametrelerinde PLA filamentin işlem performansının incelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(2), 102-115.
- 13 Evlen, H., Özdemir, M. A., & Çalışkan, A. (2019). Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1031-1037.

- 14 Gamsız, K. (2019). *Enginar Sapı ve Pirinç Kabuğu Katkılı Hibrit Polimerik Kompozitlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi).
- 15 Geyik, O. G., Nalbant, B., Hüşemoğlu, R. B., Yüççe, Z., Ünüek, T., & Havitçioğlu, H. (2019). Investigation of Surface Adhesion of MCF-7 Cells in 3D Printed PET and PLA Tissue Scaffold Models. *Journal of Medical Innovation and Technology*.
- 16 Goud, V., Singh, K. P., & Ramamurthy, K. (2019). Walnut shell powder reinforced biodegradable polycaprolactone composites: Evaluation of mechanical, thermal, and biodegradation properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(25), 40529.
- 17 Song, X., He, W., Yang, S., Huang, G., & Yang, T. (2019). Fused Deposition Modeling of Poly (Lactic Acid)/Walnut Shell Biocomposite Filaments—Surface Treatment and Properties. *Applied Sciences*, 9(22), 4892. <https://doi.org/10.3390/app9224892>
- 18 Yaman, S. (2019). *3B yazıcı ile üretilen PLA40/ABS60 malzemesinin termal ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı).
- 19 Atsani, S., & Mastriswadi, H. (2020). Recycled polypropylene filament for 3D printer: Extrusion process parameter optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 850(1), 012015.
- 20 Demir, İ., & Elmalı, M. (2020). Organik Atıkların Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(4), 1303-1311.
- 21 Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N., & Kaçar, R. (2020). PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79.
- 22 Karthi, N., Kumaresan, K., Sathish, S., Gokulkumar, S., Prabhu, L., & Vigneshkumar, N. (2020). An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2828-2834.
- 23 Ogunsona, S. S., & Kumar, S. (2020). Characterisation of polyethylene/walnut shell powder composites. *Heliyon*, 6(1), e03195.
- 24 Song, X., He, W., Han, X., & Qin, H. (2020). Fused Deposition Modeling of Poly (lactic acid)/Nutshells Composite Filaments: Effect of Alkali Treatment. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(11), 3139–3152. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01839-z>
- 25 Syduzzaman, M., Al Faruque, M. A., Bilisik, K., & Naebe, M. (2020). Plant-based natural fibre reinforced composites: a review on fabrication, properties and applications. *Coatings*, 10(10), 973.
- 26 Abhiram, Y., Das, A., & Sharma, K. K. (2021). Green composites for structural and non-structural applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2658-2664.
- 27 Akbaba, A. İ., & Eren, A. E. (2021). Üç boyutlu yazıcılar ve kullanım alanları. *ETÜ Sentez İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2021(3), 19-46.
- 28 Arslan, Z., & Demir, H. (2021). Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan PLA filamentlerin geri dönüştürülmesi ve mekanik özelliklerin analizi. *Selçuk Teknik Dergisi*, 10(3), 311-321.

- 28 Bacak, S., Varol Özkavak, H., & Tatlı, M. (2021). FDM yöntemi ile üretilen PLA numunelerin çekme özelliklerine işlem parametrelerinin etkisinin incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 209-216.
- 29 Cengiz, Ö., Karagöz, İ., & Demirer, H. (2021, Haziran). *Fındık Kabuğu ve Talk Dolgulu Polipropilen Kompozitlerin Mekanik ve Isıl Özelliklerinin İncelenmesi*. 8. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye.
- 30 Karagöz, İ. (2021). An effect of mold surface temperature on final product properties in the injection molding of high-density polyethylene materials. *Polymer Bulletin*, 78(5), 2627–2644.
- 31 Rafiee, K., Schmitt, H., Pleissner, D., Kaur, G., & Brar, S. K. (2021). Biodegradable green composites: It's never too late to mend. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 30, 100482.
- 32 Taşdemir, M. (2021). Isıl yaşlandırmanın yüksek yoğunluklu polietilen/fındık kabuğu polimer kompozitinin fiziksel ve aşınma özelliklerine etkisi. *International Journal of Advanced Engineering and Pure Science*, 33(2).
- 33 Adıbelli, Ü., Mutlu, D., Çakır Yiğit, N., & Karagöz, İ. (2022, Mayıs). Ceviz Kabuğu dolgulu Epoksi Hibrit Kompozit Malzemelerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu. 10. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.
- 34 Çağlar, Ş., Karagöz, İ., & Demirer, H. (2022, Kasım). *Fındık kabuğu dolgulu polimer kompozitlerde fındık kabuğunun renk özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi*. 11. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, Gebze, Türkiye.
- 35 Cengiz, Ö., & Aktepe, Ş. (2022). Üç Boyutlu (3D) Yazıcılarda Sürdürülebilir Malzeme Olarak Ahşap ve Proses Atıklarının Kullanım Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (38), 143-150.
- 36 Çakır Yiğit, N., & Karagöz, İ. (2022, Kasım). *Ceviz Kabuğu Esaslı Polilaktik Asit (PLA) Kompozit Filamentlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu*. 10. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.
- 37 Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Thyaviahalli Girijappa, Y. G., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2022). *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(4), 1649-1654.
- 38 Kamer, M. S., Temiz, S., Yaykaslı, H., Kaya, A., & Akay, O. E. (2022). Effect of printing speed on FDM 3D-printed PLA samples produced using different two printers. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 438-448.
- 39 Koç, H. B. (2022). *Üç boyutlu yazıcılarda kullanılmak üzere geri dönüştürülmüş PLA filamentle basılan parçaların mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Programı).
- 40 Liu, X., Sun, J., & Zhang, H. (2022). Optimization of printing parameters for PLA composites in additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131089.
- 41 Mirici, M. E., & Berberoğlu, S. (2022). Türkiye perspektifinde yeşil mutabakat ve karbon ayak izi: tehdit mi? fırsat mı? *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(1), 156-164.
- 42 Yalçın, L. (2022). *Fındık kabuğu katkılı kompozit elemanların fiziksel, mekanik ve termal özelliklerinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi).
- 43 Yıldırım, H. (2022). PLA ve ABS filamentlerin farklı yazdırma hızlarında performanslarının karşılaştırılması. *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 34(2), 179-193.

