

Makina Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Yeni Nesil Mühendislik Çalışmaları

Editör: Doç. Dr. Yusuf FEDAI

```
/: DF02ER 121CV5063 --DWW 12  
/: DVB-ERO-TL...L...LZLD.VLLL  
/: 13ATVN34 56 326F 235 50  
/: 135 325CVERY2 355 88  
/: CCRNFT 2334 13532 5551556  
/: 1245 345YXQVNM 1345 RERY  
/: 1245VSTHMY YYY YAGULLIO
```

```
/:R513154 14548731/*41134343  
/:ZAF13251 5152454 1321X 1 3 41 1 1 123  
/:321501123 SDF3T E R VEG JSFTG1 4  
/:13211 ACDCW HHTY Z121 454///Z GF  
1223
```



Makina Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Yeni Nesil Mühendislik Çalışmaları

Editör:

Doç. Dr. Yusuf FEDAI



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgur yayinlari.com

✉ info@ozgur yayinlari.com

Makina Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Yeni Nesil Mühendislik Çalışmaları

Editor: Doç. Dr. Yusuf FEDAI

Language: Turkish-English

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8562-30-9

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1093>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Fedai, Y. (ed) (2025). *Makina Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Yeni Nesil Mühendislik Çalışmaları*. Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1093>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgur yayinlari.com/>



Ön Söz

Makina mühendisliği, günümüz dünyasında yalnızca geleneksel üretim ve tasarım süreçleriyle sınırlı kalmayıp; enerji, ulaşım, çevre ve sürdürülebilirlik gibi stratejik alanlarda yenilikçi çözümler üreten çok disiplinli bir mühendislik dalı haline gelmiştir. Bu doğrultuda hazırlanan “Makina Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Yeni Nesil Mühendislik Çalışmaları” adlı bu kitap, alanın güncel gelişmelerini ve geleceğe yön veren teknolojik yaklaşımlarını bütüncül bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır.

Kitapta yer alan bölümler; nükleer enerjide küçük modüler reaktörlerin (SMR) sunduğu yeni fırsatlar ve Türkiye’nin bu alandaki stratejik yaklaşımı, elektrikli araç teknolojilerinin teknik, enerjetik ve çevresel boyutları, elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan sensörlerin üretim süreçleri ve uygulama alanları ile döküm odaklı ürün tasarımı ve konstrüksiyon ilkeleri gibi güncel ve kritik konuları kapsamaktadır. Bu başlıklar, makina mühendisliğinin enerji dönüşümü, akıllı sistemler ve ileri imalat teknolojileriyle olan güçlü etkileşimini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu eser; akademisyenler, lisansüstü öğrenciler ve sektörde çalışan mühendisler için hem teorik bir başvuru kaynağı hem de uygulamaya yönelik yol gösterici bir çalışma niteliği taşımaktadır. Kitabın, makina mühendisliğinde yenilikçi düşüncüyü teşvik etmesi ve yeni nesil mühendislik çalışmalarına katkı sağlaması temennisiyle, emeği geçen tüm yazarlarımıza ve özgür yayınevi çalışanlarına teşekkür ederim.

İçindekiler

Ön Söz

iii

Bölüm 1

A New Era in Nuclear Energy: Small Modular Reactors and Türkiye's Approach

1

Furkan Öz

Ahmet Samancı

Bölüm 2

Döküm Odaklı Ürün Tasarımı ve Konstrüksiyon İlkeleri

31

Tuğçe Tezel

Volkan Kovan

Bölüm 3

Electric Vehicles: Technological, Energetic And Environmental Dimensions

61

Gökhan Öztürk

Ömer Ali Karaman

Bölüm 4

Digital Transformation of Aviation Maintenance: Artificial Intelligence-Enabled Approaches

81

Mustafa Melikşah Özmen

Bekir Aksoy

Bölüm 5

Robotics and AI in Manufacturing for Speedy Recycling

99

Berrin Denizhan

Onur Denizhan

Bor ve Bileşiklerinin Yüksek Performanslı Kompozit Malzeme Uygulamaları 133

Ersin Ünal

Hediye Kırılı Akın

A New Era in Nuclear Energy: Small Modular Reactors and Türkiye's Approach

Furkan Öz¹

Ahmet Samancı²

Abstract

Energy is one of the major issues of today and with the advancement of technology, it will become an even more significant challenge in the future. Obtaining energy from clean sources is of great importance in minimizing global warming and other environmental impacts. At this point, the use of nuclear power plants, which operate with zero carbon emissions, comes into play. Nuclear power plants are generally facilities that produce large amounts of electricity. In recent years, small modular reactors (SMRs) have begun to be developed as an alternative to conventional high-power nuclear power plants, characterized by smaller sizes, modular designs, and shorter construction times. Small modular reactors can serve not only as electricity sources for residential areas and industrial zones, but also for purposes such as seawater desalination and powering icebreaker ships. In this study, the fundamental characteristics, current design approaches, and application areas of small modular reactors which are considered the energy of the future are examined.

1. INTRODUCTION

Sustainability and security of supply in energy have become crucial issues today due to the increasing energy demand. Nuclear energy emerges as a clean and sustainable energy source thanks to its zero carbon emissions and long-term continuous operating regime. With advancing technology, nuclear

-
- 1 Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Konya, Türkiye, furkan199516@gmail.com, ORCID: 0009-0003-6278-738X
 - 2 Prof. Dr., Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Konya, Türkiye, a.samanci@erbakan.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5412-1575

power plants have become safer, equipped with passive safety systems that prevent accidents caused by human error (Kemah, 2017; Nogay, 2016).

High-power nuclear power plants have long and costly construction processes. Therefore, it is difficult for governments and private companies to invest in this area. Small modular reactors (SMR), developed as a solution to this problem, are advancing towards becoming the energy of the future with their low construction costs and short construction times (Topal, 2019).

In addition to power plants that generate electricity for cities and industrial facilities, small modular reactors can be used in icebreaker ships, seawater desalination plants, and mobile nuclear power plants. Today, there are nuclear power plants and icebreakers with small modular reactors in operation. Small modular reactors in operation serve as references for modular reactors in the project phase.

This study examines the technical characteristics, construction advantages and disadvantages, and construction processes of small modular reactors that are under construction and in operation. In addition, the progress of modular reactors in the project phase is evaluated, and our country's perspective on small modular reactors is discussed.

To select the right reactors for the small modular nuclear power plants planned to be built in Türkiye, it is important to examine small modular reactors that are in operation and under construction.

2. LITERATURE REVIEW

(Yurt, 2021), researched the operating principles and construction processes of nuclear reactors and classified them according to their areas of use and technical characteristics. He examined the operating principle and safety systems of the VVER-1200 reactor to be used in the nuclear power plant to be built in our country.

(Öngü, 2014), examined the types of fuel used in nuclear reactors, specified the types of radioactive waste produced as a result of energy production in the reactor, classified the waste according to their radioactivity levels, and discussed disposal methods.

(Topal, 2019), examined nuclear reactors according to their coolant type, evaluated the use of different secondary coolants for a modular reactor, and performed energy and exergy analyses of the reactor.

(İbiş, 2020), stated that fossil fuels other than lignite coal are imported into Türkiye and that the use of lignite coal as an energy source has negative

environmental impacts. He noted that nuclear power plants play a key role in reducing energy dependence on foreign sources.

(Sever, 2019), emphasized the necessity of establishing nuclear power plants to ensure Türkiye's sustainable energy future and discussed the importance of nuclear power plants in terms of energy security and strategy. He stated that nuclear power plants to be established in Türkiye should be equipped with the most modern systems in terms of technology and safety.

(Abdulla, 2014), has researched the potential for the widespread adoption of small modular reactors, evaluated them in terms of cost and construction time, and analyzed the economic feasibility of light water-cooled modular reactors.

(Taso, 2011), in the first section of his study on the current role of small modular reactors, discusses the history of nuclear energy and explains its technical details. In the second section, he addresses small modular reactor projects proposed in the United States and other countries. In the third section, he emphasizes the importance of establishing small modular reactors in countries' energy and economic policies.

(Asuega-Souza, 2022), evaluated small modular reactors in terms of cost, conducted a detailed economic assessment of gas-cooled, light water-cooled, and molten salt small modular reactors, and compared them with natural gas combined cycle power plants.

(Fernández-Arias et al., 2023), examined modular plants with pressurized water reactors (PWR), compared their safety systems, and indicated the current status of planned PWR-type small modular reactors.

(Boening, 2020), researched small modular reactor strategies in developing countries and compared Canada and Kenya, which plan to install small modular reactors in rural areas, in terms of public perception of nuclear energy and safety.

(Franco, 2021), researched the economic sustainability of micro nuclear reactors and small modular reactors, comparing micro reactors, modular reactors, and high-power reactors in terms of electricity generation and cost.

(Godsey, 2019), conducted a life cycle analysis of small modular reactors, evaluating the process from fuel mining to waste disposal, analyzing mining, purification, conversion, enrichment, fuel manufacturing, and waste management processes.

(Lulik, 2020), analyzed how much a small modular reactor would affect the surrounding area in the event of an accident and examined the change

in radiation dose according to distance. His work also included a review describing the technical characteristics of small modular reactors.

(Hussein, 2020), conducted a critical review of developing small modular reactors, evaluating them under the headings of small size, modularity, and design, and classifying them technically.

3. NUCLEAR ENERGY

Nuclear energy is a type of energy obtained by the controlled release of the binding energy in the atomic nucleus. This energy is released through the splitting (fission) or merging (fusion) of atomic nuclei. The most widely used method today is the fission of heavy atoms, particularly uranium or plutonium (Бартоломей et al., 1989).

In the fission process, when an atomic nucleus is bombarded by a neutron, it splits, releasing new elements, neutrons, radiation, and energy. The newly formed neutrons strike heavy atoms, causing the fission to continue in a chain reaction, while the energy released heats the coolant (water, heavy water, sodium, etc.), enabling steam production. This steam turns turbines, converting thermal energy into mechanical energy, and mechanical energy into electrical energy (Raymond L. Murray, 2001).

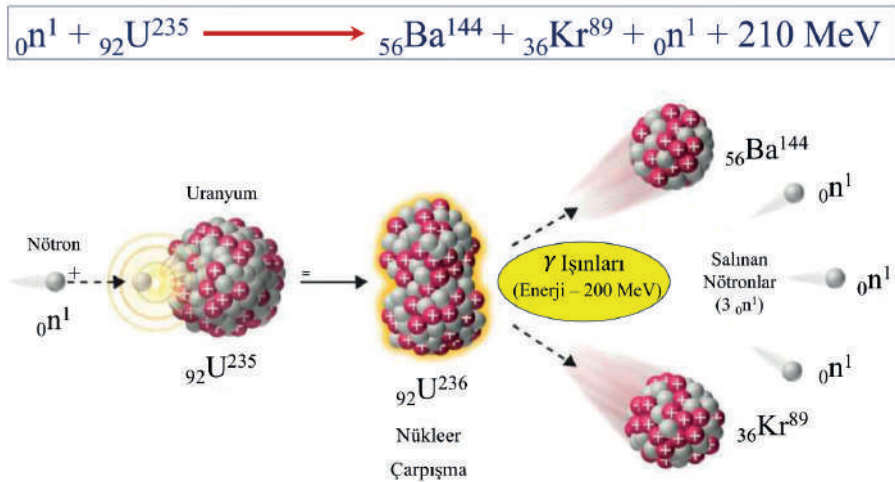


Figure 1 Fission reaction illustration (Alahmad & Taskesen, 2024)

In a chain reaction, there is no carbon emission during the splitting of atoms. In this respect, nuclear energy provides a significant advantage in terms of environmental sustainability. However, due to its radioactivity, it

brings with it important challenges such as the safe disposal of nuclear waste and the prevention of accidents. For this reason, the use of nuclear energy must be carefully considered in terms of its economic, environmental, and safety dimensions(Igor Pioro, 2016).

3.1. Nuclear Power Plants

Nuclear power plants are facilities that generate electricity using the energy released by the splitting of atomic nuclei (fission). Most of these plants use enriched uranium as fuel. Enrichment levels vary depending on the coolant and moderator used(Rubinsteyn & Sepetilnikov, 1982).

The heat generated by fission is transferred to the steam boiler via the coolant. Steam is produced in the steam boiler. The steam enters the turbine and causes it to rotate. During this rotation, electricity is generated by the generators. The steam used in the turbines condenses with the help of a condenser and returns to the steam boiler as water. This creates a closed cycle(Курчатовский, 2015).

The moderator, fuel, coolant, and cycle type used in a nuclear power plant are the factors that determine the basic structure of the plant. The moderator helps the chain reaction occur in a controlled manner. The choice of moderator depends on the fuel used and the enrichment ratio. The type of cycle is selected based on the coolant used and cost considerations. In plants with two or more cycles, the coolant is safer because it is not exposed to radiation in the second cycle and beyond. However, costs increase due to the additional equipment required(Андрюшечко et al., 2010).

Pressurized water reactors (PWR) are the most widely used reactor type worldwide. PWRs use light water as both the coolant and moderator. In reactors that use light water as a moderator, the enrichment ratio of the fuel is higher than in heavy water reactors(Canada deuterium uranium- CANDU) (Kemah, 2017). Economic criteria and available reserves are evaluated when selecting the moderator and fuel.

3.1.1. Classification of Nuclear Power Plants

Nuclear reactors are classified according to their purpose of use as research reactors, commercial reactors, and military reactors. Research reactors are used for nuclear testing rather than for electricity generation. Commercial reactors are used for purposes such as electricity and heat generation, water purification, and providing propulsion power to icebreakers and submarines(Ahmet Ege, 2019).

Based on installed power, they are classified as micro, small, medium, and high-power reactors. Microreactors are generally reactors with an installed electrical power not exceeding 20 MWe. Small modular reactors are reactors with an installed electrical power of to 300 MWe. Medium-power reactors are reactors with an electrical power between 300 MWe and 700 MWe. Reactors with an electrical power output exceeding 700 MWe are classified as high-power reactors (IAEA, 2024c; Liou, 2023; Rowinski et al., 2015).

One of the criteria determining safety in nuclear reactors is the generation to which the reactor belongs. Reactors produced between 1950 and 1970 are referred to as first-generation reactors, those between 1970 and 1995 as second-generation, those between 1995 and 2030 as third-generation, and new-generation reactor projects as fourth-generation reactors. Lessons have been learned from past accidents in new generation reactors, and passive safety systems have been enhanced (Rowinski et al., 2015).

Nuclear reactors go through the following stages from the project phase to commissioning: preliminary design, basic design, conceptual design, detailed design, licensing, equipment manufacturing, and construction (IAEA, 2024a).

4. SMALL MODULAR REACTORS IN THE CONSTRUCTION PHASE AND IN OPERATION

4.1. CAREM

CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) is a small modular reactor of the pressurized water reactor (PWR) type. Developed and manufactured in Argentina, CAREM is designed to meet the electricity needs of small regions. In addition to electricity generation, also planned for use for desalination of seawater (Magan et al., 2011).

The Argentine National Atomic Energy Commission (CNEA) has granted a construction license for CAREM-25, which was initially designed as a prototype. The construction license for CAREM-25 was obtained in 2013, and construction began in 2014. CAREM-25 is planned to pioneer Argentina's future SMR projects and serve as a model for production and licensing processes. Construction of CAREM-25 was suspended for two years in November 2019 and resumed in 2021. The target date for first criticality is 2027 (WNN, 2024a).

Table 1 CAREM-25 Technical Specifications(Marcel et al., 2013; Tashakor et al., 2017)

Country	Argentina
Electric Power	32 MWe
Reactor Type	Pressurized Water Reactor (PWR)
Coolant and Moderator	Water
Primary/Secondary Cycle Pressures	12.25 MPa / 4.7 MPa
Reactor Length / Width	11 m / 3.2 m
Fuel Type	UO ₂ (3.1% enrichment rate)
Fuel Cycle	14 months
Reactor Lifespan	40 Years

The CAREM-25 reactor core is cooled by natural circulation of water. Natural circulation is a convective cooling method that does not require pumps. This minimizes equipment and maintenance costs while ensuring natural cooling under all conditions. As shown in Figure 2, the steam generators are mounted on the reactor vessel. Coolant water and moderators absorb heat from the core, rise, and reach the steam generator. The water transfers its heat to the steam generator and moves downward. This creates natural circulation(Ganjaroodi et al., 2024).

The CAREM-25 reactor is considered a prototype for small modular reactors with an electrical power output between 100 MWe and 300 MWe. It is intended that the data obtained from CAREM-25 and the operational experience gained will be used in future planned small modular reactor projects(Tashakor et al., 2017).

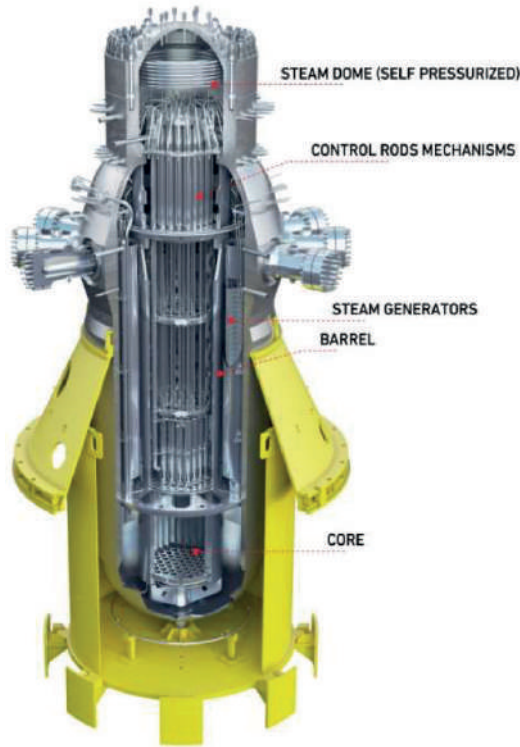


Figure 2 CAREM-25 Reactor Vessel (IAEA, 2022)

4.2. ACP-100

The ACP-100 reactor is a PWR-type small modular reactor designed by the China National Nuclear Corporation (CNNC). Its intended uses are for electricity generation, heat production, and seawater desalination (Ishraq, Rohan, et al., 2024).

The ACP-100 reactor was the first small modular reactor to pass the safety review by the International Atomic Energy Agency (IAEA) in 2016. The China National Nuclear Corporation (CNNC) announced the start of construction of the ACP-100 reactor in 2019, with the first concrete pouring taking place in July 2021. Construction of the reactor building was completed in 2023. The reactor is scheduled to enter commercial operation in 2026 (WNN, 2024b).

Table 2 ACP-100 Technical Specifications (Isbraq, Kruglikov, et al., 2024)

Country	China
Electric Power	125 MWe
Reactor Type	Pressurized Water Reactor (PWR)
Coolant and Moderator	Water
Primary/Secondary Cycle Pressures	15 MPa / 4.6 MPa
Reactor Length / Width	10 m / 3.35 m
Fuel Type	UO ₂ (enrichment ratio 1.9-4.95%)
Fuel Cycle	24 Months
Reactor Life	60 Years

In the ACP-100 reactor, the circulation of cooling water between the reactor core and the steam generator is provided by a pump. Unlike classic high-power PWR reactor designs, the main circulation pumps and steam generator are integrated into the reactor vessel. The ACP-100 reactor has a passive cooling system in addition to the active cooling system. The passive cooling system allows the reactor to cool itself by natural circulation under all conditions(Deng et al., 2020; Xiong et al., 2023).