- 44 Altun, S., & Sekban, B. (2023). 3B Yazıcılar için cam fiber katkılı kompozit filament üretimi ve mekanik özellikleri. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(1), 64-77.
- 45 Erkul, N. Ş., & Uçaroğlu, S. (2023). Topraklarda Polilaktik Asitin (PLA) Biyobozunması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(1), 227-234.
- 46 Karabağ, D., Tekkanat, M. A., Anaç, N., & Koçar, O. (2023). Investigation of adhesive bonding strength of wood added PLA materials. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 26-38.
- 47 Kaya, M., & Çelik, S. (2023). PLA malzemelerin biyolojik bozunma özelliklerinin farklı toprak tiplerinde karşılaştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(4), 245-257.
- 48 Pérez, M., Santolaria, J., & Abad, D. (2023). Influence of infill pattern on PLA parts mechanical properties produced by 3D printing. *Additive Manufacturing*, 58, 102158.
- 49 Polat Çoban, N., Anaç, N., & Mert, F. (2023). Eklemeli imalat ile üretilen PLA parçaların yapıştırılmasında yapıştırma parametrelerinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 26(3), 1145-1154.
- 50 Şahin, M. (2023). *Fındık kabuğu atıklarının kitosan bazlı gıda ambalaj filmlerinde kullanımı*. (Yayınlanmamış çalışma).
- 51 Taşgın, Y., & Kandemir, S. (2023). Doğal elyaf takviyeli (jüt-keten-kenevir) kompozit malzemelerin mekanik ve metalografik olarak incelenmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 9(2), 240-249. <https://doi.org/10.29132/ijpas.1371357>
- 52 Yin, Q., Kong, F., Wang, S., Du, J., Tao, Y., & Li, P. (2023). Hazelnut shell carbon filled polylactic acid composite filaments for 3D printing photothermal structures. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 3923–3935. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.299>
- 53 Adanur, Ö., Koçar, O., & Güldibi, A. S. (2024). Fdm Yöntemiyle Üretilen Pla Malzemelerde Dolgu Deseninin Mekanik Özelliklere Etkisi. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 294-307. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1336572>
- 54 Aktepe, E., & Aktepe, Ş. (2024). PLA ve geri dönüştürülmüş PET filamentlerinin 3D FDM baskıda boyutsal doğruluk ve geriye çekilme performansının karşılaştırılması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8(1), 114-123.
- 55 Aliotta, L., Sergi, C., Dal Pont, B., Coltelli, M.-B., Gigante, V., & Lazzeri, A. (2024). Sustainable 3D printed poly (lactic acid) (PLA)/Hazelnut shell powder bio composites for design applications. *Materials Today Sustainability*, 26, 100780. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100780>
- 56 Anaç, N., Temiz, A., Koçar, O., & Güldibi, A. S. (2024). Plastik Enjeksiyon Yöntemi ile Fındık Kabuğu ve Pirina Katkılı Biyokompozitlerin Üretimi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 10(1), 72-88. <https://doi.org/10.29132/ijpas.1425528>
- 57 Bilgiustam. (n.d.). *Biyoplastik endüstrisinin gelişimi ve geleceği: Polilaktik asit (PLA) polimerine bakış*. Erişim tarihi: 2024, Kasım 19, <https://www.bilgiustam.com/biyoplastik-endustrisinin-gelisimi-ve-gelecegi-polilaktik-asit-pla-polimerine-bakis/>
- 58 Çelik, B. B., Şener, B., Serin, G., & Ünver, H. Ö. (2024). Ergiyik filament fabrikasyonu: 3B yazıcılar için kompozit filament ekstrüder makinesi geliştirilmesi.

Erişim tarihi: 2024, Kasım 23,

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/matim/issue/53867/675098>.

- 59 Er, A. O., & Aydın, O. M. (2024). Ergiyik filament ile imalat yönteminde kullanılan PLA ve çelik katkılı PLA filament malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), 1285-1301. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1276420>
- 60 Karagöz, İ. (2024). Production and characterization of sustainable biocompatible PLA/walnut shell composite materials. *Polymer Bulletin*, 81(12), 11517–11537. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05247-4>
- 61 Keleş, D., Balcı, D., Taşdemir, M., & Ulutaş, E. (2024). Polipropilen+% 20 Kenevir Takviyeli/Çörek Otu/Maleik Anhidrit Aşılı Polipropilen Polimer Kompozitinin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(3), 464-474.
- 62 Kolak, M. N., & Polat, H. (2024). Polimer Kompozitlerde Ahşap Atığı Tozu İkamesinin Etkileri: Mekanik ve Fiziksel Özellikler. *Recep Tayyip Erdoğan University Journal of Science and Engineering*, 5(2), 123-134.
- 63 Palaniyappan, S., Sivakumar, N. K., Bodaghi, M., Rahaman, M., & Pandiaraj, S. (2024). Preparation and performance evaluation of 3D printed Poly Lactic Acid composites reinforced with silane functionalized walnut shell for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 41, 101226. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101226>
- 64 Sarıkaya, A., Sertkaya, A. A., Canlı, E., & Güler, C. (2024). Production of almond shell containing particleboards and determination of their thermal conductivities. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(3), 1917-1932.
- 65 Ulutaş, E., & Taşdemir, M. (2024). Polipropilenin Mekanik Özelliklerine Muz ve Piriç Kabuğu Tozlarının Etkilerinin İncelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(3), 1310-1319.
- 66 Aslan, H. Ç. (2025). Kayısı çekirdeği kabuğu ile hazırlanan polipropilen esaslı kompozitlerin morfolojik, mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 40(2), 1347-1356.
- 67 Evlen, H., Erel, G., & Yılmaz, E. (2018). 3 Boyutlu yazıcı tasarımı ve yazdırma doluluk oranının mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(1), 23–31.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CRYOGENIC TREATMENT ON THE HARDNESS AND IMPACT PERFORMANCE OF CPR TOOL STEEL