Mounting the main components to the reactor vessel ensures the reactor's compactness, thereby enabling its use in various types of projects.



Figure 3 ACP-100 Reactor Vessel (Deng et al., 2020)

4.3. HTR-PM

The HTR-PM reactor is a fourth-generation gas-cooled reactor operating at high temperatures. Its initial design was developed by Tsinghua University in 1992 as the HTR-10 with a 10 MWe electrical power capacity. The HTR-10 was operated at full capacity in 2003 and served as a reference for the HTR-PM, which received its construction license in 2012. HTR-PM reached criticality in 2021 and was operated at full power (210 MWe) in 2022(IAEA, 2022; J. Zhang et al., 2018).

Table 3 HTR-PM Technical Specifications(S. Wu et al., 2023; Z. Zhang et al., 2006)

Country	China
Electrical Power	210 MWe
Reactor Type	High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)
Coolant / Moderator	Helium / Graphite
Primary / Secondary Cycle Pressures	7 MPa / 13.25 MPa
Reactor Length / Width	25 m / 5.7 m
Fuel Type	Pebble bed (spherical, 7 grams) UO ₂ (8.5% enrichment)
Fuel Cycle	Continuous (Used fuel can be taken out for interim storage, new fuel can be added)
Reactor Lifespan	40 Years

In the HTR-PM reactor, the fuel consists of five-layered spheres weighing 7 grams. At the center of the sphere is UO₂(Uranium dioxide), while the outer layers consist of pyrocarbon and silicon-carbon carbide coatings of low, medium, and high densities. This allows the high temperature generated at the center of the sphere to be transferred to the coolant in a balanced manner, while limiting the radiation escaping from the sphere's center (Knol et al., 2018).

Fuel spheres can be removed from and added to the reactor as they are used (B. Wu et al., 2022). The ability to change fuel without stopping the reactor ensures continuity in electricity production.

The HTR-PM reactor has two reactor modules and two steam boilers. The heat generated by the fuel is transferred to the steam boiler via helium gas. Helium gas entering the reactor at a temperature of 250 °C heats up to 750 °C, exits the reactor, and enters the steam boiler. The helium gas is returned to the reactor by a compressor. The feed water entering the steam

generator is converted into steam at a temperature of 567 °C and enters the turbine(S. Wu et al., 2023).

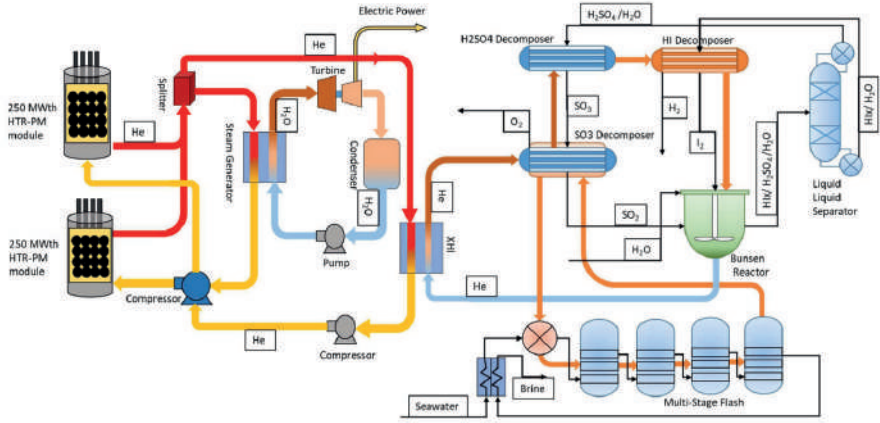


Figure 4 HTR-PM Cycle Diagram(González Rodríguez et al., 2023)

4.4. KLT-40S

The KLT-40S reactor is the first floating nuclear power plant project designed by the Afrikanov OKBM company. The aim of the project is to make the nuclear power plant mobile and deliver electrical energy to regions in need. The construction process of nuclear power plants is long and complex. Building a nuclear power plant in areas where land transportation is difficult is quite costly and complex. The KLT-40S reactor, together with the ship named Akademik Lomonosov, has solved this problem by operating as a floating power station(Makeev, 2015).

The KLT-40S reactor reached criticality in 2018, was shipped to the city of Pevek in the far north of Russia in 2019, and began generating electricity in 2020(Maksimov & Mazjarkin, 2023).

Table 4 KLT-40S Technical Specifications (Bagus Awienandra et al., 2020; Beliaevskii et al., 2023)

Country	Russia
Electrical Power	35 MWe
Reactor Type	Pressurized Water Reactor (PWR), Ship-mounted reactor vessel
Coolant and Moderator	Water
Primary/Secondary Cycle Pressures	12.7 MPa
Reactor Length / Width	4.8 m / 2 m
Fuel Type	UO ₂ (14.1-18.6% enrichment)
Fuel Cycle	28-36 months
Reactor Lifespan	40 Years

The Akademik Lomonosov ship consists of two KLT-40S reactors, each with a capacity of 35 MWe. The heat generated in the reactor core is transferred to the steam boiler via circulation pumps. The steam generated in the steam boiler drives the turbines to produce electrical energy. The electrical energy is transferred from the port where the ship docks to the region’s electrical grid(Зведев et al., 2018).

The KLT-40S reactor is used for city heating when needed, in addition to the electricity it produces. The Akademik Lomonosov ship provides electricity to the city of Pevek with the energy it produces, while also playing a role in heating the city(Makeev, 2015).

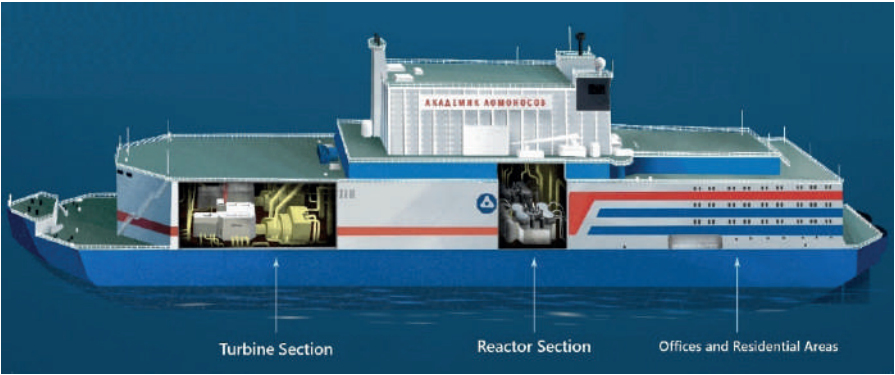


Figure 5 Akademik Lomonosov Ship(TACC, 2022)

4.5. RITM-200

The RITM-200 reactor was designed by Russia to power icebreaker ships. It was first installed on the Arktika icebreaker in 2016, and the ship entered service in 2020. Subsequently, the Sibir icebreaker in 2021 and the Ural icebreaker in 2022 were commissioned with the RITM-200 reactor. The Yakutiya icebreaker is expected to be commissioned with the RITM-200 reactor in 2025, followed by the Chukotka icebreaker in 2026(Атомная, 2024).

Afrikanov OKBM, which designed the RITM-200 reactor, also designed the nuclear power plant version of the reactor, RITM-200N, in 2018 for installation in the Yakutsk region. Construction of the Yakutsk Nuclear Power Plant, for which a license was obtained in 2023, is scheduled to be commissioned in 2027(Базин & Гиниятуллин, 2022).

Table 5 RITM-200 Technical Specifications (Petrinin et al., 2019)

Country	Russia
Electrical Power	55 MWe
Reactor Type	Pressurized Water Reactor (PWR),
Coolant and Moderator	Water
Primary/Secondary Cycle Pressures	15.7 MPa / 3.83 MPa
Reactor Length / Width	7.5 m / 3.4 m
Fuel Type	UO ₂ (up to 20% enrichment rate)
Fuel Cycle	5-7 years
Reactor Life	60 Years

The RITM-200 reactor vessel is compactly designed to minimize the risk of damage to pipe and equipment connection points during ship motion. The steam generator, circulation pumps, and reactor vessel are integrated into a single unit. This design minimizes the installation volume while enabling the simultaneous use of multiple reactor vessels, thereby allowing for higher power outputs(Zverev et al., 2013, 2019).



Figure 6 RITM-200 Reactor Vessel (Zavodfoto, 2022)

4.6. BREST-300

BREST-300 is a lead-cooled fast neutron reactor. The BREST-300 reactor was designed by Russia in 2016, and construction began in the city of Seversk in 2021. The reactor is scheduled to be commissioned between 2028 and 2029. Once commissioned, the BREST-300 reactor will also play a role in city heating in addition to electricity generation (Interfax, 2024).

The BREST-300 reactor uses a mixed fuel derived from spent nuclear fuel from other power plants. This allows for the recycling of spent nuclear fuel while generating electricity (ФЭИ, 2024).

Table 6 BREST-300 Technical Specifications(Makarov, 2023; Novoselov et al., 2014)

Country	Russia
Electrical Power	300 MWe
Reactor Type	Lead-Cooled Fast Neutron Reactor (BREST)
Coolant and Moderator	Lead
Primary/Secondar Cycle Pressures	Atmospheric Pressure / 18.5 MPa
Reactor Length / Width	17.5 m / 26 m
Fuel Type	Uranium, Plutonium, Nitride Mixture (MOX-Mixed Oxide Fuel)
Fuel Cycle	5-7 Years
Reactor Lifespan	30 Years

The core coolant of the BREST-300 reactor is liquid lead, which reaches its boiling point at 1727 °C. When the reactor is in operation, the coolant reaches a maximum temperature of 420 °C, allowing the reactor vessel to operate at atmospheric pressure. This reduces material costs and eliminates safety risks associated with pressure. Thanks to the fuel mixture used, the reactor can reduce its own reactivity in the event of reactivity increases(Gol'din & Pestryakova, 2014; ФЭИ, 2024).

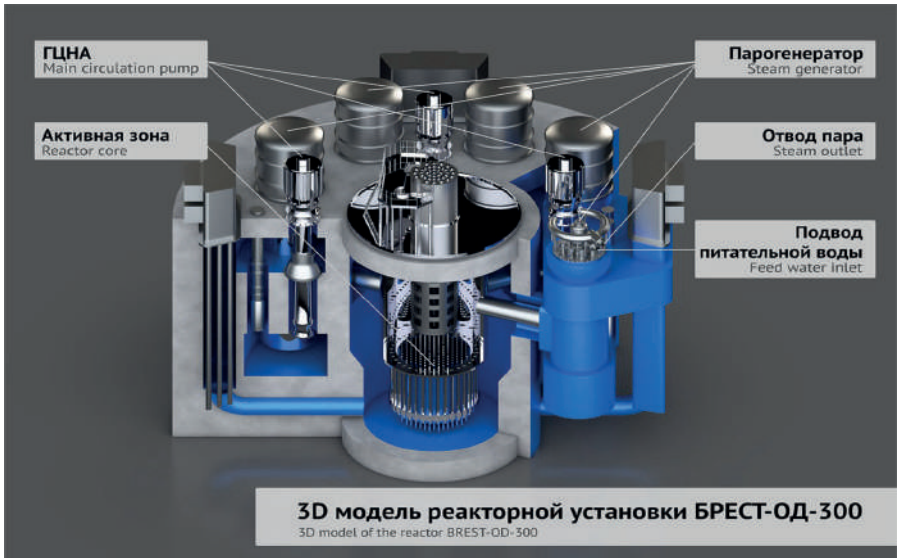


Figure 7 BREST-300 Reactor Vessel(Orlov & Gabaraev, 2023)

4.7. KP-FHR

The KP-FHR reactor is a fourth-generation molten salt-cooled pebble-bed reactor. This advanced reactor technology was designed by the American company Kairos Power with the aim of reducing production and maintenance costs without compromising safety. The conceptual design of the KP-FHR reactor was completed in 2018, and construction of the first engineering test unit (ETU 1.0) began in 2021 and was completed in 2023. In 2024, construction of the Hermes test reactor began in Tennessee, with commissioning expected in 2026(IAEA, 2024b).

Table 7 KP-FHR Technical Specifications(Kairos, 2024; Zhao et al., 2023)

Country	United States
Electrical Power	140 MWe
Reactor Type	Pebble Bed Molten Salt Reactor
Coolant / Moderator	Li ₂ BeF ₄ (Flibe) / Graphite
Primary / Secondary Cycle Pressures	Atmospheric Pressure
Reactor Length / Width	7.2 m / 3.9 m
Fuel Type	TRISO Pebble Bed (up to 19.75% enriched)
Fuel Cycle	Continuous (Used fuel can be taken out for storage, new fuel can be added)
Reactor Lifespan	80 Years

The KP-FHR reactor is a state-of-the-art, innovative, fourth-generation reactor that uses fluoride salt for cooling in its first cycle and gravel-bed fuel in its core. Using fluoride salt for core cooling, the first cycle can reach temperatures up to 650 °C at atmospheric pressure. The absence of high pressure in the reactor vessel enhances safety by preventing pressure-induced explosions. It also significantly reduces the cost of the equipment used(Zhao et al., 2023).

The heat generated in the reactor core is transferred to the intermediate heat exchanger via a fluoride salt coolant. In the intermediate heat exchanger, the second-cycle water heats up and enters the steam boiler. In the steam boiler, the third-cycle water vaporizes and drives the turbines. The steam used is condensed in the condenser and converted back into water. This completes the cycle(Łukasz Bartela et al., 2021).

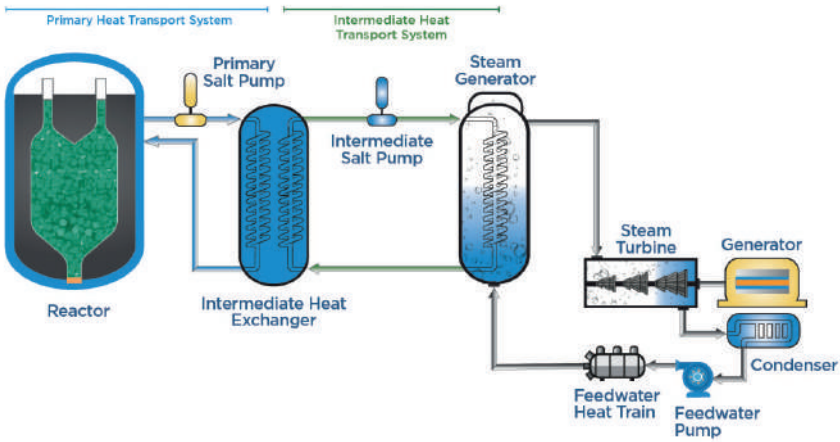


Figure 8 KP-FHR Cycle Diagram(Kairos, 2024)

4.8. Small Modular Reactors in the Design Phase

Small modular reactors have become quite popular as an energy solution in the energy race between countries. Countries have begun to create numerous designs to produce their own small modular reactors. This article examines small modular reactors that are under construction and in operation; reactors in the design phase are classified in Table 8 according to International Atomic Energy Agency records.

Table 8 Small modular reactors under design (IAEA, 2024b, 2024a)

Design Name	Electrical Power MWe	Designer Country	Status
Water-Cooled Reactors (Pressurized, Boiling)			
AP300	330	USA	Basic design
BWRX-300	300	USA, Japan	Detailed design
HAPPY200	200	China	Detailed design
i-SMR	170	South Korea	Conceptual design
NuScale	77	United States	Detailed design
PWR-20	20	USA	Detailed design
NUWARD	170	France	Detailed design
STAR	10	Switzerland	Basic design
VBER-300	325	Russia	Detailed design
ABV-6E	9	Russia	Detailed design
BANDI	60	South Korea	Conceptual design
High-Temperature Gas-Cooled Reactors			
EM2	265	USA	Conceptual design
FMR	50	USA	Conceptual design
GTHTR300	300	Japan	Basic design
GT-MHR	288	Russia	Basic design
HTMR-100	35	South Africa	Basic design
MHR-100	87	Russia	Conceptual design
HTGR-POLA	11.5	Poland	Basic design
PeLUIt-40	10	Indonesia	Conceptual design
Fast Neutron Reactors			
4S	10	Japan	Detailed design
ARC-100	100	Canada	Conceptual design
HEXANA	150	France	Conceptual design
LFR-AS-200	200	Italy / France	Conceptual design
OTRERA 300	110	France	Conceptual design
SEALER-55	55	Sweden	Conceptual design
SVBR-100	100	Russia	Detailed design
Sodium	345	USA	Conceptual design
Molten Salt Reactors			
CA Waste Burner	100	Denmark	Detailed design
CMSR	110	Denmark	Conceptual design
Flex Reactor	24	United Kingdom	Basic design
FUJI	200	Japan	Conceptual design
IMSR 400	195	Canada	Detailed design
Stellarium	110	France	Conceptual design
ThorCon	250	Indonesia / USA	Conceptual design
Thorizon	100	Netherlands / France	Conceptual design
XAMR	40	France	Conceptual design

5. TÜRKİYE'S STRATEGY AND POSITION ON SMALL MODULAR REACTORS

Türkiye imports a large portion of the energy sources it uses. Dependence on foreign energy threatens energy security. In this context, nuclear power plants increase countries' energy security thanks to their continuity and high power production(Furuncu, 2016).

Türkiye has not yet joined the ranks of countries that generate electricity from nuclear power plants. The Akkuyu Nuclear Power Plant, whose construction began in 2018, will be Türkiye's first nuclear power plant. The Akkuyu Nuclear Power Plant will have an electrical capacity of 4800 MWe and will consist of four high-power reactors. Secondly, a high-power nuclear power plant is planned to be built in Sinop province in Türkiye. The third high-power nuclear power plant is planned to be built in the Thrace region(Karataşlı, 2020; NDK, 2024; Polatoğlu, 2024).

The Ministry of Energy and Natural Resources stated that Türkiye signed the “Tripling Nuclear Energy” declaration, which includes 31 countries, at the 29th Conference of the Parties (COP29) to the United Nations Framework Convention on Climate Change held in Baku. It was stated that within this scope, the goal is to increase the installed electricity capacity to 20GWe from nuclear energy, by 2050. The statement indicated that, following the Akkuyu Nuclear Power Plant, two more high-power nuclear power plants are planned, and in addition to high-power plants, new generation modular reactor projects are also planned. The planned projects will contribute to a significant reduction in carbon emissions by 2050(ETKB, 2024).

Energy and Natural Resources Minister Alparslan Bayraktar stated that they were open to cooperation with the Chinese nuclear energy company CNOS for new generation modular reactors. In the United States Minister Bayraktar announced that small modular reactors have an important place in Türkiye's energy planning and invited American nuclear energy companies to invest in small modular reactor projects planned in Türkiye(CNBC-e, 2024; Okay & Gökkoyn, 2024).

President Recep Tayyip Erdoğan announced on March 26, 2025, that Türkiye would begin developing its own Small Modular Reactor (SMR) design as part of its 2030 Industry and Technology Strategy and that a nuclear technology park would be established for this purpose. This officially marked the beginning of the “domestic SMR era” in Türkiye's energy and industrial policies. The program's financing model has been structured in phases: State-guaranteed purchase agreements will be implemented for

the first two or three modules to be constructed, while new modules in subsequent phases are expected to be supported by low-interest green bonds and export credits.