İbrahim SARIKAYA

Duzce University / Institute of Science / Department of Manufacturing Engineering

ibrahimsarkyl4@gmail.com

Prof. Dr. Fuat KARA

Duzce University / Faculty of Engineering / Department of Mechanical Engineering

fuatkara@duzce.edu.tr

Abstract

Sub-zero treatment, also known as cryogenic treatment, is a process aimed at improving the properties of materials by exposing them to very low temperatures. In recent years, this method has become widely used for both metallic and non-metallic materials, especially tool steels. In Turkey, cryogenic treatments have gained attention across multiple sectors, including defense and automotive industries. CPR cold work tool steel is commonly employed in applications requiring high hardness and toughness, such as cutting, forming, forging, extrusion, threading, and powder pressing. However, studies specifically focusing on CPR steel remain limited in the literature. This study investigates the effects of shallow (-80 °C) and deep (-180 °C) cryogenic treatments applied for different durations on the hardness, impact strength, and microstructure of CPR tool steel. All specimens were tempered at 250 °C for 2 hours after cryogenic treatment. The results demonstrate that cryogenic treatment improves the mechanical properties of CPR steel, particularly with a notable increase in impact performance: 56.1% for SCT and 52.63% for DCT samples. As a result of the hardness tests performed, it was determined that the cryogenic treatment provided an increase in hardness of approximately 3% in CPR tool steel. This increase is particularly associated with the transformation of residual austenite into martensite, and the deep cryogenic treatment (DCT) application caused a more pronounced phase transformation. The limited increase in hardness obtained can be explained by the fact that CPR steel already has a high initial hardness and the amount of residual austenite that can be transformed is limited. In this regard, it was concluded that cryogenic treatment slightly increases the hardness of CPR steel but primarily exerts its effect on impact performance.

Keywords: Cryogenic treatment, CPR steel, Impact strength, Hardness.

1. Introduction

The enhancement of mechanical performance, particularly in terms of wear and impact resistance, is a central concern in the materials engineering field. Traditionally, surface treatments, thermal processing, and alloy modifications have been utilized. Among these, cryogenic treatment — a process developed in the early 20th century — has gained prominence due to its proven impact on improving material characteristics.

In order to increase wear resistance, studies have been carried out on methods such as heat treatments, surface improvement processes, material and metallurgical modification, which have been generally used for years. However, cryogenic treatment, which was first tested in the 1900s and provides high rates of improvement on wear resistance, has come to the fore in recent years. Tool steels are more widely used in industrial applications than other steel groups in terms of usage areas. Tool steel is a type of high strength wear resistant steel. It is used especially in the industrial industry, such as cutting tools, drill bits, moulds and gear cutters. Due to its wear resistance, tool steel is often used in machining applications requiring high precision. Especially in sectors such as automotive, aerospace, machinery and defence industries, thanks to its high strength, durability and sharpness, most of them are used in precision work such as cutting, drilling or shaping. Tool steels are developed to withstand wear in forming and machining applications under different temperatures and different parameters. (Ş. Şirin and E. Şirin 2020).

Heat treatment consists of heating, holding and controlled cooling at a specific temperature in order to improve the mechanical and physical properties of metals and alloys. For example, quenching at 1050 °C can increase the hardness value of AISI 1040 steel from 180 HV to 520 HV. This increase provides high mechanical strength due to the formation of the martensite phase. Annealing is typically performed at 650–700 °C, resulting in a approximately 30% reduction in hardness while improving toughness and machinability. In AISI 304 austenitic stainless steel, ductility increases from 35% to 48% after heat treatment, while wear reduction of up to 20% has been reported. These data clearly demonstrate the significant effects of heat treatment on the performance of steels (García-León 2024) .

The literature research reveals that cryogenic (sub-zero) treatment is an effective method to improve the mechanical and metallurgical properties of many engineering materials, especially tool steels. It has been reported to provide significant improvements in critical properties such as wear resistance, hardness, surface roughness and corrosion resistance. Although it is emphasised that more significant improvements are obtained with deep cryogenic treatments (-180 °C and below), some studies show that shallow cryogenic treatments (in the range of -75 °C to -140 °C) give more effective results in certain applications and steel types. This suggests that the effects of cryogenic treatment may vary depending on the treatment temperature, duration, material structure and application conditions. (J. Ptacinova vd 2024). In this study, the effect of cryogenic treatment of CPR steel at -80 °C and -180 °C on hardness, wear resistance and impact energy was investigated.