In terms of industry, maintaining a high domestic contribution share has been designated a strategic priority. The goal is for at least 40–50% of large-scale equipment, such as reactor pressure vessels and heat exchangers, to be produced domestically, while support will be provided to companies operating in the nuclear technology park for the production of the remaining parts. This approach will ensure that a large portion of the project value remains within the country while also increasing technology transfer and skilled employment. In this way, Türkiye will take a step that will increase its global competitiveness not only in terms of energy supply security but also in terms of advanced technology production and export potential (Anadolu Ajansı, 2025b, 2025a).

The “Nuclear Energy Technologies Design Competition” organized by TEKNOFEST aims to develop innovative solutions in the areas of innovation, safety, efficiency, and sustainability, focusing particularly on Small Modular Reactor (SMR) designs. This competition will increase focus on SMR among universities, academics, and industry professionals, thereby encouraging young and competent designers to enter this field. Therefore, the academic and technical awareness provided by the competition will directly contribute to both an increase in the number of SMRs and the development of the modular reactor sector equipped with domestic technologies (TEKNOFEST, 2025).

Within the scope of its defense industry vision, Türkiye has also included preparations for nuclear propulsion technologies in its National Aircraft Carrier and National Nuclear Submarine projects. The experience gained at Akkuyu, the new nuclear power plant projects planned in Sinop and Thrace, and small modular reactor (SMR) research are considered strategic steps that will also form the infrastructure for future defense-oriented nuclear power systems. Thus, Türkiye aims to increase its nuclear competence in both energy supply security and defense technologies (Hürriyet, 2025).

6. METHOD

This study was conducted to conduct a technical examination of small modular reactors under construction and in operation and to evaluate their current construction stages. The study employed a literature review and used secondary data studies as its methodology.

A literature review was conducted using the Web of Science, Springer, ScienceDirect, ProQuest, YÖK Tez, ResearchGate, EBSCO, Google Scholar, Taylor & Francis, and ELibraryRu databases. The keywords “Small Modular Reactor,” “Nuclear Power Plants,” “SMR Technology,” and “Nuclear Energy Innovations” were used during the searches.

Publications on the applications and technical characteristics of small modular reactors in the energy sector were included in the study content, repetitive or off-topic data were excluded.

7. CONCLUSION, DISCUSSION, AND RECOMMENDATION

While nuclear energy offers an important solution to meet the growing energy demand, new generation small modular reactors are becoming an attractive energy source for countries due to their safety and applicability compared to traditional high-power reactors.

The technical specifications examined in the article show that small modular reactors have roles beyond electricity generation, such as water purification and propulsion power generation. The use and proliferation of modular reactors in different fields will lead to an overall reduction in carbon emissions. The safety standards and operational successes of existing reactors serve as a model for new-generation modular reactors.

From Türkiye’s perspective, within the framework of its 2050 targets, the establishment of nuclear power plants is important in order to increase energy supply security, reduce external dependency, and lower carbon emissions in energy production. The establishment of nuclear power plants will enable the transfer of existing technology to local engineers and the planning of national projects. When selecting the small modular reactor project planned by Türkiye within the framework of its 2050 perspective, it is important to use reactor models that have operational experience, tested safety systems, and completed standards and regulations. In this context, pressurized water reactors can be considered a sound choice, as they have been in operation for many years in nuclear power plants of varying capacities.

In conclusion, new generation small modular reactors offer solutions for both the global energy transition and Türkiye’s future energy strategy. The development and widespread adoption of small modular reactors will open a new door in energy policies and offer hope for a clean energy future.

References

- Abdulla, A. Y. (2014). Exploring the Deployment Potential of Small Modular Reactors [Ph.D., Carnegie Mellon University]. In *ProQuest Dissertations and Theses* (1660801314). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/exploring-deployment-potential-small-modular/docview/1660801314/se-2?accountid=159111>
- Ahmet Ege. (2019). *Nükleer Enerji: Atomdan Elektriğe Sağlıktan Silaha*. Hece Yayınları; eBook Collection (EBSCOhost). <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=ba923697-03b7-37e2-b201-cfa09438436d>
- Alahmad, H., & Taskesen, E. (2024). *Nükleer Güç Santrallerinin Teknik Özellikleri ve Yapısı: Akkuyu NGS Örneği*. Researchgate. https://www.researchgate.net/publication/382568043_Nukleer_Guc_Santrallerinin_Teknik_Ozellikleri_ve_Yapisi_Akkuyu_NGS_Ornegi
- Anadolu Ajansı. (2025a). *Türkiye'nin enerji geleceği: Nükleer gücün stratejik rolü*. AA. https://www.aa.com.tr/tr/analiz/turkiyenin-enerji-gelecegi-nukleer-gucun-stratejik-rolu/3647070?utm_source=chatgpt.com
- Anadolu Ajansı. (2025b). *Türkiye'nin Küçük Modüler Reaktör Hamlesinin Stratejik Önemi*. AA. <https://www.aa.com.tr/tr/analiz/turkiyenin-kucuk-moduler-reaktor-hamlesinin-stratejik-onemi/3584282>
- Asuega-Souza, A. (2022). Techno-Economic Analysis of Advanced Small Modular Nuclear Reactors [M.S., Colorado State University]. In *ProQuest Dissertations and Theses* (2708955066). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/techno-economic-analysis-advanced-small-modular/docview/2708955066/se-2?accountid=159111>
- Bagus Awienandra, I. G., Agung, A., & Mondjo. (2020). Thermal Hydraulics Analysis of KLT-40S Floating Nuclear Power Plant in Rolling – Heaving and Pitching – Heaving Motion at Various Sea State Condition with RELAP5 – 3D Code. *AIP Conference Proceedings*, 2223(1), 030001–1. Inspec with Full Text. <https://doi.org/10.1063/5.0000828>
- Beliavskii, S., Balachkov, M., Danilenko, V., & Nesterov, V. (2023). Fuel Lifetime Extension for the KLT-40S Small Modular Reactor by Means of Thorium-Uranium Fuel Cycle. *ANNALS OF NUCLEAR ENERGY*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.109982>
- Boening, H. Z. (2020). Key Factors of Small Modular Reactor Deployment Strategies in Developing States [M.A., Webster University]. In *ProQuest Dissertations and Theses* (2459986248). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/key-factors-small-modular-reactor-deployment/docview/2459986248/se-2?accountid=159111>

- CNBC-e. (2024). *Küçük Modüler Nükleer Santraller İçin Yasa Hazırlığı*. Enerji. <https://www.cnbce.com/enerji/kucuk-moduler-nukleer-santraller-icin-yasa-hazirligi-h5311>
- Deng, J., Dang, G., Ding, S., & Qiu, Z. (2020). Analysis of post-LOCA long-term core safety characteristics for the Small Modular Reactor ACP100. *Annals of Nuclear Energy*, 142, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107349>
- ETKB. (2024). *T.C. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. Nükleer Enerjiyi Üç Katına Çıkarma Deklarasyonu. <https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=21400>
- Fernández-Arias, P., Vergara, D., & Antón-Sancho, Á. (2023). Bibliometric Review and Technical Summary of PWR Small Modular Reactors. *Energies* (19961073), 16(13), 5168. Academic Search Ultimate. <https://doi.org/10.3390/en16135168>
- Franco, J. D. Q. (2021). Small Modular Nuclear Reactors: Economic Sustainability Assessment [Ph.D., The University of Manchester (United Kingdom)]. In *PQDT - Global* (2637955398). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/small-modular-nuclear-reactors-economic/docview/2637955398/se-2?accountid=159111>
- Furuncu, Y. (2016). Türkiye'nin Enerji Bağımlılığı ve Akkuyu Nükleer Enerji Santrali. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 37(0), 198–207.
- Ganjaroodi, S. Z., Fani, M., Zarifi, E., & Bentriddi, S. (2024). Thermal-Hydraulic Modeling of CAREM-25 Advanced Small Modular Reactor Using the Porous Media Approach and Cobra-En Modified Code. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(5), 1574–1583. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.12.011>
- Godsey, K. (2019). Life Cycle Assessment of Small Modular Reactors Using U.S. Nuclear Fuel Cycle [M.S., Clemson University]. In *ProQuest Dissertations and Theses* (2377696298). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/life-cycle-assessment-small-modular-reactors/docview/2377696298/se-2?accountid=159111>
- Gol'din, V. Ya., & Pestryakova, G. A. (2014). Advantages of a Fast Reactor with an Advanced Active Zone in Comparison to the BREST-300 Reactor Project. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 6(3), 239–247. <https://doi.org/10.1134/S2070048214030065>
- González Rodríguez, D., Brayner de Oliveira Lira, C. A., de Andrade Lima, F. R., & García Hernández, C. (2023). Exergy study of hydrogen cogeneration and seawater desalination coupled to the HTR-PM nuclear reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(7), 2483–2509. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.162>

- Hürriyet. (2025). *Milli uçak gemisi ve TF-2000 hava savunma muhribi ile Türkiye okyanuslarda sayılı güç olacak*. Hürriyet Bigpara. https://bigpara.hurriyet.com.tr/haberler/genel-haberler/milli-ucak-gemisi-ve-tf-2000-hava-savunma-muhribi-ile-turkiye-okyanuslarda-sayili-guc-olacak-uzman-acikladi-sirada-nukleer-deniza_ID1606019/
- Hussein, E. M. A. (2020). Emerging small modular nuclear power reactors: A critical review. *Physics Open*, 5, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2020.100038>
- IAEA. (2022). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*.
- IAEA. (2024a). *Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://www.iaea.org/publications/15790/small-modular-reactors-advances-in-smr-developments-2024>
- IAEA. (2024b). *Small Modular Reactors Catalogue 2024*. https://aris.iaea.org/publications/SMR_catalogue_2024.pdf
- IAEA. (2024c). *SMR Platform: Developments for Microreactors*. <https://www.iaea.org/events/ticker/smr-platform-developments-for-microreactors>
- İbiş, T. (2020). *Enerji Politikaları Çerçevesinde Türkiye'nin Nükleer Enerjiye Olan İhtiyacı Ve Türkiye'nin Nükleer Enerji Santrallerinin Kullanımında Güvenliği* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Igor Pioro. (2016). *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors* (Vol. 00103). Woodhead Publishing; eBook Subscription Super Collection - Türkiye (EBSCOhost).
- Interfax. (2024). Rosatom expects to launch BREST-300 reactor in 2028-2029. *Russia & CIS Energy Newswire*, 1–1. Newspaper Source Plus.
- Ishraq, A. R., Kruglikov, A. E., & Rohan, H. R. K. (2024). Strategic fuel management via implementation of a combined reload-resuffle scheme in small modular reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 429, 113605. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113605>
- Ishraq, A. R., Rohan, H. R. K., & Kruglikov, A. E. (2024). Neutronic assessment and optimization of ACP-100 reactor core models to achieve unit multiplication and radial power peaking factor. *Annals of Nuclear Energy*, 205, 110588. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110588>
- Kairos, P. (2024). *Technology Specifications*. How It Works. <https://kairospower.com/technology/>
- Karataşlı, M. (2020). Nuclear Energy and Raw Material Reserves in Türkiye. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 15(59), 249–261.
- Kemah, E. (2017). Yeni Nesil Reaktörlerin Çalışma Prensiplerinin İncelenmesi [Master's, Sakarya Üniversitesi (Türkiye)]. In *PQDT - Global* (2707556584). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://>

- www.proquest.com/dissertations-theses/yeni-nesil-reaktörlerin-çalışma/docview/2707556584/se-2?accountid=159111
- Knol, S., de Groot, S., Salama, R. V., Best, J., Bakker, K., Bobeldijk, I., Westlake, J. R., Fütterer, M. A., Laurie, M., Tang, C., Liu, R., Liu, B., & Zhao, H. (2018). HTR-PM fuel pebble irradiation qualification in the high flux reactor in Petten. *The Best of HTR 2016: International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, 329, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.09.020>
- Liou, J. (2023). *What are Small Modular Reactors (SMRs)?* IAEA Office of Public Information and Communication. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- Łukasz Bartela, Paweł Gładysz, Charalampos Andreades, Staffan Qvist, & Janusz Zdeb. (2021). Techno-Economic Assessment of Coal-Fired Power Unit Decarbonization Retrofit with KP-FHR Small Modular Reactors. *Energies*, 14(9), 2557–2557. Directory of Open Access Journals. <https://doi.org/10.3390/en14092557>
- Lulik, B. E. R. (2020). Exclusions Zones for Small Modular Reactors [M.Appl.Sc., The University of Regina (Canada)]. In *ProQuest Dissertations and Theses* (2458937371). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/exclusions-zones-small-modular-reactors/docview/2458937371/se-2?accountid=159111>
- Magan, H. B., Delmastro, D. E., Markiewicz, M., Lopasso, E., Diez, F., Giménez, M., Rauschert, A., Halpert, S., Chocrón, M., Dezzutti, J. C., Pirani, H., Balbi, C., Fittipaldi, A., Schlamp, M., Murmis, G. M., & Lis, H. (2011). CAREM Project Status. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2011(1), 140373. <https://doi.org/10.1155/2011/140373>
- Makarov, S. (2023). Improving the Efficiency of a BREST-300 Npp Using the Thermal Energy of Natural Gas. *ATOMIC ENERGY*, 134(3–4), 142–149. <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01037-3>
- Maksimov, Y. V., & Mazjarkin, D. V. (2023). Small Modular Reactors as an Alternative to Modern Power Reactor Plants. *Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design*. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50744428>
- Marcel, C. P., Acuña, F. M., Zanooco, P. G., & Delmastro, D. E. (2013). Stability of self-pressurized, natural circulation, low thermo-dynamic quality, nuclear reactors: The stability performance of the CAREM-25 reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 265, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.08.057>
- NDK. (2024). *Nükleer Düzenleme Kurulu*. Sinop Nükleer Santrali, Nükleer Tesislerin Yetkilendirilmesi. <https://www.ndk.gov.tr/sinop-nukleer-santrali>

- Nogay, H. S. (2016). Türkiye de Nükleer Enerji Sistemlerine Geçişin Hızlandırılması. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 2(2), 90–98.
- Novoselov, A. E., Stolov, E. V., & Nefedov, V. S. (2014). Fast Reactor BREST-300. *Tomsk Polytechnic University - Metodologiya Proyektirovaniya Molodezhnogo Nauchno-Innovatsionnogo Prostranstva Kak Osnova Podgotovki Sovremennogo Inzhenera*, 61–64.
- Okay, D. Z., & Gökkoç, S. C. (2024). *Bakan Bayraktar, Amerikan Şirketlerini SMR Alanında Türkiye’de Yatırım Yapmaya Davet Etti*. Ekonomi. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/bakan-bayraktar-amerikan-sirketlerini-smr-alaninda-turkiyede-yatirim-yapmaya-davet-etti/3215436#>
- Öngü, S. (2014). *Nükleer Reaktörler, Yakıt Tipleri Ve Mersin Akkuyu Nükleer Santrali* [Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Orlov, A., & Gabaraev, B. (2023). Heavy liquid metal cooled fast reactors: Peculiarities and development status of the major projects. *Nuclear Energy and Technology*, 9, 1–18. <https://doi.org/10.3897/nucet.9.90993>
- Petrinin, V. V., Fadeev, Yu. P., Pakhomov, A. N., Veshnyakov, K. B., Polunichev, V. I., & Shamanin, I. E. (2019). Conceptual Design of Small NPP with RITM-200 Reactor. *Atomic Energy*, 125(6), 365–369. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00495-4>
- Polatoğlu, M. G. (2024). Nükleer Enerji Politikaları Ekseninde Türkiye’nin İlk Nükleer Güç Santrali: Akkuyu Ve İnşa Faaliyetleri. *Çağdaş Türkiye Tarihi Araştırmaları Dergisi*, 24(48), 389–420. <https://doi.org/10.18244/ctad.1405894>
- Raymond L. Murray. (2001). *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes* (5th ed). Butterworth-Heinemann; eBook Subscription Super Collection - Türkiye (EBSCOhost). <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=14e7b0e7-6d85-3a62-8425-007cad89b1a6>
- Rowinski, M. K., White, T. J., & Zhao, J. (2015). Small and Medium Sized Reactors (SMR): A Review of Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 643–656. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.006>
- Rubinsteyn, I. A. M., & Sepetilnikov, M. I. (1982). Исследование Реальных Тепловых Схем ТЭС И АЭС. Энергоиздат. <https://books.google.com.tr/books?id=5tg7PwAACAAJ>
- Sever, O. (2019). *Çevre Ve Stratejik Bakış Açısıyla Türkiye’de Nükleer Santral Çalışmaları* [Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- TACC. (2022). Плавающая Атомная Теплоэлектростанция (ПАТЭС) ‘Академик Ломоносов’. <https://tass.ru/infographics/9357>

- Tashakor, S., Zarifi, E., & Naminazari, M. (2017). Neutronic Simulation of CAREM-25 Small Modular Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 99, 185–195. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.05.016>
- Taso, F. E. (2011). 21st Century Civilian Nuclear Power and the Role of Small Modular Reactors [M.A., Tufts University]. In *ProQuest Dissertations and Theses* (877618836). ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/21st-century-civilian-nuclear-power-role-small/docview/877618836/se-2?accountid=159111>
- TEKNOFEST. (2025). *Nükleer Enerji Teknoloji Tasarım Yarışması*. <https://www.teknofest.org/tr/content/announcement/buyuk-odullu-nukleer-enerji-teknolojileri-tasarim-yarismasi-basvurulari-devam-ediyor/>
- Topal, M. E. (2019). *Bir Modüler Nükleer Reaktörün Farklı Akışkanlarla Soğutulmasının Termodinamik Performansının Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- WNN. (2024a). *Argentina's CAREM SMR Project to Have Critical Design Review*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/critical-design-review-for-argentina-s-carem-small>
- WNN. (2024b). *Control Room Commissioned at Chinese SMR*. <https://world-nuclear-news.org/Articles/Control-room-commissioned-at-Chinese-SMR>
- Wu, B., Wang, J., Li, Y., Wang, H., & Ma, T. (2022). Design, Experiment, and Commissioning of the Spent Fuel Conveying and Loading System of HTR-PM. *Science & Technology of Nuclear Installations*, 2022. Inspec with Full Text. <https://doi.org/10.1155/2022/1817191>
- Wu, S., Ma, X., Liu, J., Wan, J., Wang, P., & Su, G. (2023). A load following control strategy for Chinese Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM. *ENERGY*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125459>
- Xiong, Q., Shen, Y., Dang, G., Qiu, Z., Deng, J., Du, P., Ding, S., & Wu, Z. (2023). Design for ACP100 long term cooling flow resistance with random forests and inverse quantification. *Annals of Nuclear Energy*, 180, 109477. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109477>
- Yurt, S. (2021). *Nükleer Reaktör Çeşitlerinin Araştırılması Vê Vver-1200 Reaktör Tipinin Çalışma Prensiplerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Muş Alparslan Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Zavodfoto. (2022). ОКБМ Африкантов и Их Атомные Реакторы РИТМ-200 и РИТМ-400. https://dzen.ru/a/YlPIEp0d_DTWL0oT
- Zhang, J., Guo, J., Li, F., & Sun, Y. (2018). Research on the fuel loading patterns of the initial core in Chinese pebble-bed reactor HTR-PM. *An-*

- nals of Nuclear Energy*, 118, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.04.019>
- Zhang, Z., Wu, Z., Sun, Y., & Li, F. (2006). Design aspects of the Chinese modular high-temperature gas-cooled reactor HTR-PM. *HTR-2004*, 236(5), 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.11.024>
- Zhao, H., Fick, L., Heald, A., Zhou, Q., Richesson, S., Sutton, N., & Haugh, B. (2023). Development, Verification, and Validation of an Advanced Systems Code KP-SAM for Kairos Power Fluoride Salt–Cooled High-Temperature Reactor (KP-FHR). *Nuclear Science and Engineering*, 197(5), 813–839. <https://doi.org/10.1080/00295639.2022.2106724>
- Zverev, D. L., Fadeev, Yu. P., Pakhomov, A. N., & Polunichiev, V. I. (2019). Nuclear Power Plants for the Icebreaker Fleet and Power Generation in the Arctic Region: Development Experience and Future Prospects. *Atomic Energy*, 125(6), 359–364. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00494-5>
- Zverev, D. L., Pakhomov, A. N., Polunichiev, V. I., Veshnyakov, K. B., & Kabin, S. V. (2013). RITM-200: New-generation reactor for a new nuclear icebreaker. *Atomic Energy*, 113(6), 404–409. <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9653-7>
- Андрюшечко, С. А., Афров, А. М., Васильев, Б. Ю., Косоуров, К. Б., Семченков, Ю. М., & Украинцев, В. Ф. (2010). АЭС С Реактором Типа ВВЭР-1000 От Физических Основ Эксплуатации До Эволюции Проекта. Логос. https://www.researchgate.net/publication/288838140_SAAndrusecko_AM_Afrov_BUVasilev_VKGeneralov_KBKosourov_UM_Semcenkov_VFUkrainev_AES_s_reaktorom_tipa_VVER-1000_Ot_fiziceskih_osnov_ekspluatcii_do_evologii_proekta_M_Logos_2010_ISBN_978-5-98704-496-4
- Атомная, Э. (2024). *RITM-200*. Атомная Энергия. <https://www.atomic-energy.ru/RITM-200>
- Базин, Д. А., & Гиниятуллин, Б. А. (2022). Перспективы ИсползовАния Атомных СтАнции МАлой Мощности РеАкторА РИТМ-200. ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет». <https://elibrary.ru/item.asp?id=50096493>
- Бартоломей, Г. Г., Бать, Г. А., Байбаков, В. Д., & Алхутов, М. С. (1989). Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. ЭнергоАтомиздат. <https://books.google.com.tr/books?id=RcR7AAAACAAJ>
- Зверев, Д. Л., Фадеев, Ю. П., Пахомов, А. Н., & Полуничев, В. И. (2018). Опыт Создания и Перспективы Развития Ядерных Энергетических Установок Для Ледокольного Флота и Энергообеспечения Арктического Региона. In *Атомная Энергия* (6th edn). https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t125-6_2018/p318/

- Курчатовский, И. (2015). Практические Основы Разработки и Обоснования Технических Характеристики и Безопасности Эксплуатации Реакторных Установок Типа ВВЭР.
- Макеев, Г. А. (2015). Создание Плавающих Энергетических Блоков, Современное Состояние И Варианты Будущих Проектов. In Атомные станции малой мощности: Новое направление развития энергетики. https://elib.biblioatom.ru/text/atomnye-stantsii-maloy-moschnosti_t2_2015/p130/
- ФЭИ, Р. (2024). *BREST-300*. Атомная Энергетика. <https://www.ippe.ru/nuclear-power/fast-neutron-reactors/120-brest-300-nuclear-reactor>

Döküm Odaklı Ürün Tasarımı ve Konstrüksiyon İlkeleri 3

Tuğçe Tezel¹

Volkan Kovan²

Özet

Mühendislik malzemelerinin şekillendirilmesinde köklü bir geçmişe sahip olan döküm teknolojisi, karmaşık geometrilerin tek parça halinde ve yüksek mukavemet değerlerinde üretilmesine olanak tanıyan üstün bir imalat yöntemidir. Ancak endüstriyel pratikte, tasarım ve üretim süreçleri arasındaki kopukluk ve tasarımcıların metalürjik süreçlere dair farkındalık eksikliği, sıklıkla üretilebilirlik sorunlarına, maliyet artışlarına ve kalite kayıplarına neden olmaktadır. Bu kitap bölümü, tasarım mühendislerine ve üreticilere yönelik olarak, “Döküm İçin Tasarım” prensiplerini teorik altyapı ve pratik uygulamalar ışığında sistematik bir yaklaşımla ele almaktadır. Çalışmada öncelikle, sıvı metalin akışkanlığı, katılaşma büzülmesi, ısı transferi ve yönlendirilmiş katılaşma gibi temel fiziksel olayların, parça geometrisi üzerindeki belirleyici rolü irdelenmiştir. Özellikle Bilgisayar Destekli Tasarım ortamında oluşturulan idealize edilmiş modellerin, dökümhane zeminindeki termodinamik gerçeklerle nasıl uyumlu hale getirileceği üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda; et kalınlığı homojenliği, kesit geçişlerinde kama kuralı, birleşim noktalarındaki sıcak noktaların yönetimi, feder tasarımı, maça dayanımı, çıkma açıları ve işleme paylarının optimizasyonu gibi kritik konstrüksiyon kuralları, doğru-yanlış kıyaslamalarıyla detaylandırılmıştır. Ayrıca, döküm simülasyon teknolojilerinin tasarım sürecindeki rolü ve sürdürülebilir üretim perspektifi tartışılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, tasarımcının sadece fonksiyonel gereksinimleri değil, aynı zamanda metalin kalıp içerisindeki katılaşma serüvenini de öngörerek; hatasız, ekonomik ve yüksek kaliteli döküm parçalar tasarlamasına rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

1 Doç. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, tugcetezel@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0139-442X

2 Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, kovan@akdeniz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0599-525X

1. Giriş

Mühendislik malzemelerinin şekillendirilme serüveninde döküm teknolojisi, hammaddenin sıvı fazdan katı faza kontrollü bir şekilde dönüştürülmesi prensibine dayanan ve insanlık tarihinin bilinen en köklü imalat yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bronz Çağı'ndan günümüze uzanan bu süreç, basit alet yapımından başlayarak evrilmiş; günümüzde ise malzeme bilimi, termodinamik ve akışkanlar mekaniğinin kesişim noktasında yer alan yüksek teknolojlili bir üretim disiplinine dönüşmüştür (Campbell, 2015). Endüstriyel üretim yöntemleri genel bir perspektifle incelendiğinde; malzemeyi eksilterek şekillendiren talaşlı imalat veya parçaları birleştirerek bütünleştiren kaynaklı imalat) yöntemlerinin aksine döküm, malzemeyi “oluşturarak” şekillendirme yeteneği ile ayrılmaktadır.

Bu ayrım, özellikle geometrik karmaşıklık arttıkça döküm teknolojisinin lehine işleyen belirleyici bir faktördür. Talaşlı imalat yöntemleri, karmaşık bir parçayı elde etmek için kütsel bir hammadde bloğundan büyük oranda malzeme kaldırılmasını gerektirir ki bu durum, talaş kaldırma oranı yüksek parçalarda ciddi bir hammadde ve enerji israfına yol açmaktadır (Groover, 2020). Kaynaklı yapılar ise, çok sayıda alt parçanın birleştirilmesini gerektirdiği için montaj işçiliği maliyetlerini artırmakta ve birleşme bölgelerinde yorulma dayanımını düşüren gerilme yığılmalarına neden olabilmektedir. Buna karşın döküm teknolojisi, en karmaşık iç boşluklara, değişken kesitli feder yapılarına ve kavisli yüzeylere sahip parçaları tek bir operasyonla, monolitik (tek parça) bir bütün halinde üretebilme kabiliyetine sahiptir (Beeley, 2001). Mühendislik literatüründe “Net Şekle Yakın” üretim olarak tanımlanan bu kabiliyet, nihai ürünün boyutlarına ve formuna en kısa yoldan ulaşılmasını sağlayarak, ikincil işlemleri minimize etmekte ve üretim ekonomisine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Döküm teknolojisinin sunduğu bu avantajlar, onu sadece geleneksel makine imalatının değil, modern yüksek teknoloji endüstrilerinin de vazgeçilmez bir unsuru haline getirmiştir. Örneğin havacılık endüstrisinde, yüksek sıcaklık ve mekanik zorlanmalar altında çalışan süper alaşım türbin kanatçıklarının, iç soğutma kanalları ile birlikte tek kristal yapıda üretilebilmesi, günümüz teknolojisinde sadece hassas döküm yöntemiyle mümkündür (Jolly, 2005). Benzer şekilde otomotiv sektöründe, emisyon standartlarını karşılamak ve yakıt verimliliğini artırmak amacıyla gidilen hafifletme çalışmalarında, alüminyum ve magnezyum alaşımlı karmaşık motor blokları ve yapısal şasi parçaları, yüksek basınçlı döküm teknolojileri sayesinde hayat bulmaktadır. Enerji sektöründe ise, rüzgâr türbinlerinin devasa gövde parçalarından nükleer santrallerin kritik vana gövdelerine

kadar, güvenlik katsayısının hayati önem taşıdığı pek çok bileşen, döküm teknolojisinin sağladığı izotropik malzeme özellikleri ve tasarım esnekliği sayesinde üretilmektedir (Ravi, 2005). Dolayısıyla döküm, sanılının aksine sadece ağır sanayinin bir parçası değil, mikron mertebesindeki hassas medikal implantlardan tonlarca ağırlıktaki gemi parçalarına kadar geniş bir spektrumda modern mühendisliğin çözüm ortağıdır.

Ancak, döküm yönteminin mühendislere sunduğu bu sınırsız topolojik esneklik ve her şekli üretebilme vaadi, doğru bir mühendislik yaklaşımıyla yönetilmediğinde sürecin en büyük handikapına dönüşme potansiyeli taşımaktadır. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımlarının son çeyrek asırda gösterdiği gelişim, tasarımcılara yerçekimsiz, sürtünmesiz ve idealize edilmiş bir sanal uzayda çalışma imkanı tanımaktadır. Bu dijital ortamda oluşturulan geometriler, matematiksel olarak kusursuz ve estetik açıdan etkileyici görünebilir. Ancak ekran başındaki tasarımcının “fare” hareketiyle saniyeler içinde oluşturduğu keskin bir köşe veya ani bir kesit daralması, dökümhane zeminindeki fiziksel gerçeklikte termodinamik yasalara çarpmaktadır. Sanal dünyadaki katı model, gerçek dünyada viskozitesi, yüzey gerilimi ve katılaşma büzülmesi olan agresif bir sıvı metal davranışı sergilemektedir (Campbell, 2003). Dolayısıyla, CAD ekranındaki ideal geometri ile dökümhanedeki üretilen parça arasında, çoğu zaman derin bir uçurum bulunmaktadır.

Tasarım mühendisliğinde sıkça rastlanan ve bu uçurumu derinleştiren temel bir metodolojik hata, ürünün tasarım aşamasında sadece fonksiyonel gereksinimlere odaklanılmasıdır. Tasarımcı, haklı olarak parça üzerindeki gerilme dağılımını, montaj boşluklarını veya aerodinamik formu optimize etmeye çalışır. Ancak bu odaklanma sırasında, o fonksiyonel hacmin fiziksel olarak nasıl var edileceği sorusu, yani üretilirlik parametresi, genellikle sürecin sonuna ertelenmektedir (Boothroyd vd., 2010). Oysa bir döküm parçasının yapısal bütünlüğü, geometrisinin sıvı metal akışına ve katılaşma yönlenmesine ne kadar izin verdiğiyle doğrudan ilişkilidir. Örneğin, mekanik dayanım açısından rijitliği artırmak için eklenen rastgele bir feder, eğer besleme yollarını tıkayan bir bariyer görevi görüyorsa, o bölgede oluşacak porozite nedeniyle parçanın dayanımını artırmak bir yana, dramatik ölçüde düşürecektir.

Bu kopukluk, endüstriyel üretim kültürü literatüründe “Duvarın üzerinden atma” (Throw it over the wall) yaklaşımı olarak tanımlanmakta ve modern üretim felsefelerinde şiddetle eleştirilmektedir (Anderson, 2014). Bu geleneksel yaklaşımda tasarım departmanı, ürünü kendi ofisinde izole bir şekilde tamamlar ve teknik resimleri üretim departmanına veya

tedarikçi dökümhaneye “duvarın üzerinden atar” gibi iletir. Bu noktadan sonra tasarımcı için iş bitmiş, dökümcü için ise sorunlar başlamış demektir. Dökümhane mühendisleri, kalıptan çıkması imkânsız olan ters açılar, beslenmesi mümkün olmayan izole kütleleri veya türbülansa neden olacak keskin dönüşleri fark ettiklerinde, süreç çoktan tıkanmıştır.

Bu senaryoda ortaya çıkan tablo genellikle şöyledir: Ya pahalı ve karmaşık maça sistemleri kullanılarak zorlama bir üretim yapılmaya çalışılır ki bu maliyeti artırır; ya da tasarım revizyonuna gidilerek süreç başa döner ki bu da pazara sürme süresini uzatır (Swift & Booker, 2013). Daha vahim olan senaryo ise, tasarımın üretilebilir ama kalitesiz olmasıdır; yani parça dökülür ancak içinde gizli döküm hataları barındırır. Bu durum, ürünün servis ömrü sırasında beklenmedik hasarlara yol açarak, maliyetin çok ötesinde güvenlik riskleri doğurur. Dolayısıyla, tasarımcının “ben çizerim, onlar döker” anlayışından sıyrılarak, çizdiği her çizginin kalıp içerisindeki metalurjik karşılığını sorguladığı bir farkındalık düzeyine erişmesi gerekmektedir.

Tasarım ve üretim süreçleri arasındaki bu kopukluğun yarattığı teknik sorunlar, kaçınılmaz olarak projenin ekonomik sürdürülebilirliğini de tehdit etmektedir. Günümüz rekabetçi küresel pazarında, bir mühendislik ürününün başarısını belirleyen faktörler sadece teknik performans ve fonksiyonellik ile sınırlı değildir; maliyet etkinliği ve pazara giriş hızı, mühendislik kararlarının merkezinde yer almak zorundadır. Literatürde yapılan kapsamlı araştırmalar, ürün maliyetlerinin oluşum sürecine dair çarpıcı bir gerçeği ortaya koymaktadır: Tasarım faaliyetleri, bir ürünün toplam bütçesinin genellikle %5 gibi küçük bir kısmını oluşturmaya rağmen, nihai ürün maliyetinin yaklaşık %70 ila %80’ini tasarım aşamasında alınan kararlar belirlemektedir (Ullman, 2010). Bu durum mühendislik ekonomisinde sabitlenen maliyet paradoksu olarak bilinir. Yani tasarımcı, henüz ortada fiziksel bir ürün yokken, seçtiği et kalınlıkları, belirlediği toleranslar ve öngördüğü malzeme ile maliyetin büyük kısmını geri döndürülemez bir şekilde kilitlemiş olur. Döküm teknolojisi özelinde bu, kalıp malzemesinden soğuma süresine, ısı işlem gereksiniminden işleme paylarına kadar tüm gider kalemlerinin, aslında dökümhanede değil, tasarım masasında karara bağlandığı anlamına gelir.

Tasarım aşamasında gözden kaçırılan hataların veya üretilebilirlik kusurlarının maliyeti ise, ürün yaşam döngüsü boyunca doğrusal değil, üstel bir artış gösterir. Kalite yönetimi literatüründe “1-10-100 Kuralı” olarak bilinen bu prensip, döküm endüstrisi için hayati bir önem taşır (Anderson, 2014). Tasarım aşamasında (kâğıt üzerinde veya CAD ortamında) tespit edilen bir döküm hatasının düzeltilmesi, sadece mühendisin harcayacağı birkaç saatlik bir zamanı ve sembolik bir 1 birimlik maliyeti temsil eder.

Ancak bu hata fark edilmeyip kalıp üretimine geçildiğinde, hatanın telafisi için kalıbın revize edilmesi veya yeniden işlenmesi 10 birimlik bir maliyet ve ciddi bir zaman kaybı doğurur. En kötü senaryoda ise, hatalı parça dökülüp, işlenip müşteriye teslim edildikten sonra (örneğin araç üzerindeyken veya makine çalışırken) ortaya çıkacak bir hasar, 100 birimlik maliyetin de ötesinde, garanti kapsamındaki cezai yaptırımlara ve telafisi güç prestij kayıplarına yol açmaktadır. Dolayısıyla, döküm odaklı tasarım prensiplerinin uygulanması, sadece teknik bir mükemmeliyet arayışı değil, aynı zamanda stratejik bir risk ve maliyet yönetimi aracıdır.

Ekonomik denklemin bir diğer kritik değişkeni ise pazara sürme süresidir. Özellikle otomotiv ve tüketici elektroniği gibi dinamik sektörlerde, ürün yaşam döngüleri kısalmakta ve yeni bir ürünü rakiplerden önce piyasaya sunmak büyük bir rekabet avantajı sağlamaktadır (Clark & Fujimoto, 1991). Döküm, doğası gereği model ve kalıp hazırlığı gibi uzun hazırlık süreleri gerektiren bir yöntemdir. Tasarım kaynaklı bir hatanın döküm denemeleri sırasında fark edilmesi, haftalarca sürecektir yeni bir kalıp imalat döngüsünü tetikleyebilir. Bu gecikme, ürünün pazar payını kaybetmesine neden olabilir. Bu bağlamda, ilk seferde doğru üretim hedefi, ancak tasarımcının döküm prosesinin kısıtlarını ve gerekliliklerini tasarımın ilk aşamalarında (konsept safhasında) dikkate almasıyla, yani eş zamanlı mühendislik prensiplerini işletmesiyle mümkün olabilmektedir.

Geleneksel üretim paradigmasının yarattığı bu maliyet ve zaman darboğazlarını aşmak, sadece daha hızlı bilgisayarlar veya daha gelişmiş döküm makineleri kullanmakla değil, mühendislik sürecinin kendisini yeniden kurgulamakla mümkündür. Bu bağlamda, endüstriyel tasarım ve üretim literatüründe son otuz yıla damgasını vuran en köklü değişim, doğrusal süreç yönetiminden eş zamanlı mühendislik yaklaşımına geçiştir (Prasad, 1996). “Design for X” (DfX) şemsiyesi altında yer alan ve çalışmamızın odak noktasını oluşturan “Döküm İçin Tasarım” (Design for Casting - DfC), bu yaklaşımın döküm teknolojisine uyarlanmış halidir. Geleneksel yöntemde tasarım, analiz, prototip ve üretim planlama aşamaları birbirini izleyen ve birbirinden yalıtılmış vagonlar gibi ilerlerken; eş zamanlı mühendislikte bu süreçler iç içe geçmiş, döngüsel ve iteratif bir yapı sergiler. Bu modelde dökümhane uzmanı, henüz tasarım konsept aşamasındayken masada yerini alır ve parçanın geometrisi kesinleşmeden önce kalıplama stratejisine dair geri bildirimlerini sunar. Böylece, üretim kısıtları bir engel olarak değil, tasarımın sınır şartlarından biri olarak sürecin en başında tanımlanmış olur.