2. MATERIAL AND METHOD

The test samples were divided into three groups: traditional shallow cryogenic treatment (SCT), deep cryogenic treatment (DCT), and traditional (CHT). The chemical analysis of the CPR tool steel used in the experiments is given in Table 1. The samples were hardened by heat treatment. Austenitisation was carried out in a Cmetz model vacuum furnace at a temperature of 1050°C for 2 hours. The samples were then cooled in a nitrogen atmosphere at a pressure of 4 bar. After these processes, the hardness of the samples increased.

Table 1. CPR Chemical composition of steel.

Element	C	Cr	Mo	V	W
%	1.20	12.00	1.40	1.70	2.50

The samples were brought to the desired dimensions on a wire erosion machine DK7740. The prepared samples were subjected to shallow cryogenic treatment at -80°C for 36 hours for SCT group and deep cryogenic treatment at -180°C for 36 hours for DCT group. Cryogenic treatment was carried out in the cryogenic treatment device in the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Düzce University. Notch impact test was carried out by opening U notch in TIME L71-UV device and testing with 150 J in JB-W300A device. Hardness measurements of the samples were measured by taking the average value with NOVOTEST tester. Under 150 g load for 10 seconds, hardness values were measured. Measurements were made for 5 specimens in each group and these five values were averaged.

3. FINDINGS AND DISCUSSION

3.1. Evaluation of Microhardness

Figure 1 shows the average microhardness values of DCT, SCT and CHT specimens. Although cryogenic treatment did not have a noticeable effect on CPR tool steel, hardness values increased by 3% after cryogenic treatment.

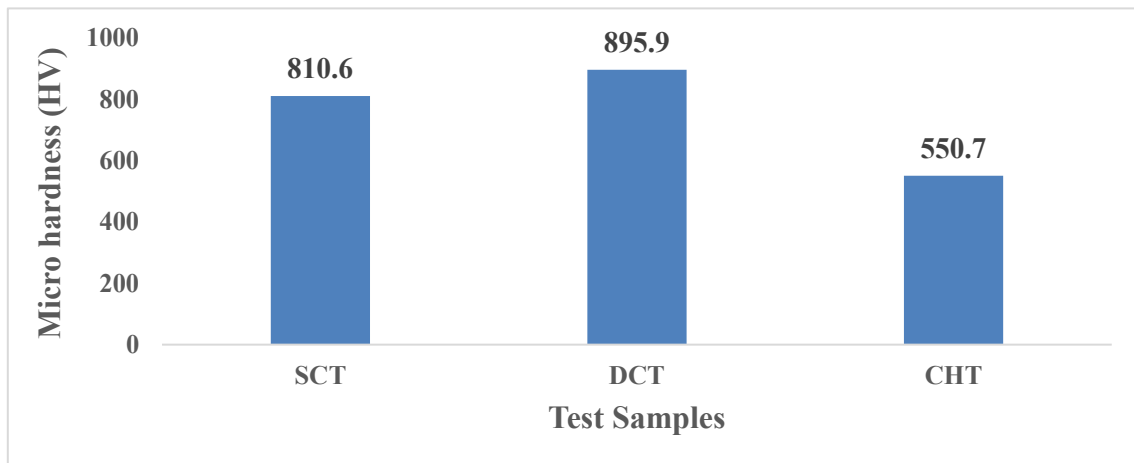


Figure 1. Hardness changes of the samples.

The average microhardness value measured in the reference sample that did not undergo cryogenic treatment was 728 HV. In the sample subjected to shallow cryogenic treatment (SCT), this value reached 745 HV, while in the sample subjected to deep cryogenic treatment (DCT), it reached 750 HV. These results indicate that SCT and DCT treatments provide hardness increases of approximately 2.3% and 3%, respectively. The limited increase obtained is attributed to the transformation of retained austenite into martensite due to the low-temperature effect and changes in the phase distribution of the microstructure. However, in CPR steel with initially high hardness values, the absolute value of the increase remained low due to the limited amount of retained austenite that could be transformed.

Considering the test methods, the Vickers hardness measurement test was applied to the CPR cold work tool steel. The transformation of more residual austenite to martensite at low temperatures led to a high hardness value in the DCT sample. This method is used for mechanical evaluation of material properties. (C. L. Mambuscay 2024) carried out a Vickers hardness test on D2 steel, which is equivalent to CPR steel, under a load of 10N. As a result of the experiment, he observed a significant increase in hardness from 243 HV to 787 HV.

3.2. Evaluation of Impact Energy

The effects of different cryogenic treatment types (SCT and DCT) applied to cold work tool steel on impact resistance are presented comparatively in Figure 2. Impact tests were performed using the Charpy V notch method, and average energy absorption values were calculated by testing samples from each group. The findings indicate that both shallow (-80°C) and deep (-180°C) cryogenic treatments have a negative effect on impact strength. A decrease of 56.1% in impact resistance was observed in the SCT group, and 52.63% in the DCT group. This decrease is attributed to the increased brittleness of new martensite phases formed in the microstructure due to low temperatures and the intensification of microcrack formation after quenching. Additionally, as noted in the literature, internal stresses resulting from the transformation of austenite to martensite and fracture sources (such as oxide, sulphur, and nitride inclusions) concentrated at the fracture surface are believed to reduce impact energy.

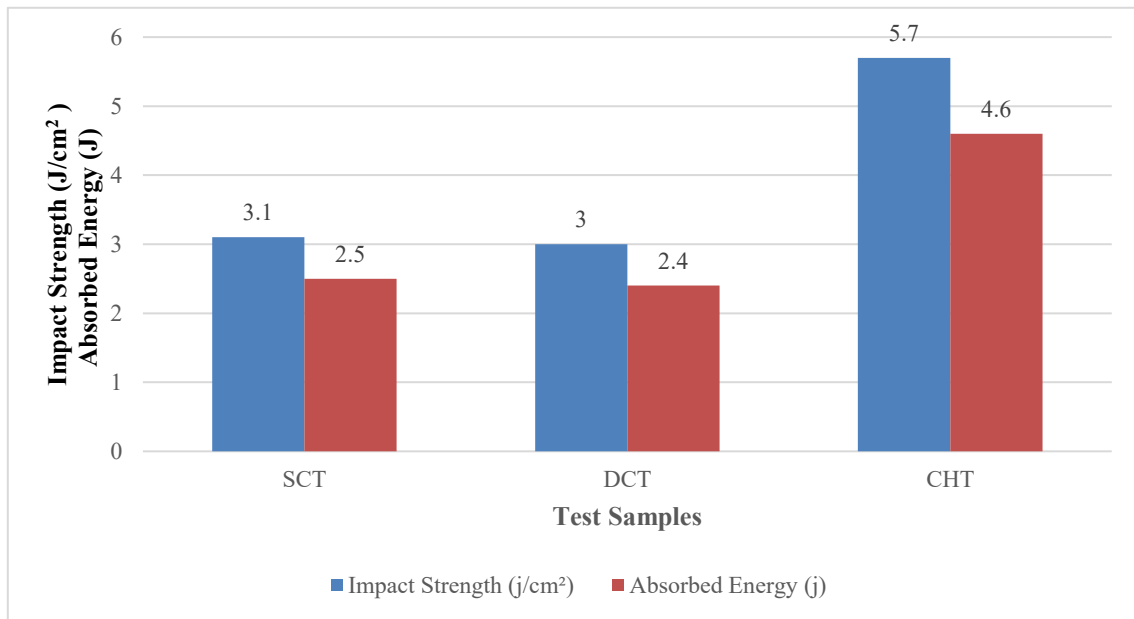


Figure 2. Impact strength of specimens.

The existing martensite phase in the microstructure is converted into tempered martensite by tempering. By tempering, austenite phase is converted into martensite and martensite volume is increased. Tempered martensite phase is known to improve impact strength. However, the hard and brittle new martensite phase caused by residual austenite adversely affects the impact strength (Senthilkumar et al., 2011).

Hyun Wook Lee et al (2022) proved that 2Mn5Ni steel provides approximately 12 times more impact energy absorption than Fe-6Mn-0.1C (6Mn) steel after cryogenic treatment and also suggested that cryogenic treatment significantly affects the impact and toughness of the material. When analysed in terms of impact analysis, it has been shown that fracture surfaces are usually triggered by compounds such as non-metallic residues oxides, sulphides and nitrides, i.e. as the temperature increases, the size of the elements that trigger fracture also increases. In the literature, there is an interaction between impact strength and toughness, when the effects of impact strength on toughness are examined; While the toughness value decreases with the increase in hardness in some studies, there are studies reporting improvements in the toughness value with increasing hardness in some studies.

When we evaluate the CPR steel, when the impact energies of SCT and DCT specimens, the fracture energies of the test specimens with shallow and deep cryogenic treatment and the fracture energies of the test specimens with only conventional heat treatment are compared; The SCT specimen showed a decrease in fracture energy values by 56.1% and the DCT specimen by 52.63%. N. Afzali et al. (2024) determined the density of brittle cracks and micro-particles on fracture surfaces under low temperature conditions and observed an increase of 15-20% in microcrack density. This proves that microcracks in the ferritic phase increase the brittle characteristic of fractures.

4. RESULT

In this study, the effects of shallow (-80 °C) and deep (-180 °C) cryogenic treatments on the hardness and impact strength of CPR cold work tool steel were systematically investigated. The results obtained show that cryogenic treatment causes significant changes in the mechanical properties of the material, especially in terms of impact strength. While limited increases in hardness values were observed, impact strength decreased by 56.1% and 52.63% in SCT and DCT samples, respectively. This was attributed to martensite transformations and changes in the amount of residual austenite. When compared with the literature, it is seen that similar treatments on different steel types generally give favourable results. However, the effects of cryogenic treatment vary depending on the treatment temperature, duration, material type and application method. In this context, this study, which was carried out on CPR steel, fills the gap in the literature and is an important reference for future studies.

Main results obtained:

- After the cryogenic treatment applied to CPR steel, an increase of approximately 3% in hardness values was observed.
- Impact strength decreased by 56.1% in SCT specimens and 52.63% in DCT specimens.
- Deep cryogenic treatment (DCT) caused more residual austenite to be transformed into martensite under the influence of low temperatures, resulting in phase changes in the microstructure.
- While the tempering process stabilises the martensite phase, in some cases the formation of new martensite phases leading to embrittlement can also adversely affect the impact strength.
- As stated in the literature, the effects of cryogenic treatment vary depending on process temperature, time, material structure and application conditions.
- There are a limited number of studies in the literature on the application of cryogenic treatment on CPR steel, and this study makes an important contribution to fill this gap.

In this study, the effects of shallow (-80 °C) and deep (-180 °C) cryogenic treatments applied to CPR cold work tool steel on microhardness, impact resistance and microstructure were systematically investigated. As a result of cryogenic treatments, an approximate 3% increase in hardness values was obtained, which was attributed to the transformation of austenite into martensite. In contrast, a decrease of 56.1% and 52.63% in impact strength was observed in the SCT and DCT groups, respectively. Microstructure analyses revealed that the increase in brittle martensite phases and microcrack formation were decisive factors in this decrease. The results indicate that cryogenic treatment provides limited hardness gain in CPR steel while negatively affecting impact performance.

Acknowledgements

This study is supported by Düzce University Research Fund Project Number: 2025.06.051588 (**Project title:** Investigation of the Effect of Subzero Treatment on Mechanical and Metallurgical Properties of CPR Cold Work Tool Steel - Sıfırlı İşlemin CPR Soğuk İş Takım Çeliğinin Mekanik ve Metalürjik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi).