Bu metodolojik dönüşüm, tasarım mühendisinin yetkinlik setinde de köklü bir değişikliği zorunlu kılar. Tasarımcının sadece mukavemet

hesaplarına veya kinematik analizlere odaklanan mekanik bakış açısının yanına, metalürjik öngörü yeteneğini de eklemesi gerekmektedir. Metalürjik öngörü; bir parçayı tasarlarırken onun sadece bitmiş halini değil, sıvı halden katı hale geçerken yaşayacağı termodinamik serüveni zihinde canlandırabilme yetisidir (Campbell, 2003). Tasarımcı, oluşturduğu her bir kesit değişiminin, eklediği her bir federin veya açtığı her bir boşluğun, kalıp içerisindeki ısı transferini ve katılma cephesinin ilerleyişini nasıl değiştireceğini sezgisel olarak kavrayabilmelidir. Örneğin, “L” tipi bir köşe birleşimini çizerken, o köşenin iç kısmında ısının hapsolacağını ve bu durumun yerel bir sıcak nokta yaratarak çekinti boşluğuna neden olacağını öngörebilmek, bu yetinin bir sonucudur. Bu öngörüye sahip bir tasarımcı, hatayı dökümden sonra röntgen filminde görmek yerine, tasarım aşamasında o köşeye bir radyus vererek veya et kalınlığını azaltarak bertaraf eder.

DfC prensiplerinin bir diğer kritik fonksiyonu ise, tasarım ofisi ile dökümhane zemini arasında köprü kuran “Ortak Dil” işlevini görmesidir. Mühendislik pratiğinde tasarımcılar ve dökümcüler genellikle farklı jargonlara sahiptir; biri gerilme yığılması, atalet moment, tolerans dilini konuşurken, diğeri yolluk sistemi, cüruf kapalı, kum yanması dilini konuşur. Bu iletişim kopukluğu, teknik resimlerin yanlış yorumlanmasına ve üretilemeyecek taleplerin ortaya çıkmasına neden olur. Döküm odaklı tasarım kuralları, bu iki dünya arasındaki gri alanları netleştiren evrensel bir gramer niteliğindedir (Czerwinski, 2011). Minimum et kalınlığı, çıkma açısı veya besleme mesafesi gibi kavramlar, bu ortak dilin kelimeleridir. Tasarımcının bu kurallara sadık kalarak oluşturduğu bir geometri, dökümcüye sadece ne istendiğini değil, aynı zamanda bunun fiziksel olarak mümkün olduğunu da söyler. Dolayısıyla bu bölümde ele alınacak olan kurallar bütünü, sadece teknik bir kılavuz değil, aynı zamanda disiplinler arası bir iletişim protokolüdür.

Tasarımcının döküm süreciyle kurması gereken bu entelektüel ilişkinin temelinde, döküm fiziksel realitesi yatmaktadır. Bilgisayar ekranındaki statik geometrinin aksine, dökümhane ortamında süreç, yüksek enerjili ve kaotik bir akışkanlar mekaniği problemiyle başlar. Erimiş metal, kalıp boşluğuna döküldüğü andan itibaren yerçekimi, viskozite ve yüzey gerilimi kuvvetlerinin etkisi altındadır. Burada tasarımcıyı ilgilendiren en kritik parametre, sıvı metalin akış rejimidir. İdeal bir döküm için laminar bir akış arzulanırken, hatalı tasarlanmış kesit geçişleri, ani yön değiştirmeler veya kontrolsüz döküş yükseklikleri, akışı türbülanslı hale getirir. Literatürde kritik hız kavramıyla açıklanan bu durum, erimiş metalin yüzeyindeki oksit filmlerinin yırtılarak metalin içine karışmasına ve hava kabarcıklarının yapı içinde hapsolmesine neden olur (Campbell, 2003). Örneğin, tasarımcının estetik kaygılarla oluşturduğu dar bir boyun veya keskin bir köşe, sıvı metalin o bölgeden

geçerken hızlanmasına (Venturi etkisi) ve jet etkisi yaratarak kalıp duvarlarını erozyona uğratmasına yol açabilir. Dolayısıyla, bir parçanın geometrisi, aslında sıvı metalin izleyeceği hidrodinamik yol haritasıdır ve bu harita ne kadar pürüzsüzse, iç yapı kalitesi o kadar yüksek olacaktır.

Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurmasının ardından, sürecin ikinci ve belki de daha karmaşık olan evresi, yani katılaşma fiziği devreye girer. Metaller (bizmut ve galyum gibi istisnalar hariç) sıvı fazdan katı faza geçerken hacimsel olarak küçülürler. Bu katılaşma büzülmesi, termodinamik bir yasa olup tasarımcının pazarlık edemeyeceği bir gerçektir (Flemings, 1974). Eğer tasarım, metalin soğuma yönünü (termal gradyanı) dikkate almadan kurgulanmışsa, yani ince kesitlerin arkasında beslenemeyen kalın kütleler bırakılmışsa, bu hacimsel kayıp parça içinde boşluk (çekinti porozitesi) olarak kalacaktır. Döküm odaklı tasarımın altın kuralı olan yönlendirilmiş katılaşma ilkesi tam da bu noktada devreye girer: Katılaşma, parçanın en uç noktasından başlayıp besleyiciye doğru ilerlemelidir. Tasarımcının görevi, geometriyi bu termal patikayı destekleyecek şekilde, yani besleyiciye doğru giderek genişleyen (veya en azından daralmayan) bir formda kurgulamaktır.

Ancak fiziksel realite sadece boşluk oluşumuyla sınırlı değildir; katılaşma sırasındaki ve sonrasındaki soğuma rejimi, parça üzerinde ciddi termal gerilmeler indükler. Farklı et kalınlıklarına sahip bölgeler farklı hızlarda soğur; ince kısımlar hızla katılaşp büzülürken, kalın kısımlar hala plastik veya sıvı haldedir. Bu durum, parça içinde çekme ve basma gerilmelerinin savaşına neden olur. Eğer geometri, bu doğal büzölmeye izin vermeyecek kadar rijitse (örneğin, büyük bir çemberin içindeki ince kollar gibi), malzeme kendi iç gerilmesine yenik düşer veya kalıcı deformasyona (çarpılma) uğrar ya da sıcak yırtılma adı verilen çatlaklarla parçalanır (Hatton et al., 2006).

İşte bu nedenle, “Neden her geometri dökülemez?” sorusunun cevabı, imalat yeteneksizliğinde değil, fizik kurallarında saklıdır. Herhangi bir geometriyi kalıbın içine dökmek mümkündür, ancak o geometrinin sağlam bir metalurjik yapıyla katılaşmasını sağlamak, fiziksel kısıtlara saygı duymayı gerektirir. İzole edilmiş kütleler, birleşme noktalarındaki aşırı sıcaklık yığılmaları ve büzölmeyi engelleyen kapalı geometriler, döküm teknolojisinin doğasına aykırıdır. Bu bölümde sunulacak konstrüksiyon kuralları, esasen bu fiziksel yasaların geometrik dile tercüme edilmiş halidir; amaç, termodinamiğe meydan okuyan değil, onunla uyum içinde çalışan tasarımlar ortaya koymaktır.

Fiziksel fenomenlerin karmaşıklığı ve deneme-yanılma süreçlerinin maliyeti, mühendislik dünyasını dijital bir dönüşüme zorlamış ve bu dönüşümün merkezine Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) araçlarını

yerleştirmiştir. Döküm endüstrisinde son çeyrek asırda yaşanan en büyük devrim, hiç şüphesiz döküm simülasyon yazılımlarının tasarım süreçlerine entegrasyonudur. Eskiden dökümhane zemininde, usta-çırak tecrübesiyle ve pahalı fiziksel denemelerle optimize edilmeye çalışılan yolluk tasarımları ve besleyici hesapları, artık sanal ortamda mikron hassasiyetinde analiz edilebilmektedir. Bu yazılımlar, Sonlu Elemanlar (FEM) veya Sonlu Hacimler (FVM) yöntemlerini kullanarak, sıvı metalin kalıp boşluğuna doluşunu, sıcaklık dağılımını, katılaşma cephesinin ilerleyişini ve mikroyapısal faz dönüşümlerini görselleştirebilmektedir (Jolly, 2005). Tasarımcı, bu araçlar sayesinde parça içerisindeki görünmeyeni görme yetisine kavuşur; henüz kalıp kumu karıştırılmadan, parçanın neresinde hava hapsolacağını veya hangi bölgesinde çekinti boşluğu (porozite) oluşacağını dijital ikiz üzerinde tespit edebilir.

Ancak, simülasyon teknolojilerinin sunduğu bu büyüyeyici yetenekler, mühendislik camiasında tehlikeli bir yanılgıyı da beraberinde getirmiştir. Sektörde sıklıkla karşılaşılan bu yanılgı, simülasyon programlarının hatalı bir tasarımı düzeltebilecek sihirli bir değnek olarak görülmesidir. Oysa simülasyon yazılımları, tasarımcı tarafından girilen geometrik veriyi ve sınır şartlarını fizik kurallarına göre işleyen güçlü birer hesap makinesinden ibarettir. Bilgisayar bilimlerindeki meşhur “Çöp girer, çöp çıkar” (Garbage in, garbage out) ilkesi, döküm simülasyonları için de geçerlidir. Eğer tasarımcı, döküm prensiplerine aykırı, termal merkezi dengesiz veya beslenmesi imkânsız bir geometriyi simülasyona sokarsa; yazılımın vereceği çıktı, mükemmel bir parça değil, sadece o parçanın neden ve nasıl hatalı döküleceğinin renkli bir haritası olacaktır (Ravi, 2008). Simülasyon, burada bir hata var diyebilir; ancak bu hatayı şuraya bir feder ekleyerek veya şu kesiti incelterek çözebilirsin demez; bu çözüm, mühendisin konstrüksiyon bilgisine muhtaçtır.

Bu noktada, mühendislik sezgisi ve temel tasarım kurallarının vazgeçilmezliği bir kez daha ortaya çıkmaktadır. En gelişmiş analiz araçları dahi, deneyimli bir tasarımcının kesit geçişlerinde radyus kullanma veya yönlenmiş katılaşmayı sağlama gibi temel reflekslerinin yerini tutamaz. Aksine, simülasyon araçlarının verimli kullanımı, ancak bu temel kurallara sadık kalınarak oluşturulmuş bir başlangıç tasarımı ile mümkündür. Temel döküm kurallarına uygun olarak tasarlanmış bir parça, simülasyon sürecinde sadece ufak optimizasyonlara (örneğin besleyici boyutunun %10 küçültülmesi gibi) ihtiyaç duyarken; kurallardan bihaber yapılmış bir tasarım, onlarca simülasyon iterasyonu gerektirecek ve muhtemelen yine de istenen kalite seviyesine ulaşamayacaktır (Sutcliffe vd., 2012). Dolayısıyla, bu bölümde ele alacağımız konstrüksiyon ilkeleri, simülasyon çağında önemini yitirmemiş,

bilakis simülasyonun bir doğrulama aracı olarak doğru kullanılabilmesi için zorunlu birer ön koşul haline gelmiştir. Mühendisin görevi, simülasyona nasıl olsa bilgisayar çözer mantığıyla yaklaşmak değil, simülasyona dökülebilirliği yüksek bir geometri sunarak süreci hızlandırmaktır.

21. yüzyıl mühendislik paradigması, sadece maliyet ve performans ekseninde değil, artan çevresel kaygılar ve yasal düzenlemeler (örneğin Avrupa Yeşil Mutabakatı) ışığında sürdürülebilirlik ekseninde de yeniden şekillenmektedir. Bu bağlamda, “Eko-Tasarım” kavramı, döküm teknolojisinin geleceğini belirleyen temel parametrelerden biri haline gelmiştir. Döküm, doğası gereği geri dönüştürülmüş metalleri hammadde olarak kullanabilmesi (hurda metalin yeniden ekonomiye kazandırılması) açısından döngüsel ekonominin merkezinde yer alır. Ancak tasarımcı açısından sürdürülebilirlik, malzeme seçiminin ötesinde, geometrik verimlilik ve hafifletme çalışmalarıyla başlar. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, araç ağırlığındaki her 100 kg’lık azalmanın yakıt tüketiminde ve karbon emisyonunda sağladığı düşüş, döküm parçalarının et kalınlıklarının optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır (Ashby, 2012).

Bu noktada, son yılların popüler mühendislik akımı olan topoloji optimizasyonu, döküm teknolojisi ile mükemmel bir sinerji oluşturmaktadır. Topoloji optimizasyonu algoritmaları, parçanın maruz kalacağı yükleri analiz ederek, gerilmenin düşük olduğu bölgelerdeki malzemeyi sanal olarak çıkarır ve geriye sadece yük taşıyan, genellikle organik ve kemiksi bir yapı bırakır. Bu, doğadaki prensiplere benzer bir yaklaşımdır. Talaşlı imalat ile üretilmesi neredeyse imkânsız olan bu karmaşık ve organik boşluklu yapılar, sıvı metalin akışkanlığı sayesinde döküm yöntemiyle kolaylıkla üretilebilir. Ancak burada kritik bir tasarım filtresi gereklidir: Algoritmanın önerdiği optimize edilmiş şekil, döküm kurallarına (çekinti, besleme, çıkma açısı) göre revize edilmezse üretilemez. Dolayısıyla, sürdürülebilir bir hafifletme, ancak optimizasyon çıktılarının döküm konstrüksiyon kuralları ile harmanlanmasıyla mümkündür (Allwood vd., 2011).

Sürdürülebilirliğin üretim aşamasındaki karşılığı ise enerji verimliliğidir. Dökümhaneler, metalin eritilmesi için çok yüksek miktarda enerji tüketen tesislerdir. Tasarımcının belirlediği geometri, doğrudan harcanan enerjiyi dikte eder. Eğer tasarımcı, gereğinden kalın kesitler veya yanlış besleme gerektiren izole kütleler tasarlırsa, döküm verimi düşer. Döküm verimi, kalıba dökülen toplam metal ağırlığı ile müşteriye sevk edilen net parça ağırlığı arasındaki orandır. Düşük verimli bir tasarımda, örneğin 1 kg’lık bir parça için 2 kg metal eritmek gerekebilir; aradaki fark yolluk ve besleyici olarak kesilip tekrar ergitilmek üzere fırına döner. Bu geri dönüş hurdasının

tekrar tekrar eritilmesi, muazzam bir enerji israfı ve gereksiz karbon salınımı demektir (Giurco vd., 2014). İyi bir döküm tasarımı, minimum besleyici ihtiyacı ile maksimum sağlamlığı hedefleyerek, ilk seferde, en az metalle üretimi mümkün kılar.

Sonuç olarak, bu bölümde ele alınacak olan tasarım kuralları, sadece parçanın hatasız çıkmasını sağlamakla kalmaz; aynı zamanda daha az malzeme kullanılmasını, daha az enerji harcanmasını ve daha hafif ürünler elde edilmesini garanti eder. Mühendisin doğru tasarımı, gezegenin kaynaklarına duyulan saygının teknik bir ifadesidir.

Tüm bu teorik, ekonomik ve ekolojik çerçeve ışığında, elinizdeki bu bölümün temel amacı; döküm teknolojisine dair literatürde dağınık halde bulunan ve genellikle ustalık bilgisi (know-how) olarak kabul edilip yazılı kaynaklara yeterince yansımayan pratik tasarım kurallarını, sistematik bir akademik disiplinle bir araya getirmektir. Döküm odaklı tasarım, sadece bir çizim tekniği değil, geometrik kararların metalürjik sonuçlarını yönetme sanatıdır. Bu çalışmada, bir döküm parçasının kalitesini belirleyen temel parametreler; teorik soyutlamalardan ziyade, doğrudan uygulamaya dönük “Konstrüksiyon Kuralları” başlıkları altında ele alınacaktır. Amacımız, tasarımcı ile üretici arasındaki gri alanları netleştirmek; bir parçanın kâğıt üzerindeki (veya ekrandaki) geometrisinin, dökümhane zeminindeki fiziksel gerçeklikle nasıl örtüşmesi gerektiğini somut örneklerle ortaya koymaktır (Boothroyd, 2002).

Bu kapsamda, izleyen bölümlerde; sıvı metalin akışını ve katılaşmasını doğrudan etkileyen et kalınlığı homojenliği, L, T, V, X ve Y tipi kesit birleşimlerinde sıcak nokta oluşumunun engellenmesi, feder (kaburga) tasarımı, delik ve yuvaların konumu, işleme paylarının optimizasyonu ve toleranslandırma gibi kritik konular detaylandırılacaktır. Anlatım metodolojisi olarak, her bir kural için “Doğru Tasarım - Yanlış Tasarım” kıyaslamaları kullanılacak ve neden-sonuç ilişkileri termodinamik temellere dayandırılarak açıklanacaktır. Örneğin, bir köşenin neden radyuslu olması gerektiği, sadece gerilme azaltma ile değil, aynı zamanda ısı transferini kolaylaştırma ve kum yanmasını önleme perspektifinden de irdelenecektir.

Sonuç olarak, bu kılavuzun okuyucuya vaat ettiği temel kazanım; tasarım sürecinde metalürjik farkındalık yetkinliğinin geliştirilmesidir. Bu bölümü tamamlayan bir tasarım mühendisinin, parçayı modellerken zihninde sadece bitmiş ürünü değil, onun kalıp içindeki oluşum sürecini de canlandırabilmesi hedeflenmektedir. Bu yetkinlik, tasarımcının üretilebilir ve sürdürülebilir ürünler ortaya koymasını sağlarken; üretim mühendislerinin de tasarımcılarla aynı teknik dili konuşarak süreç verimliliğini artırmasına olanak tanıyacaktır

(Swift & Booker, 2013). Böylece, tasarım masasında oturan mühendis için bir başucu kaynağı, üretim sahasındaki mühendis için ise teknik iletişimde güçlü bir argüman seti oluşturulmuş olacaktır.

2. Döküm Teknolojisinin Temel Prensipleri ve Tasarıma Etkileri

2.1. Sıvı Metal Akışkanlığı ve Kalıp Doldurma

Bir döküm parçasının başarılı bir şekilde üretilbilmesinin ilk ve en temel koşulu, sıvı metalin kalıp boşluğunu, donmadan ve yapısal bütünlüğünü bozmadan tamamen doldurabilmesidir. Bu süreç, termodinamik bir faz dönüşümü öncesinde, hidrodinamik bir akış problemidir. Tasarımcı açısından bu problemin en kritik değişkeni, malzemenin akışkanlığı ve bu akışkanlığın geometrik sınırlar (et kalınlığı ve akış mesafesi) ile olan etkileşimidir.

Metallurjik anlamda akışkanlık, sanılanın aksine sadece sıvı metalin viskozitesi (iç sürtünmesi) ile tanımlanan bir fiziksel özellik değildir; daha ziyade metalin kalıp içerisinde ne kadar yol alabildiğinin bir ölçüsüdür. Bu kabiliyet; döküm sıcaklığı (aşırı ısıtma derecesi), metalin kimyasal bileşimi, kalıp malzemesinin ısı transfer katsayısı ve yüzey gerilimi gibi karmaşık parametrelerin bir bileşkesidir. Örneğin, ötektik bileşime sahip bir alüminyum-silisyum alaşımı (Al-Si12), dar aralıkta katılaştığı için mükemmel bir akışkanlık sergilerken; geniş katılma aralığına sahip bazı bronz alaşımları “lapa” şeklinde katılaştığı için akışkanlıkları düşüktür. Tasarımcı, seçtiği malzemenin bu karakteristiğini bilmek ve tasarımı buna göre şekillendirmek zorundadır.