References

- Afzali, N., Jabour, G., Stranghöner, N., & Langenberg, P. (2024). A comparative study into the fracture toughness properties of duplex stainless steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108283. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108283>.
- García-León *vd.*, R. A. “Effect of Heat Treatments on the Strain Hardening Behavior of AISI 1045 and 304 Steels”, *J Mater Eng Perform*, Ekim. 2024, <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10251-w>.
- Islam, A., & Yilmaz, M. (2020). Tool life improvement via cryogenic treatment: A case study. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.008>.
- Lee, H. W., Park, T. M., Seo, N., Lee, S. J., Lee, C., & Han, J. (2022). Design of low-Ni martensitic steels with novel cryogenic impact toughness exceeding 190 J. *Materials Science and Engineering: A*, 840, 142959. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142959>.
- Ptacinova, J., Jurči, P., Yarasu, V., Dlouhý, I., & Horník, J. (2024). Effect of cryogenic treatments on hardness, fracture toughness, and wear properties of Vanadis 6 tool steel. *Materials*, 17(7), 1688. <https://doi.org/10.3390/ma17071688>.
- Salehi, M., & Jafari, H. (2021). Cryogenic toughening in martensitic tool steels. *Steel Research International*, 92(3), 2100076. <https://doi.org/10.1002/srin.202100076>.
- Senthilkumar, D., Rajendran, I., Pellizzari, M., & Siirainen, J. (2011). Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual stress state of 4140 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), 396–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.011>.
- Şirin, Ş., & Şirin, E. (2020). AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi üzerine bir derleme. *Politeknik Dergisi*, 23(3), 739–747. <https://doi.org/10.2339/politeknik.574481>.

ABSTRACT PRESANTATION/ ÖZET SUNUMLAR

PERLİT/EPDM KAUÇUKLARIN ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ali ÖTELEŞ¹, İlker KÖPRÜ¹, Salih Hakan YETGİN²

¹Seçil Kauçuk San. ve Tic. A.Ş., Tarsus, Mersin, Türkiye, alio@seciltr.com,
ilker.kopru@seciltr.com

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus,
Mersin, Türkiye, shakanyetgin@tarsus.edu.tr

Özet

Bu çalışmada farklı oranlarda perlit ilaveli EPDM kauçukların reolojik, mekanik ve yanmazlık özelliklerine perlit katkısının etkisi incelenmiştir. Perlit katkısı EPDM kauçuğuna 11.5, 24.5 ve 55 phr oranlarında ilave edilmiştir. Laboratuvar tipi banbury kullanılarak hamur haline getirilen EPDM kauçukları preste vulkanize edilmiş ve test plakaları üretilmiştir. EPDM kauçuğun reolojik özellikleri Reometre testi ile incelenmiştir. Çekme testinin yanında kalıcı deformasyon testi, abrasif aşınma testi ve sertlik testleri yapılmıştır. UL-94-HB testi perlit ilaveli EPDM kauçukların yanmazlık özellikleri belirlenmiştir. Perlit miktarının artması ile minimum tork (ML) ve maksimum tork (MH) artmıştır. EPDM/20K kauçuğun 58 Shore A olan sertlik değeri 22phr oranında perlit ilavesi ile %7.9 oranında artarak 63 Shore A elde edilmiştir. Çekme mukavemeti ve kopma uzaması azalırken kalıcı deformasyon ve abrasif aşınma miktarı artmıştır. EPDM/20K kauçuğunun 1.999mA olan elektrik akımı değeri perlit ilavesi ile 0.025-0.441mA aralığına kadar azalmıştır. EPDM/20K kauçuğuna ilave edilen farklı oranlarda perlit yanma hızını azaltırken en düşük yanma hızı EPDM/20K/11.5P kauçuğunda elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: EPDM, perlit, yanmazlık, reoloji, mekanik özellikler

Kıkırdak Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin GO Katkılı PCL İskelelerin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu

Alpay KÖSE^{1*}, Cem Bülent ÜSTÜNDAĞ²

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, Biyomühendislik 34220, İstanbul, Türkiye, kosealpay34@gmail.com

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye, cbustundag@gmail.com

Özet

Kıkırdak doku hasarlarının onarımı, bu dokunun sınırlı kendini yenileme kapasitesi nedeniyle önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu nedenle, doğal dokuya yapısal ve mekanik açıdan benzer özellikler taşıyan biyomimetik iskelelerin geliştirilmesi, kıkırdak doku mühendisliğinde öncelikli hedeflerden biri haline gelmiştir. Bu çalışmada, kıkırdak doku mühendisliği uygulamalarına yönelik olarak üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi kullanılarak, grafen oksit (GO) katkılı poli(ε-kaprolakton) (PCL) esaslı iskeleler tasarlanmış ve üretilmiştir. Elde edilen iskeleler hem yapısal bütünlük hem de biyolojik uyumluluk açısından kıkırdak dokunun gereksinimlerini karşılayacak şekilde optimize edilmiştir. İskelet yapılarının üretimi sırasında, katmanlar arası hizalanma ve baskı sürecindeki akış stabilitesi optik mikroskop yardımıyla izlenmiş, basılabilirlik ve yapısal bütünlük başarıyla sağlanmıştır. Kimyasal karakterizasyonlar kapsamında Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile fonksiyonel gruplar analiz edilirken kristal yapının analizinde ise X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanılmış ve GO'nun yapısal düzende meydana getirdiği değişiklikler incelenmiştir. Ayrıca, iskelelerin mekanik uygunluğu değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar kıkırdak dokunun yük taşıma özelliklerini karşılayabilecek düzeyde olduğunu göstermiştir.