Tasarım geometrisinin akışkanlık üzerindeki en belirleyici kısıtı minimum et kalınlığı kavramıdır. Sıvı metal, kalıp kanalları boyunca ilerlerken sürekli olarak kalıp duvarlarına ısı kaybeder. Eğer kesit çok inceyse, yüzey alanı/hacim oranı artar ve ısı kaybı hızlanır. Metal, henüz kalıbın en uç noktasına ulaşmadan likidus sıcaklığının altına düşer ve akış durur. Bu durum, literatürde “Yarım Döküm” (Misrun) veya metalin iki farklı koldan gelip soğuduğu için birleşmemesi sonucu oluşan “Soğuk Birleşme” (Cold Shut) hatasına yol açar. Soğuk birleşme, parça üzerinde belirgin bir çatlak veya çizgi şeklinde görülür ve parçanın sızdırmazlık özelliğini ve mekanik dayanımını yok eder. Bu nedenle tasarımcı, örneğin kum kalıba dökülecek bir çelik parça için 6 mm’nin altına, hassas döküm bir parça için ise 1,5 mm’nin altına inmemesi gerektiğini bilmelidir.

Ancak akışkanlık, sadece ince kesitleri doldurmak demek değildir; aynı zamanda nasıl doldurulduğu ile de ilgilidir. İdeal bir döküm dolumu, türbülanssız ve laminar bir rejimde gerçekleşmelidir. Campbell (2003)

tarafından ortaya konan ve döküm literatüründe mihenk taşı kabul edilen kurala göre, sıvı metalin kalıp içindeki hızı kritik hız (genellikle 0,5 m/s) değerini aşmamalıdır. Eğer tasarımcı, parça üzerinde ani kesit daralmaları, keskin köşeli “Z” dönüşleri veya şelale gibi dökülmeye neden olacak geometriler oluşturursa, metalin hızı yerel olarak artar ve akış türbülansa girer. Türbülanslı akış, metalin yüzeyindeki oksit filminin yırtılarak temiz metalin içine karışmasına ve hava kabarcıklarının hapsolmesine neden olur.

Sonuç olarak, tasarımcının oluşturduğu geometri, sıvı metal için bir otoban niteliğinde olmalıdır. Akış yolları, metalin hızını ve sıcaklığını koruyacak şekilde optimize edilmeli; geniş düzlemlerden ince kesitlere ani geçişlerden kaçınılmalı ve mümkünse akış yönünde yumuşak yarıçaplar tercih edilmelidir. Unutulmamalıdır ki, dökümhane mühendisi döküm sıcaklığını artırarak akışkanlığı yapay olarak yükseltebilir; ancak bu çözüm, gaz çözünürlüğünü artırmak ve kalıp ömrünü kısaltmak gibi başka sorunlara yol açar. En doğru çözüm, akışkanlık prensiplerine saygı duyan bir geometrik tasarımıdır.

2.2. Katılaşma Mekanizması ve Chvorinov Kuralı

Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurması sürecin hidrodinamik yüzü ise, dolum sonrası başlayan katılaşma evresi termodinamik yüzüdür ve döküm parçasının nihai kalitesini belirleyen asıl sınav burada verilir. Tasarımcı için katılaşma, sadece metalin donması değil, zamanla yarışan bir ısı transfer problemidir. Bu problemin temel aksiyomu, bir döküm parçasının soğuma süresinin, o parçanın geometrik özelliklerine, yani hacmine ve yüzey alanına bağlı olduğudur. Döküm literatüründe bu ilişki, 1940 yılında Çek mühendisi Nicolas Chvorinov tarafından formüle edilen ve kendi adıyla anılan Chvorinov Kuralı ile açıklanır (Campbell, 2003):

$$t = B \times (V / A)^n$$

Bu denklemde t katılaşma süresini, V parçanın (veya ilgili kesitin) hacmini, A ise ısıнын transfer edildiği soğuma yüzey alanını temsil eder. B kalıp sabiti, n ise genellikle 2 olarak kabul edilen bir üs değeridir. Tasarımcı perspektifinden bakıldığında, bu denklemin en kritik bileşeni (V / A) oranıdır. Döküm mühendisliğinde bu orana modül adı verilir. Modül, bir geometrinin ısı tutma kapasitesinin (Hacim), ısı kaybetme kapasitesine (Yüzey Alanı) oranıdır. Fiziksel olarak; modülü büyük olan bir geometri, ısını dışarı atacak yeterli yüzey alanına sahip olmadığı için geç soğur; modülü küçük olan (ince ve geniş) bir geometri ise hızla enerji kaybederek erken katılaşır.

Tasarımcının masasında bu fizik kuralı, hayati bir tasarım kısıtına dönüşür: Bir döküm parçası nadiren tek bir basit geometriden oluşur; genellikle plakalar, çubuklar, küpler ve silindirlerin karmaşık bir bileşimidir. Bu da parçanın farklı bölgelerinin farklı modüllere, dolayısıyla farklı soğuma sürelerine sahip olacağı anlamına gelir. Eğer tasarımcı, yüksek modüllü (kalın/kütlesel) bir bölgeyi, düşük modüllü (ince) bir bölgenin arkasına hapsedecek bir geometri oluşturursa, döküm hatası kaçınılmazdır.

Bu durumu somutlaştırmak gerekirse; ince bir kesit (düşük modül) hızla katılaşarak sıvı metal akış yolunu tıkar. Arkasında kalan kalın kütle (yüksek modül) ise hala sıvıdır ve ısı merkezi olarak adlandırılan izole bir havuz oluşturur. Bu izole sıvı kütle, faz değişimi sırasında hacimsel olarak büzüldüğünde, kendini besleyecek taze metal bulamaz (çünkü yol donmuştur) ve sonuçta parçanın tam kalbinde, dışarıdan görülemeyen büyük bir çekinti boşluğu meydana gelir.

Bu nedenle, döküm odaklı tasarımın (DfC) temel hedefi, parça üzerindeki modül dağılımını kontrol etmektir. Tasarımcı, parçayı modüllerine ayırarak (Heuvers Çemberi Yöntemi gibi tekniklerle) incelemelidir. İdeal senaryo, katılaşmanın en düşük modüllü bölgeden (uç noktalardan) başlayıp, kademeli olarak artan modül değerleriyle besleyiciye doğru ilerlemesidir. Eğer tasarım gereği kalın bir kesit, ince bir kesitle çevrelenmek zorundaysa, tasarımcı ya o kalın kesiti boşaltarak modülünü düşürmeli ya da besleme pedleri ekleyerek ince kesitin modülünü yapay olarak artırmalıdır. Chvorinov kuralına meydan okuyan bir tasarım, dökümhanede ancak pahalı soğutucular veya egzotermik besleyiciler kullanılarak kurtarılabilir; bu da kötü tasarımın maliyetini üretimde ödemek demektir.

2.3. Hacimsel Değişimler: Büzülme

Döküm teknolojisinde tasarım kurallarının büyük bir çoğunluğu, tek bir fiziksel gerçeği yönetmek üzerine kuruludur: Metaller (bizmut, galyum ve bazı dökme demir türleri hariç) soğudukça büzülürler. Ancak mühendislik perspektifinden büzülme kavramı, tekil bir olay değil, sıcaklık düşüşüne bağlı olarak üç farklı fazda gerçekleşen karmaşık bir hacimsel değişim sürecidir. Tasarımcının bu üç aşamayı ayırt edebilmesi hayati önem taşır; çünkü her aşamanın yol açtığı hata türü ve tasarımcıdan beklediği önlem farklıdır (Beeley, 2001).

Sürecin ilk aşaması sıvı büzülmesidir. Erimiş metal potadan kalıba döküldüğünde, döküm sıcaklığından (örneğin 1600°C) katılaşmanın başlayacağı likidus sıcaklığına (örneğin 1450°C) kadar soğur. Bu aralıkta metal henüz sıvıdır ancak hacmi azalır. Bu hacim kaybı, genellikle

dökümünün sorumluluğundadır ve besleyicilerdeki rezerv sıvı metal ile kolayca telafi edilir. Tasarımcıyı doğrudan etkileyen bir parametre değildir, ancak besleyici boyutunu etkiler.

İkinci ve en kritik aşama katılaşma büzülmesidir. Metalin sıvı fazdan katı faza geçtiği bu faz dönüşümü sırasında, atomlar düzensiz sıvı yapıdan düzenli kristal kafes yapısına geçerler ve daha sıkı paketlenirler. Bu durum, dramatik bir yoğunluk artışına ve dolayısıyla hacim azalmasına neden olur. Çeliklerde %5-7, alüminyum alaşımlarında %6-8 civarında gerçekleşen bu kayıp, döküm parçasının içinde boşluk oluşumunun ana kaynağıdır. Eğer tasarımcı, parçanın geometrisini, bu hacim kaybını telafi edecek taze metalin (besleyiciden) sürekli akabileceği şekilde kurgulamamışsa, parça katılaşırken kendi içinden malzeme çeker. Sonuç, dışarıdan bakıldığında kusursuz görünen ancak içi süngerimsi boşluklarla dolu (makro veya mikro porozite) bir parçadır. Bu aşamadaki büzülme, yönlendirilmiş katılaşma tasarımı ile yönetilmek zorundadır.

Üçüncü aşama ise katı büzülmesidir. Parça tamamen katılaştıktan (Solidus sıcaklığından) oda sıcaklığına inene kadar geçen sürede gerçekleşir. Bu aşamada artık döküm hatası (boşluk) oluşmaz, ancak parçanın boyutları küçülür. Tasarımcıların teknik resimlerde verdikleri boyutsal toleranslar ve modelcilerin kalıp üzerine ekledikleri çekme payı, işte bu lineer kısılmayı karşılamak içindir. Ancak katı büzülmesi, sadece boyutsal bir sorun değildir; aynı zamanda bir gerilme problemidir.

Eğer döküm parçasının geometrisi, metalin doğal olarak büzülmesine izin vermeyecek kadar rijitse (örneğin; iki güçlü flanş arasına hapsedilmiş ince bir çubuk veya jant kolu gibi), soğuyan metal kısalma isterken kalıp tarafından engellenir. Bu durum, parça üzerinde muazzam iç gerilmeler yaratır. Metal henüz sıcak ve mukavemeti düşükken bu gerilme malzemenin çekme dayanımını aşarsa, sıcak yırtılma adı verilen ve parçayı kullanılmaz hale getiren çatlaklar oluşur. Metal soğuduktan sonra bu gerilmeler devam ederse, parça kalıptan çıkarıldıktan sonra veya işleme sırasında çarpılma meydana gelir. Dolayısıyla tasarımcı, parçanın serbestçe büzülebilmesine olanak tanıyan esnek geometriler tasarlamalı veya gerilmeyi dağıtacak geniş radyuslar kullanmalıdır.

2.4. Isı Transferi ve Yönlendirilmiş Katılaşma

Döküm hatalarını önlemeye yönelik tüm çabaların nihai amacı, parça içerisinde kusursuz bir metalurjik bütünlük sağlamaktır. Bu bütünlüğün sağlanması, ergimiş metalin kalıp içerisindeki soğuma rejiminin kontrol altına alınmasına, yani termodinamik bir disipline bağlıdır. Döküm literatüründe

bu disiplinin adı yönlenmiş katılaşmadır (Directional Solidification). Bu prensip, döküm parçasının en uzak ve en ince noktasından (soğuk bölge) başlayıp, kademeli olarak daha kalın kesitlere doğru ilerleyen ve en sonunda sıvı metal kaynağı olan besleyici içinde son bulan bir katılaşma cephesi oluşturmayı hedefler.

Tasarımcı açısından bakıldığında, bir döküm parçası aslında üç boyutlu bir ısı haritasıdır. Parça üzerindeki her geometrik unsur, ısı transferi açısından farklı bir rol üstlenir: İnce federler, köşeler ve geniş yüzey alanına sahip bölgeler, ısıyı hızla kalıp kumuna ileterek ısı yutucu gibi davranırken; kalın kütleler, göbekler ve birleşim noktaları ısıyı bünyesinde tutarak ısı merkezi gibi davranır. Yönlenmiş katılaşmanın temel kuralı, bu ısı merkezlerini besleyiciye giden yol üzerinde birbirine bağlamaktır. Eğer tasarımcı, besleyiciye ulaşan yol üzerinde, arkasındaki kütleden daha ince bir kesit (dar boğaz) bırakırsa, bu ince kesit erken donarak besleme yolunu keser. Arkada izole kalan sıvı bölge, katılaşma büzülmesi sırasında ihtiyaç duyduğu taze metali çekemez ve çekinti boşluğu oluşturur.

Bu fiziksel zorunluluk, tasarımcıyı kama kuralı adı verilen geometrik bir stratejiyi uygulamaya zorlar. İdeal bir döküm tasarımı, tıpkı bir kama gibi, uç noktadan besleyiciye doğru giderek genişleyen bir kesit profiline sahip olmalıdır. Bu genişleme, katılaşma cephesinin asla tıkanmamasını ve sıvı metalin en son donacak noktaya kadar sürekli akabilmesini garanti eder. Eğer parçanın fonksiyonel gereksinimleri (örneğin düz bir plaka olması gerekliliği) bu doğal eğime izin vermiyorsa, tasarımcı bu kez yapay yöntemlere başvurmak zorunda kalır. Örneğin, parçanın üzerine sonradan talaşlı imalatla kaldırılacak olan besleme pedleri eklenerek geçici bir kalınlık artışı sağlanır.

Ancak, her geometri yönlenmiş katılaşmaya doğal olarak izin vermez. Özellikle tekerlek jantları, volanlar veya ızgara yapılarında olduğu gibi, çevresel bir çember ile merkezi bir göbeği bağlayan kollar, klasik bir termal çatışma alanıdır. Kollar ince olduğu için çabuk soğur, göbek ve çember kalın olduğu için geç soğur. Bu durumda tasarımcı, kolların birleşim yerlerinde geniş radyuslar kullanarak ısı geçişini yumuşatmalı veya kesit değişimlerini kademeli hale getirmelidir. Aksi takdirde, dökümhane mühendisi bu termal dengesizliği çözmek için parça üzerine metal soğutucular yerleştirmek veya izolasyon gömlekleri kullanmak zorunda kalır.

Sonuç olarak; iyi tasarım, dökümhanede ek önlemlere (soğutucu, ped, karmaşık yolluk) ihtiyaç duymadan, kendi geometrisiyle doğal olarak yönlenmiş katılaşmayı sağlayan tasarımdır. Tasarımcı, oluşturduğu geometriyi zihninde canlandırırken şu soruyu sormalıdır: Sıvı metal, en uzak

noktadan besleyiciye kadar kesintisiz bir sıvı koridoru bulabiliyor mu? Eğer cevap evet ise, o tasarım üretilebilir, ekonomik ve sağlamdır.

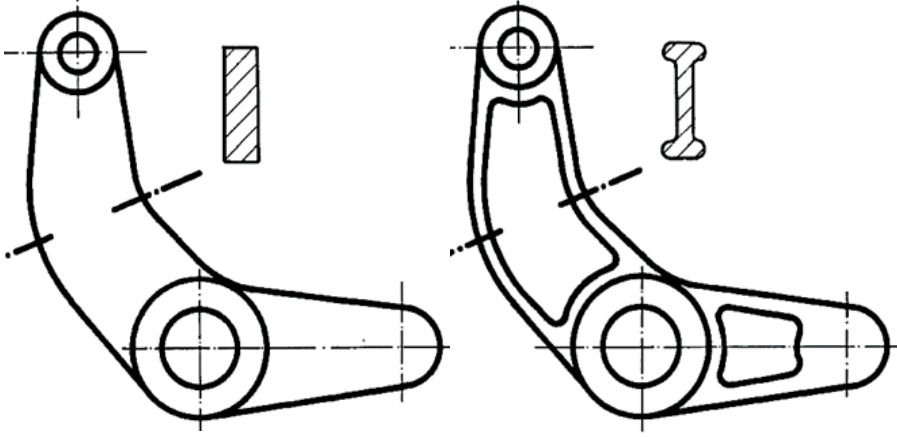
3. Döküm Parça Tasarımında Konstrüksiyon Kuralları

Döküm teknolojisinde üretilebilirlik kavramı, soyut bir temenni değil, geometrik kesinliği olan bir disiplindir. Bu bölümde, önceki kısımlarda değinilen termodinamik ve hidrodinamik yasaların, teknik resim masasında (veya CAD ekranında) nasıl somut tasarım kurallarına dönüştüğü incelenecektir.

3.1. Et Kalınlığı Homojenliği ve Kesit Geçişleri

Döküm parça tasarımının en temel kuralı, literatürde genellikle “Altın Kural” olarak nitelendirilen et kalınlığı homojenliğidir. İdeal bir döküm parçası, mümkün olan her bölgesinde eşit veya birbirine çok yakın et kalınlıklarına sahip olmalıdır. Bu gereklilik, estetik bir tercihten ziyade, metalin soğuma fiziğinin bir dayatmasıdır.

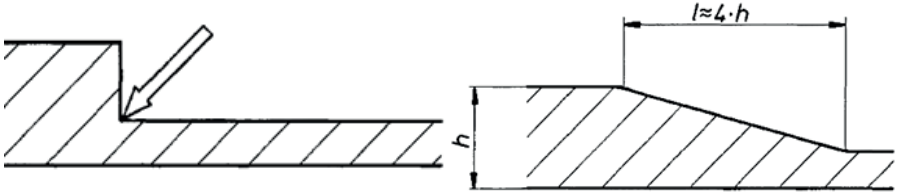
Chvorinov kuralında ifade edildiği üzere, bir kesitin katılaşma süresi o kesitin modülü ile karesel orantılıdır. Homojen olmayan bir tasarımda, ince kesitler hızla soğuyup katılaşırken, kalın kesitler geç soğur ve çevreleri donduğu için izole kalarak sıcak nokta oluşturur. Bu izole kütleler, katılaşma büzülmesi sırasında taze metal ile beslenemedikleri için parçanın merkezinde çekinti boşluğuna (porozite) neden olur. Ayrıca, farklı soğuma hızları parça üzerinde kalıcı iç gerilmelere ve çarpılmalara yol açar. Bu nedenle tasarımcı, kütsel yığılmaları engellemek için iç boşaltma yöntemini kullanmalı; dolu bir kütle yerine, aynı atalet momentini sağlayacak federli ve ince cidarlı yapıları tercih etmelidir.



Şekil 1. Kütle azaltma prensibi. (a) Yanlış Tasarım: İç boşluklara ve sıcak nokta oluşumuna neden olan dolu kütle. (b) Doğru Tasarım: Aynı mukavemeti sağlayan ancak et kalınlığı homojenleştirilmiş federli yapı (Bode, 1996).

Mühendislik gereksinimleri nedeniyle et kalınlığı değişiminin zorunlu olduğu durumlarda ise (örneğin flanş bağlantıları), geçişin asla ani olmaması gerekir. Ani kesit değişimleri, sıvı metalin dolum sırasında türbülansa girmesine ve keskin köşelerde gerilme yığılması oluşmasına neden olur.

Bu sorunları aşmak için uygulanması gereken strateji kama kuralı veya kademeli geçiştir. Kalın kesitten ince kesite geçiş, belirli bir eğimle (genellikle 1:3 veya 1:4 oranında) ve geniş radyuslar kullanılarak yapılmalıdır. Bu eğim, sadece gerilmeleri yaymakla kalmaz, aynı zamanda katılma cephesinin besleyiciye doğru yönlendirilmesine yardımcı olan bir termal patika oluşturur. Tasarımcı lego bloklarını üst üste koyar gibi keskin geometriler değil, doğadaki formlar gibi birbirine akan, yumuşak geçişli geometriler kurgulamalıdır.

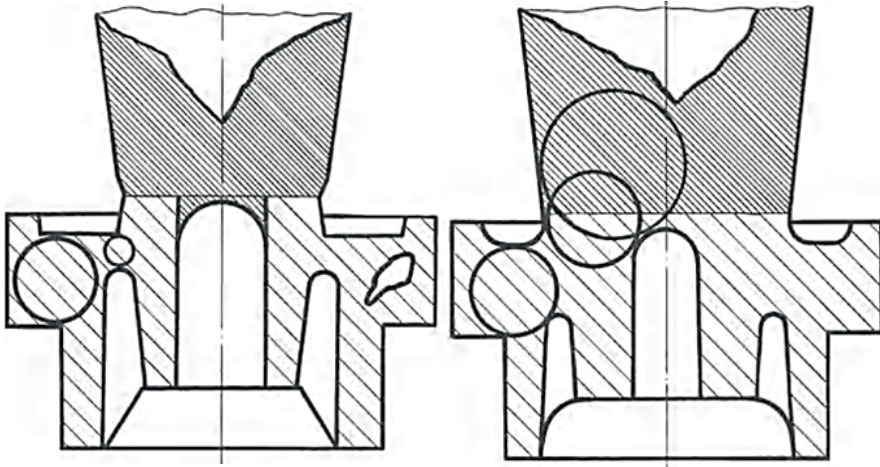


Şekil 2. Kesit geçişlerinde tasarım stratejileri. (a) Hatalı: Ani kesit değişimi (sıcak nokta ve gerilme yığılması riski). (b) Doğru: Kama kuralına uygun kademeli geçiş (Bode, 1996).

3.2. Kesit Birleşimleri ve Sıcak Noktalar

Bir döküm parçası, ne kadar karmaşık görünürse görünsün, aslında levhaların, çubukların ve köşelerin farklı kombinasyonlarla bir araya gelmesinden oluşur. Tasarımcı için en büyük tuzak, bu temel geometrilerin kesiştiği noktalardır. L, T, V, X ve Y şeklinde sınıflandırılan bu birleşim bölgeleri, termal dengenin bozulduğu ve döküm hatalarının yoğunlaştığı kritik alanlardır.

Sorunun temel kaynağı, geometrik birleşim yerlerinde hacmin artmasına rağmen, ısı transferi yapacak yüzey alanının azalmasıdır. Örneğin iki plakanın kesişerek oluşturduğu bir (+) şeklinde X birleşimi veya T birleşimi ele alındığında, kesişim noktasındaki kütle, kolların kütesinden daha fazladır. Bu durum, o bölgenin çevreye göre daha geç soğumasına ve bir ısı merkezi haline gelmesine neden olur. Döküm literatüründe bu durumu tespit etmek için Heuvers Çemberi yöntemi kullanılır. Bu yöntemde göre, kesitin içine çizilebilecek en büyük teğet çemberin çapı, birleşim noktasında kolların kalınlığından belirgin şekilde büyükse (örneğin 1,5 katı), o noktada çekinti boşluğu oluşması kaçınılmazdır.

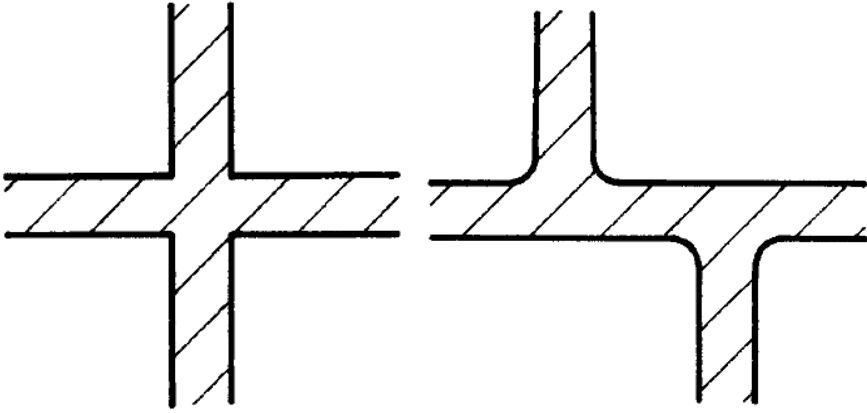


Şekil 3. Birleşim noktalarındaki kütle artışını gösteren Heuvers Çemberi analizi. Kesişim bölgesindeki çember çapının artması, o bölgenin en son katılaşacağını ve çekinti riski taşıdığını gösterir (Bode, 1996).

Bu birleşim türleri arasında en riskli olanı X (Artı) birleşimidir. Dört kolun tek bir noktada buluştuğu bu geometri, ısının merkezde hapsolmesine neden olur. Besleyicinin bu merkezi noktaya ulaşması ve beslemesi genellikle zordur çünkü ince kollar daha önce donar. Bu sorunu çözmek için tasarımcı, X birleşimini kaydırarak iki adet T birleşimine dönüştürmelidir. Kolların

birbirinden uzaklaştırılması, ısı merkezini böler ve katılaşmayı rahatlatır. Eğer tasarım kısıtları nedeniyle X birleşimi zorunluysa, birleşim noktasının tam ortasına maça yerleştirilerek kütle azaltılmalı ve ısı transfer yüzeyi yaratılmalıdır.

L ve V köşelerinde ise sorun genellikle iç köşede oluşan sıcaklıktır. Keskin bir iç köşe, ısıнын kalıp kumuna aktarılmasını zorlaştırır (kum o bölgede çok ısınır ve doygunluğa ulaşır). Bu nedenle iç köşelere mutlaka yarıçap verilmeli, ancak bu yarıçapın yarıçapı da aşırıya kaçmamalıdır. Çok büyük dış yarıçaplar, köşedeki kütleyi (modülü) artırarak sorunu çözmek yerine daha da kötüleştirir. İdeal tasarım, iç ve dış yarıçapların eş merkezli olduğu ve et kalınlığının köşeyi dönerken sabit kaldığı tasarımdır.



Şekil 4. X-birleşimlerinde tasarım iyileştirilmesi. Kolları kaydırarak X profilini iki ayrı T profiline dönüştürmek, sıcak nokta oluşumunu engeller (Bode, 1996).

3.3. Feder (Kaburga) Tasarımı

Mühendislik tasarımlarında, bir parçanın rijitliğini artırmanın en kolay yolu et kalınlığını artırmak gibi görünse de döküm teknolojisinde bu yaklaşım hatalıdır. Kalın kesitler, daha önce değinildiği üzere porozite riskini ve ağırlığı artırır. Bu nedenle döküm tasarımcıları, mukavemeti artırmak için kütle eklemek yerine, feder yapılarını kullanmalıdır. Federler, parçanın atalet momentini artırarak bükülme ve burulmaya karşı direnç sağlarken, et kalınlığının ince ve homojen kalmasına olanak tanır. Ancak, metalurjik açıdan bakıldığında federler, sadece birer mukavemet elemanı değil, aynı zamanda kalıp içinde hızla soğuyan ısı yutucu (fin) yüzeylerdir.

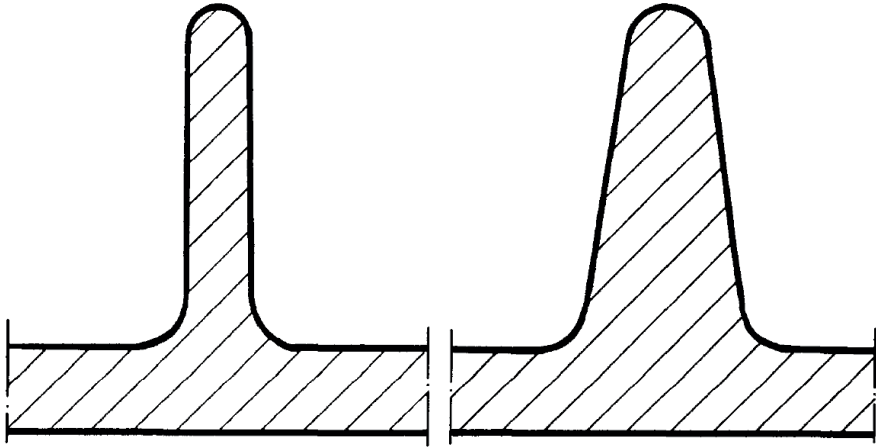
Feder tasarımında yapılan en yaygın hata, feder kalınlığının ana gövde kalınlığı ile aynı yapılmasıdır. Eğer feder kalınlığı, bağlandığı duvar kalınlığına

eşit olursa, birleşim noktasındaki T kesitinde oluşan kütle, her iki duvardan da %50-60 daha büyük bir modüle sahip olur. Bu durum, federin tabanında kaçınılmaz bir sıcak nokta (hot spot) ve akabinde çekinti boşluğu yaratır.

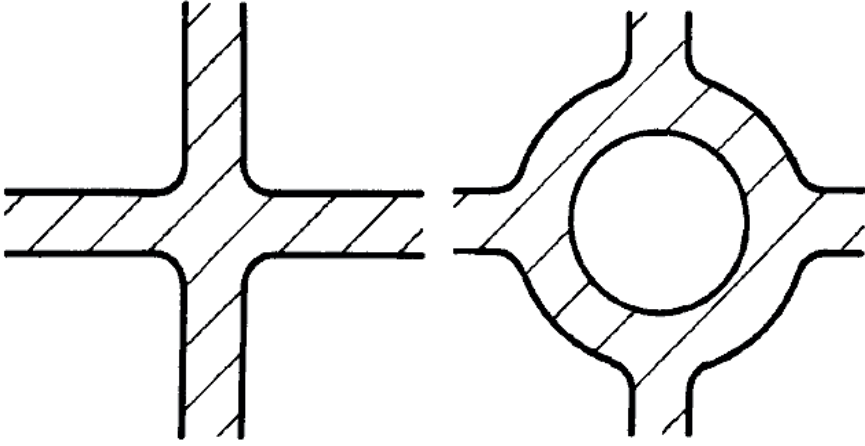
Bu sorunu önlemek için literatürde kabul gören standart kural; feder kalınlığının, ana duvar kalınlığının %60'ı ile %80'i arasında seçilmesidir. Bu oran, birleşim noktasındaki kütle yığılmasını minimize ederken, federin uç kısımlarından başlayan katılaşmanın gövdeye doğru sağlıklı bir şekilde ilerlemesini sağlar. Ayrıca, federlerin ucunun küt (düz) bırakılması yerine radyüslü (yuvarlak) bitirilmesi, dış liflerdeki gerilme yığılmasını azaltır.

Federlerin konumu ve yönü de en az boyutları kadar kritiktir. Rastgele yerleştirilen bir feder, sıvı metalin akış yolunu kesen bir baraj görevi görebilir veya türbülansa neden olabilir. Federler, mümkün olduğunca metal akış yönüne paralel yerleştirilmeli ve kalıp dolumunu desteklemelidir.

Karmaşık parçalarda, geniş yüzeyleri desteklemek için genellikle ızgara (grid) şeklinde çapraz feder yapıları kullanılır. Ancak bu yapıların kesişim noktaları (dört yol ağızları), yukarıda bahsedilen X-birleşimi sorununu doğurur. Bu durumu çözmek için federlerin kesiştiği noktanın tam ortasına silindirik bir maça (delik) yerleştirilerek kütle azaltılmalıdır.



Şekil 5. Doğru feder tasarımı ve et kalınlığı oranları. Feder kalınlığı, birleşim yerindeki kütleyi azaltmak için ana duvar kalınlığından daha az olmalıdır (Bode, 1996).



Şekil 6. Çoklu feder kesişimlerinde sıcak noktayı önlemek için merkezi boşaltma (maçalama) tekniği (Bode, 1996).

Son olarak, federlerin kalıptan rahat çıkabilmesi için (özellikle kum kalıp ve basınçlı dökümde) mutlaka uygun çıkma açısına sahip olması gerekir. Derin federlerde bu açı, federin tepe noktasını çok inceltebileceğinden, feder yüksekliği genellikle taban kalınlığının belirli bir katı ile sınırlandırılır.

3.4. Çıkma Açıları

Döküm parçalarının tasarımında, geometrinin kalıp içerisinde hasarsız bir şekilde çıkarılabilmesi, en az dolum ve katılaşma kadar kritik bir süreçtir. Parçanın kalıp ayırım düzlemine dik olan yüzeylerine, kalıptan sıyrılmayı kolaylaştırmak amacıyla verilen eğime çıkma açısı adı verilir.

Tasarımcılar genellikle parçaları dik açılı duvarlara sahip olacak şekilde modelleme eğilimindedir. Ancak dökümhane pratiğinde, yüzeyin kalıba sürtünmesi ve parça ile kalıp arasında oluşan vakum etkisi nedeniyle, 0° açılı (dik) bir yüzeyin kalıptan sıyrılması fiziksel olarak neredeyse imkânsızdır. Yetersiz çıkma açısı, kalıp yüzeyinin bozulmasına (kum kopması), parça yüzeyinde derin çiziklere ve hatta parçanın kalıp içinde sıkışıp deforme olmasına neden olur.

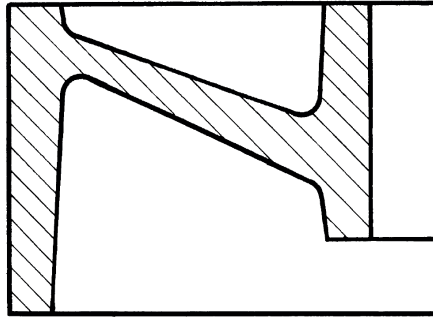
Çıkma açısının belirlenmesinde geçerli olan temel fiziksel mekanizma, metalin büzülme yönüdür. Bu bağlamda yüzeyler, iç yüzeyler ve dış yüzeyler olarak iki ana kategoride değerlendirilmelidir:

- **Dış Yüzeyler:** Metal katılaşırken büzüldüğünde, dış kalıp duvarlarından uzaklaşma eğilimi gösterir. Bu durum, parça ile kalıp arasında doğal

bir boşluk oluşmasını sağlar ve sıyrılmayı kolaylaştırır. Dolayısıyla dış duvarlarda nispeten küçük açılar (1° ile $1,5^\circ$) yeterli olmaktadır.

- **İç Yüzeyler (Maça ve Göbekler):** Parça soğuduğunda, içindeki maça veya kalıp çıkıntısının üzerine doğru büzülür. Bu durum, parçanın kalıbı bir mengene gibi sıkmasına neden olur ve sürtünme kuvvetlerini dramatik şekilde artırır. Bu nedenle, iç yüzeylerde ve derin ceplerde, dış yüzeylere kıyasla daha büyük çıkma açıları (en az 2° ile 3°) uygulanması zorunludur.

Tasarımcının teknik resimde çıkma açısını nasıl ifade ettiği de boyutsal toleranslar açısından hayati önem taşır. Çıkma açısı verilirken parça geometrisinin tabanda mı yoksa tepede mi değişeceği netleştirilmelidir. Bode (1996) tarafından şematize edildiği üzere; açı, parçanın mukavemetini düşürmemek adına genellikle malzeme ekleyerek (+) verilmeli, yani taban genişletilmelidir.



Şekil 7. Çıkma açısı prensibi. Uygun çıkma açısı ile sürtünmesiz ayrılma ve açının malzeme eklenerek uygulanması.

Sonuç olarak; çıkma açısı, üretimden sonra parçanın neden teknik resimdeki ölçülerden farklı olduğu tartışmasının en büyük kaynağıdır. Bu tartışmayı önlemek için tasarımcı, açının nereden başlayacağını ve hangi yöne doğru verileceğini teknik resim üzerinde net olarak tanımlamalıdır.

3.5. Delik ve Yuvaların Konumu

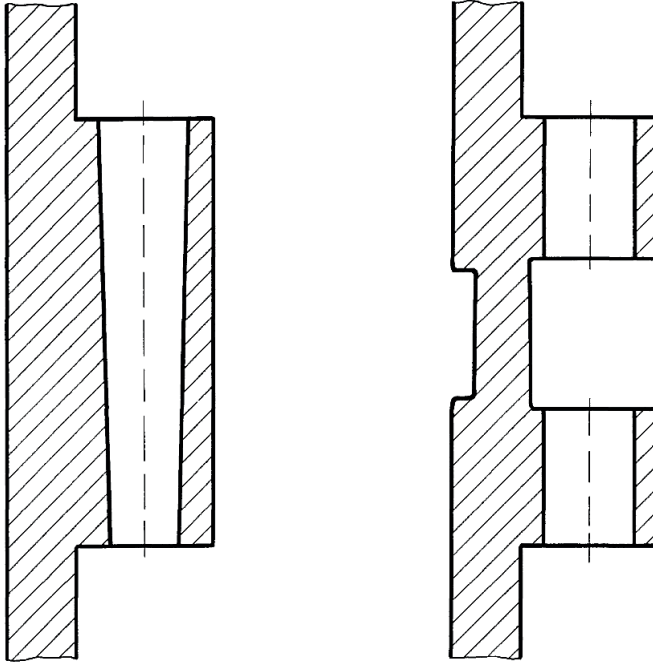
Döküm parçaları üzerindeki delikler ve yuvalar, montaj ve fonksiyonellik için vazgeçilmez unsurlardır. Ancak tasarımcı, teknik resim üzerine her çapta ve derinlikte deliği kolaylıkla çizebilse de bu deliklerin döküm yöntemiyle elde edilmesi her zaman teknik veya ekonomik açıdan rasyonel değildir.

Tasarımcının bu aşamada vermesi gereken ilk stratejik karar şudur: “Bu deliği dökmeli miyim, yoksa parçayı dolu döküp sonradan talaşlı imalatla mı delmeliyim?”

Küçük çaplı deliklerin (genellikle 6-10 mm altı) dökülerek elde edilmesi, ince kesitli kum maçaların kullanılmasını gerektirir. Bu ince maçalar, döküm sırasında sıvı metalin yüksek sıcaklığı ve basıncı altında kırılarak parçanın içinde kalabilir veya metalin ısıyla sinterleşerek (kum yanması) yüzeye yapışabilir. Bu tür durumlarda deliği temizlemek, matkapla yeni bir delik açmaktan çok daha zor ve maliyetli hale gelir. Bu nedenle genel kabul gören yaklaşım; küçük deliklerin körlenmesi (dolu bırakılması) ve sonradan delinmesidir.

Dökülerek elde edilmesine karar verilen delikler içinse tasarımcı, maçanın dayanım sınırlarını belirleyen geometrik oranlara sadık kalmalıdır. Maça ne kadar uzun ve ince olursa, kırılma veya yüzme riski o kadar artar.