Çalışma sonucunda, GO katkısının iskelelerin mekanik dayanımı ve yapısal stabilitesine olumlu etkiler sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bu biyomimetik yapılar, kıkırdak rejenerasyonu amacıyla yapılacak daha ileri düzey *in vitro* ve *in vivo* çalışmalar için potansiyel bir temel teşkil etmektedir. Bu yönüyle çalışma, 3B yazıcı teknolojisiyle fonksiyonel biyomalzemelerin üretimi ve özelleştirilmesine dair önemli bir adım sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: PCL, GO, kıkırdak doku, 3B yazıcı.

Parçalı Kalıp Sistematiği ile Kalıp İçerisinde Altı Köşe Sw22 Formunun Simülasyon Destekli Tasarım Doğrulaması

Furkan BELLİBAŞ¹, Cihan Ali BAHAR, Metehan KAYRETLİ, Burak GÜLMEZ

¹Ar-Ge Mühendisi, BOLT Bağlantı Elemanları San. Tic. A.Ş.,
Furkan.bellibas@bolt.com.tr, Cihan.bahar@bolt.com.tr, Metehan.kayretli@bolt.com.tr,
Burak.gulmez@bolt.com.tr

Özet

Bağlantı elemanı üretimi için kullanılan yöntemlerden biri olan soğuk dövme prosesi, malzemenin plastik şekil alabilme özelliğine dayalı olarak tasarlanmaktadır. Bu yöntem; dar geometrik toleranslar içerisinde yüksek mukavemetli bağlantı elemanı üretiminde kullanılır ve oldukça hızlı ve seri üretim olanağı sağlar. Bu çalışma, altı köşe (Altı köşe ölçüsü: 21.88 mm - SW22, Altı köşe yüksekliği 14 $\pm$ 0.35 mm) kafa form oluşumunun geleneksel yöntemlerin (çapaklama, kesme) dışına çıkılarak parçalı kalıp sistematiği ile kalıp içerisinde oluşturulması amacıyla yürütülen tasarım ve simülasyon çalışmalarını içermektedir. Çalışma konusu parça SW22 altı köşe kafa formu, flanş (flanş çapı: Ø31 mm) ve kafa altı kademe (kademe yüksekliği min. 10 mm) bölgesinden oluşan özel bir bağlantı elemanıdır. AK kafa, flanş ve kademe bölgelerinin soğuk dövme prosesinde tek bir operasyon adımıyla oluşturulması hedeflenmektedir. Parçalı kalıp seti oluşturulurken dikkat edilmesi gereken parametreler bulunmaktadır. Bunlar; şekillenme kesitlerini oluşturan yüzeyler olup, her şekillendirme için birbirine sıkı geçme olan ayrı kalıplar tasarlanmıştır. Geliştirilen parçalı kalıp tasarımlarının simülasyonları neticesinde kalıp içerisinde altı köşe (SW22) kafa formu, flanş, kademe bölgeleri oluşturulmuş ve keskin kenarlar üzerinde oluşan eşdeğer gerilme değeri ise yaklaşık 759 MPa olarak ölçülmüştür. Bu kapsamda özel kalıp set tasarımı ile fazladan atık malzeme (çapak) oluşumu meydana gelmeden çalışma konusu parçanın simülasyon ortamında üretilebilirliği tespit edilmiştir. Elde edilen çıktılar değerlendirildiğinde teknik resim – tasarım – simülasyon çıktısı ölçüsel olarak %99 oranında benzerlik göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Simülasyon, Bağlantı Elemanı, Soğuk Dövme

MOLİBDEN DİSÜLFİT (MoS₂) KATKILI ETİLEN-PROPİLEN-DİEN-MONOMER (EPDM) KAUKUKLARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Çağrı ÇOKAÇAR¹, İlker KÖPRÜ¹, Salih Hakan YETGİN²

**¹Seçil Kauçuk San. ve Tic. A.Ş., Tarsus, Mersin, cagric@seciltr.com,
ilker.kopru@seciltr.com**

**²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus,
Mersin, shakanyetgin@tarsus.edu.tr**

Özet

Bu çalışmada Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) kauçuğu katı yağlayıcı olarak kullanılan molibden disülfid (MoS₂) tozu ile 25, 55 ve 90 phr olmak üzere 3 farklı oranda laboratuvar tipi 1.5 lt'lik mini banbury kullanılarak üretilmiştir. EPDM/MoS₂ kompozitlerin mekanik, reolojik ve morfolojik özellikleri üzerine MoS₂ katkının etkisi incelenmiştir. EPDM kauçuğuna ilave edilen farklı oranlardaki MoS₂, tork değerlerini artırırken pışme başlangıç süresini azaltmıştır. 90phr oranındaki MoS₂ ilavesi Mooney viskoziteyi %126 oranında artırmıştır. Mekanik testler sonucunda kopma mukavemeti, kopma uzaması, elastikiyet ve yırtılma dayanımının MoS₂ katkısı ile azaldığı ancak aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, 55phr MoS₂ katkılı EPDM kompozitin en iyi sonuçları sergilediği ve EPDM esaslı kompozitlerin üretiminde en uygun aday malzeme olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: EPDM, Molibden disülfid (MoS₂), Reoloji, Mekanik özellikler

Eklemlı İmalat Yöntemiyle Üretilen Cam Ve Karbon Elyaf Takviyeli Poliamit

Kompozitlerin İşlenebilirliğinin Araştırılması

Mevlüt AYRAN¹, Şakir YAZMAN², Uğur KÖKLÜ³

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

²Selçuk Üniversitesi İlgın Meslek Yüksek okulu

³Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Özet

Elyaf takviyeli polimer (ETPK) kompozitler, üstün mukavemet-ağırlık oranı, korozyon dayanımları ekstrem koşullar altında yüksek performansı nedeniyle uçak, otomobil, robotlar ve makineler gibi çeşitli mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. ETP kompozitlerin katmanlı üretimi veya üç boyutlu (3D) baskısı, karmaşık şekiller üretme ve malzemenin elyaf yönelimini değiştirme kabiliyeti nedeniyle popülerlik kazanmaktadır. Genellikle ekstrüzyon yoluyla üretilirler ve bu nedenle bu malzemeler ek işleme operasyonları gerektirir. Hassas işleme, yüksek boyutsal doğruluk ve kabul edilebilir yüzey bütünlüğü ile gelişmiş bileşenlerin üretimini amaçlamaktadır. Yapılan bu çalışmada kırılmış cam ve karbon elyaf takviyeli poliamid filament kullanılarak eriyik biriktirme yöntemi (EBY) ile üretilmiş kompozit malzemelerin işlenebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla %15 karbon elyaf ve %30 cam elyaf oranına sahip poliamid matrisli kompozitler, 32 mm³/s filament akış hızında, 0.3 mm katman kalınlığında 250 °C baskı sıcaklığında 150x80x10 boyutlarında üretilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri için literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurularak üç farklı iş mili devir sayısı (1500, 3000 ve 4500 dev/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (300, 600 ve 1200 mm/dev) seçilmiştir. Bu değerler kullanılarak kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre, ilerleme hızı arttıkça hem kesme kuvvetleri hem de yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. Devir sayısındaki artış ise genellikle bu değerlerde azalma sağlamıştır. SAF malzemesi, tüm koşullarda en yüksek kesme kuvveti ve pürüzlülük değerlerini göstererek düşük işlenebilirlik performansı sergilemiştir. Karbon elyaf malzemesi ise hem düşük kesme kuvvetleri hem de düşük Ra değerleriyle en iyi işlenebilirliği sunmuştur. Cam elyaf malzemesi, orta seviyede performans göstererek ekonomik üretim açısından uygun bir denge sunmuştur.

Sonuç olarak, FDM yöntemiyle üretilen takviyeli kompozit malzemelerin uygun kesme parametreleri altında işlenebilirliğinin optimize edilebileceği gösterilmiştir. Yüksek devir ve düşük ilerleme kombinasyonları, yüzey kalitesini de artırmaktadır. Bu çalışma, FDM ile üretilen ileri düzey polimer kompozitlerin talaşlı imalat süreçlerindeki davranışlarını anlamaya katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Eklemlı imalat, FDM, Poliamit, Cam elyaf, Karbon elyaf, İşlenebilirlik

Polimer-Nano Kompozitlerinin Çimento Öğütme Yardımcısı Olarak Kullanılması

Sonnur GÖKÇE¹, Ferda ESER²

¹sonnurgokce@hotmail.com

²Amasya Üniversitesi, ferda.eser@amasya.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, polimer içinde sentezlenen gümüş nanopartiküllerin (AgNP) çimento öğütme prosesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda gümüş nanopartikülleri antibakteriyel etkilerinden dolayı dış çimentolarında kullanılmıştır. Bu çalışma ile ilk kez çimento öğütmesinde kullanılmıştır. Literatürde, nanopartiküllerin çimento kompozitlerinin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Ancak, PCE bazlı çimento katkı sistemlerinde hem fiziksel dağılımı iyileştirme hem de mekanik dayanıklılığı artırma potansiyeli taşıdığı düşünülmüş ve bu konudaki literatür çalışmaları eksik görülmüştür.

Araştırmanın temel amacı, çevresel olarak daha sürdürülebilir ve kontrollü bir yöntemle polimer bazlı AgNP sentezlemek ve bu nanopartiküllerin çimento öğütme performansı üzerindeki katkılarını değerlendirmektir. Sentezde polikarboksilateter (PCE) bazlı bir polimer kullanılmıştır. Sentezlenen nanopartiküller karakterize edilmek üzere UV-Vis spektroskopisi analizlerine tabi tutulmuştur.

AgNP katkılı çimento karışımları, standart Portland çimentosu ile karşılaştırmalı olarak laboratuvar tipi bilyeli karıştırıcı (atritör) değirmende öğütülmüş, öğütme süresi, dönme hızı sabit tutularak tane boyutu dağılımı ve Blaine özgül yüzey alanı gibi parametreleri karşılaştırılmış ve son olarak sentezlenen AgNP içeren öğütme yardımcısı ile öğütülen klinkerin çimento eğilme, yayılma ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, AgNP katkısının belirli oranlarda öğütme verimliliğini artırdığını, tane boyutunu küçülttüğünü ve özgül yüzeyi artırdığını göstermektedir. Bu da çimento üretiminde enerji tasarrufu sağlanabileceğine ve malzeme performansının iyileştirilebileceğine işaret etmektedir.

Bu çalışma, nanoteknolojinin çimento endüstrisindeki yeni uygulama alanlarını göstermesi açısından önem arz etmektedir. İlerleyen çalışmalarla birlikte, farklı nanoparçacık türleri ve polimer sistemleriyle benzer çalışmalar yapılması önerilmektedir. Aynı zaman da çimento sektörü için yenilikçi bir alternatif olarak değerlendirilen bu çalışma bir sonraki çalışmalar için ışık tutacak niteliktedir.

Anahtar kelimeler: Gümüş nanopartikül, öğütme yardımcısı, çimento

23.06.2025

ISBN: 978-625-96918-8-6

ASES PUBLICATIONS – 2025©