Özellikle yataklama amacıyla kullanılan uzun deliklerde, boydan boya tek bir maça kullanmak yerine, tasarımın optimize edilmesi gerekir. Şekil 8’de görüldüğü üzere, deliğin orta kısmı boşaltılarak iki kısa delik haline getirilmesi, maça boyunu kısaltır ve dayanımı artırır.



Şekil 8. Çapma oranla uzun olan deliklerin tasarım optimizasyonu. (a) Yanlış: Tek parça uzun maça kullanımı kırılma ve eksen kaçıklığı riski taşır. (b) Doğru: Orta kısmın boşaltılarak iki kısa ve rijit maça ile çözüm üretilmesi (Bode, 1996).

Ayrıca deliklerin parça kenarına olan mesafesi de kritiktir. Bir delik, parçanın kenarına çok yakın konumlandırılırsa, arada kalan ince metal duvar döküm sırasında yeterince beslenemeyebilir. Güvenli bir tasarım için, işlenmeyecek ham deliklerin kenara olan mesafesi, en az delik yarıçapı kadar olmalıdır.

3.6. İşleme Paylarının Optimizasyonu

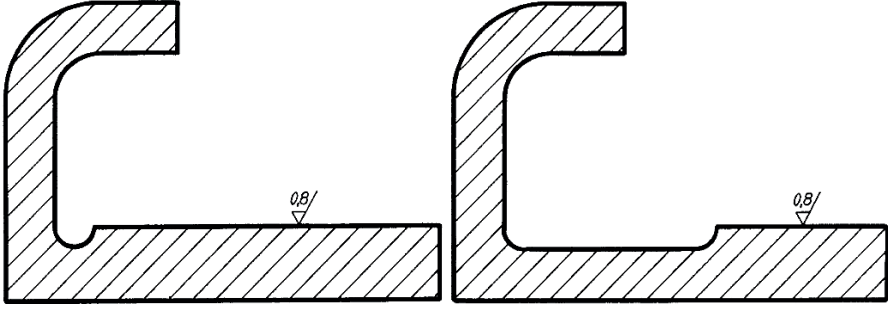
Döküm teknolojisi, net şekle yakın üretim kabiliyeti sunsa da fonksiyonel yüzeylerin çoğu zaman ham döküm toleranslarından daha hassas ölçülere ve daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olması gerekir. Bu nedenle, bir döküm parçasının diğer parçalarla temas edeceği, sızdırmazlık sağlayacağı veya yataklanacağı yüzeyler mutlaka talaşlı imalat işlemine tabi tutulur.

Tasarımcının burada yönetmesi gereken temel parametre işleme payıdır. İşleme payı, ham döküm parça üzerine eklenen ve sonradan talaş kaldırılarak yok edilecek olan ekstra metal katmanıdır. Bu katmanın kalınlığı; döküm yönteminin hassasiyetine, parçanın boyutuna ve seçilen referans yüzeylere göre değişir (ISO 8062 standartları referans alınır).

Ancak tasarım hatası, genellikle payın miktarında değil, konumunda yapılır. En sık yapılan hata, geniş yüzeylerin tamamının işlenmeye çalışılmasıdır. Bu yaklaşım hem işleme maliyetini artırır hem de dökümün sert kabuğunun tamamen kaldırılmasına neden olarak korozyon direncini düşürebilir.

Doğru tasarım stratejisi, sadece temasın gerçekleşeceği bölgelerin işlenmesi ve bu bölgelerin ham yüzeyden daha yukarıda olacak şekilde yükseltilmiş tasarlanmasıdır.

Yüzeylerin yükseltilmesi sadece talaş hacmini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kesici takımın erişimini de kolaylaştırır. Bode (1996) tarafından Şekil 9'da gösterildiği üzere; eğer işlenecek yüzey, parçanın geri kalanıyla aynı seviyede veya daha aşağıda (gömük) tasarlanırsa, standart ve ekonomik bir takım olan çanak taşlama taşı dikey duvarlara çarpacağı için kullanılamaz. Bu durumda daha küçük çaplı, özel ve pahalı takımlarla işlem yapmak gerekir.



Şekil 9. İşlenecek yüzeylerin erişilebilirliği. (a) Yanlış: Gömük veya duvar dibindeki yüzeyler standart taşlama taşlarının erişimini engeller. (b) Doğru: Yüzeyin yükseltilerek tasarlanması, geniş çaplı ve ekonomik taşlama taşlarının kullanımına olanak tanır (Bode, 1996).

Sonuç olarak tasarımcı, işlenecek yüzeyleri belirlerken şu prensibi izlemelidir: İşleme yüzeyi asla ham döküm yüzeyi ile aynı düzlemde olmamalı, ondan daima birkaç milimetre yüksekte duran bir adacık şeklinde tasarlanmalıdır. Bu, hem döküm hatalarının (kum vb.) takımı köreltmesini engeller hem de takımın rahatça çalışabileceği bir boşluk yaratır.

3.7. Toleranslandırma

Tasarım mühendisinin teknik resim üzerinde belirlediği toleranslar, parçanın sadece montaj edilebilirliğini değil, döküm maliyetini de doğrudan belirleyen en kritik parametredir. Ancak döküm teknolojisi, doğası gereği talaşı imalat kadar yüksek hassasiyet sunabilen bir süreç değildir. Sıvı metalin katılaşma büzülmesi, kalıp kumunun termal genleşmesi ve kalıp yarılarının montaj hassasiyeti gibi çok sayıda değişken, nihai boyutlarda sapmalara neden olur.

Bu nedenle tasarımcı, döküm parça toleranslarını belirlerken keyfi dar toleranslar vermekten kaçınmalı ve uluslararası kabul görmüş standartlara sadık kalmalıdır. Günümüzde döküm endüstrisinde küresel geçerliliği olan temel standart ISO 8062 (Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts) standardıdır. Bu standart, döküm yöntemine (kum, kokil, basınçlı vb.) ve alaşım türüne göre ulaşılabilecek boyutsal tolerans sınıflarını (DCTG - Dimensional Casting Tolerance Grades) tanımlar.

Toleranslandırmada dikkate alınması gereken en önemli gizli kısıt, Kalıp Ayrım Düzlemi etkisidir. Bir döküm parçasının tüm ölçüleri aynı hassasiyette değildir:

- **Aynı Kalıp Yarısı İçindeki Ölçüler:** Parçanın iki noktası da aynı kalıp derecesi (örneğin sadece alt derece) içinde kalıyorsa, bu ölçü sadece model hassasiyetine ve metalin büzülmesine bağlıdır. Dolayısıyla oldukça hassastır.
- **Kalıp Ayrımını Kesen Ölçüler:** Eğer ölçülen mesafe, kalıbın alt yarısından başlayıp üst yarısında bitiyorsa (yani ayırım çizgisini kesiyorsa), işin içine kalıp kapatma hassasiyeti ve derece kayması girer. Bu nedenle, kalıp ayırımını geçen ölçülere, aynı kalıp yarısındaki ölçülere kıyasla daha geniş toleranslar verilmesi zorunludur.

Tasarımcılar için altın kural şudur: Parçanın fonksiyonu için kritik olan hassas detaylar, mümkünse kalıbın aynı yarısında kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Eğer çok dar bir tolerans (örneğin H7 gibi) mutlaka gerekirse, bu bölge döküm toleranslarıyla elde edilmeye çalışılmamalı; önceki bölümde (Bölüm 3.6) belirtildiği gibi işleme payı bırakılarak talaşlı imalata havale edilmelidir. Unutulmamalıdır ki, dökümhaneden talep edilen gereksiz her mikronluk hassasiyet, kalıp maliyetini ve hurda oranını katlanarak artırır.

4. Sonuç ve Değerlendirme

Endüstriyel üretim tarihinde Bronz Çağından bu yana varlığını sürdüren döküm teknolojisi, günümüzde dijitalleşme ve malzeme bilimindeki gelişmelerle birlikte yeni bir evrim sürecine girmiştir. Ancak teknolojinin ulaştığı seviye ne olursa olsun, bir döküm parçasının kalitesini belirleyen temel faktör değişmemiştir: Tasarımcının geometrik kararları ile sıvı metalin fiziksel davranışları arasındaki uyum.

Bu çalışmada detaylandırılan konstrüksiyon kuralları, tasarım mühendislerine sadece ne yapmaları gerektiğini değil, neden yapmaları gerektiğini termodinamik ve mekanik temellere dayandırarak sunmuştur. İncelenen prensipler ışığında varılan temel çıkarımlar şunlardır:

1. **Geometri, Metalurjiyi Dikte Eder:** Tasarımcının CAD ekranında çizdiği her çizgi, gerçek dünyada bir ısı transfer sınırı şartına dönüşür. Et kalınlığının homojenliği, kesit geçişlerinin yumuşaklığı ve birleşim noktalarının tasarımı; sadece parçanın şeklini değil, iç yapısındaki tane boyutunu, porozite dağılımını ve mekanik özelliklerini doğrudan belirler.
2. **Üretilbilirlik Bir Sonradan Düşünce Değildir:** Geleneksel tasarla ve duvardan at yaklaşımı, yerini eş zamanlı mühendislik prensiplerine bırakmak zorundadır. Maça dayanımı, çıkma açıları ve işleme payları

gibi parametrelerin tasarımın ilk aşamalarında (konsept safhasında) dikkate alınması, ürün geliştirme maliyetlerini ve süresini dramatik ölçüde azaltmaktadır.

3. Simülasyon Bir Doğrulama Aracıdır, Tasarımcı Değildir:

Döküm simülasyon yazılımları (CAE), mühendislik dünyasında devrim yaratmış olsa da bu araçlar kötü bir tasarımı iyi bir parçaya dönüştüremez. Simülasyon teknolojileri, ancak bu bölümde ele alınan temel döküm kurallarına sadık kalınarak oluşturulmuş tasarımlar üzerinde gerçek potansiyelini (optimizasyon ve doğrulama) sergileyebilir.

Geleceğin mühendislik dünyasında, döküm teknolojisinin rolü sadece karmaşık şekilleri üretmekle sınırlı kalmayacak, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerinin (hafifletme ve enerji verimliliği) gerçekleştirilmesinde de kilit bir rol oynayacaktır. Topoloji optimizasyonu ile elde edilen organik formların, bu çalışmada belirtilen döküm kuralları (yönlenmiş katılaşma, beslenebilirlik) ile harmanlanması, Eko-Döküm çağının temelini oluşturacaktır.

Sonuç olarak; başarılı bir döküm parçası, tasarım ofisindeki mühendis ile dökümhane zeminindeki metalürji uzmanının aynı teknik dili konuşabilmesiyle mümkündür. Bu çalışmada sunulan kurallar bütünü, bu iki disiplin arasındaki gri alanları netleştiren ortak bir alfabe niteliğindedir. Tasarımcının görevi, sadece fonksiyonel bir hacim yaratmak değil, sıvı metalin kalıp içerisindeki serüvenine rehberlik edecek akılcı bir geometri kurgulamaktır.

5. Kaynakça

- Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2011). *Sustainable materials: With both eyes open*. Cambridge, UK: UIT Cambridge.
- Anderson, D. M. (2014). *Design for manufacturability: How to use concurrent engineering to rapidly develop low-cost, high-quality products for lean production*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ashby, M. F. (2012). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Beeley, P. R. (2001). *Foundry technology* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Bode, E. (1996). *Konstruktionsatlas* (6. Aufl.). Wiesbaden, Almanya: Springer Fachmedien.
- Boothroyd, G. (2002). *Product design for manufacture and assembly* (2nd ed.). New York, NY: Marcel Dekker.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (2010). *Product design for manufacture and assembly* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Campbell, J. (2003). *Castings* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Campbell, J. (2015). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Clark, K. B., & Fujimoto, T. (1991). *Product development performance: Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Czerwinski, F. (2011). *Magnesium alloys: Design, processing and properties*. Rijeka, Croatia: InTech.
- Flemings, M. C. (1974). *Solidification processing*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Giurco, D., Prior, T., & Mudiger, B. (2014). Designing for circular production: Metal recycling. *Journal of Cleaner Production*, 66, 22-30.
- Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (7th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Hatton, A. P., & Piek, S. (2006). Hot tearing and thermal stresses in casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 19(3), 150-158.
- Jolly, M. R. (2005). Profitable casting: Process modeling and simulation. In *Casting design and performance* (pp. 35-42). Materials Park, OH: ASM International.
- Prasad, B. (1996). *Concurrent engineering fundamentals: Integrated product and process organization*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Ravi, B. (2005). *Metal casting: Computer-aided design and analysis*. New Delhi, India: PHI Learning.

- Ravi, B. (2008). Casting simulation and optimization: Benefits, bottlenecks, and best practices. *Indian Foundry Journal*, 54(1), 21-28.
- Sutcliffe, M., & Kim, K. (2012). Real-time simulation of metal casting processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5), 450-460.
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Ullman, D. G. (2010). *The mechanical design process* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

Electric Vehicles: Technological, Energetic And Environmental Dimensions

Gökhan Öztürk¹

Ömer Ali Karaman²

Abstract

Electric vehicles represent a major technological shift in the transportation sector, driven by advancements in electrification and energy systems. This book chapter provides a structured and comprehensive overview of electric vehicles with a primary focus on their technological and energetic dimensions. The chapter begins by outlining the historical development of electric vehicles, followed by a detailed classification of vehicle types, including battery electric vehicles, hybrid electric vehicles, and fuel cell electric vehicles. The fundamental technical components of electric vehicles are subsequently examined, emphasizing electric motors, power electronics systems, and energy management strategies. Energy storage systems are discussed in detail, covering battery technologies currently used in electric vehicles, battery management systems, and emerging battery technologies that may contribute to improved performance, reliability, and system integration. Finally, future-oriented technological trends are explored with respect to ongoing developments in electrified powertrains, energy storage solutions, and system-level integration. Overall, this chapter aims to present an academically rigorous and up-to-date reference that supports a deeper understanding of electric vehicle technologies and their technological evolution.

-
- 1 Lecturer, Department of Mechanical and Metal Technologies, Vocational School of Technical Sciences, Batman University, gokhan.ozturk@batman.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-2780-6966
 - 2 Associate Professor Dr, Department of Electronics and Automation, Vocational School of Technical Sciences, Batman University, omerali.karaman@batman.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-1640-861X

1. Introduction

The increasing global population, rising urbanisation rates and increased demand for individual transport are causing a significant rise in energy consumption [1]. A major portion of this increase is attributable to the transport sector. Road transport, in particular, plays a decisive role in terms of fossil fuel consumption and associated greenhouse gas emissions. Issues such as climate change, air pollution and energy supply security have made it imperative to develop more sustainable solutions in vehicle Technologies [2]. Research into reducing environmental pollutants highlights the need for sustainable approaches and emphasises the strategic importance of clean energy Technologies [3], [4], [5].

Electric vehicles are considered one of the key components of this transformation due to their high energy efficiency drive systems, low operating costs, and near-zero emissions at the local level. The structural simplicity offered by electric propulsion systems, along with advantages such as reduced mechanical losses and enhanced driving comfort, have led to these vehicles being extensively studied in both academic and industrial circles [6].

This chapter examines electric vehicle technologies in detail from an academic perspective, covering their historical development, classification approaches, fundamental technical components, energy storage systems, charging infrastructure, environmental and economic impacts, and future trends. The aim is to present the role of electric vehicles within transport systems in a comprehensive framework.

2. The Historical Development of Electric Vehicles

The origins of electric vehicles date back to a similar time period as internal combustion engine vehicles. The first electric vehicles, developed in the late nineteenth century, were considered a noteworthy alternative for urban transport at the time due to their quiet operation and ease of use. However, the limited energy density of battery technology and long charging times prevented these vehicles from becoming widespread.

The historical development of electric vehicles dates back to the early nineteenth century. In 1800, Alessandro Volta demonstrated that electrical energy could be stored through chemical means, laying the foundation for electrochemical energy storage systems. Subsequently, in 1821, Michael Faraday conducted experiments based on Volta's chemical cell, leading to the fundamental principles of electric motors and generators. The first known electric vehicle model was constructed in 1835 in the Netherlands by Professor Stratingh. During the mid-1830s, electric road vehicles were

also developed in the United States by Thomas Davenport, followed by the introduction of an electric locomotive by Robert Davidson, both of which relied on non-rechargeable batteries. The advancement of rechargeable lead-acid batteries after 1859 marked a significant milestone in electric vehicle technology. By the late nineteenth century, electric vehicles equipped with lead-acid batteries began to emerge, including early three-wheeled designs demonstrated in Europe. In the 1880s, several practical electric vehicles were developed in France and the United Kingdom, achieving modest driving ranges and speeds suitable for urban transportation. Towards the end of the nineteenth century, electric vehicle production expanded in the United States and Europe, with notable contributions from companies such as the Electric Carriage and Wagon Company. At the beginning of the twentieth century, electric vehicles were widely adopted in the United States, even outnumbering gasoline-powered vehicles at certain points. However, improvements in intercity road networks and increasing demand for longer driving ranges during the 1920s gradually reduced the competitiveness of electric vehicles, leading to a decline in their widespread use [7]. Figure 1 shows an example of one of the electric vehicles.

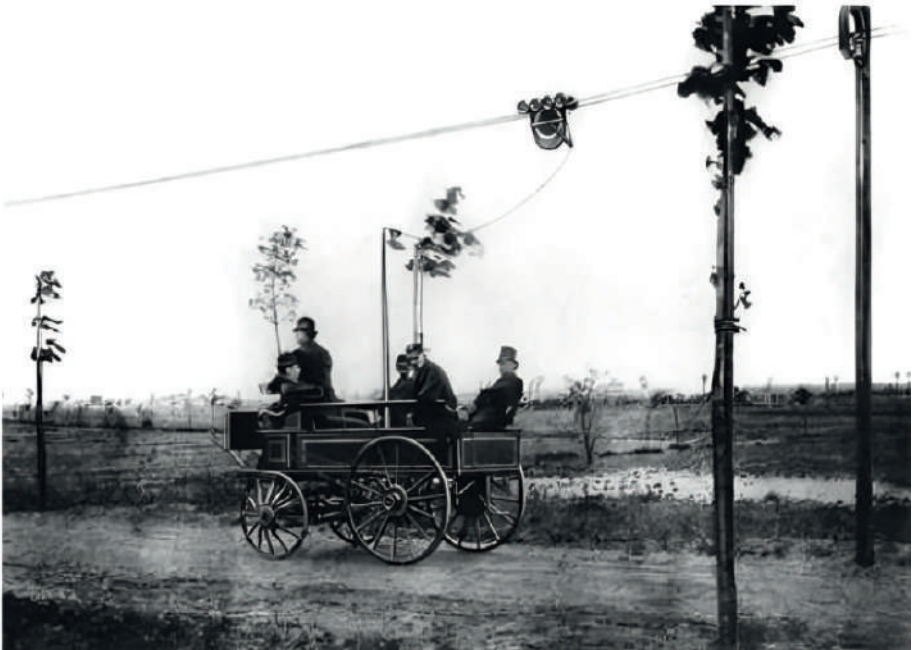


Figure 1. One of the first examples of an electric vehicle [8]

The first mass-produced electric vehicle, the EV1, was manufactured in the United States by General Motors in 1996. With this development, the automotive industry shifted its focus back towards electric vehicles. Various brands and models were launched, including the Honda EV Plus, Toyota RAV EV, Ford-Think City, Nissan Altra EV, and Peugeot 106 Electric [9].

The rapid development of internal combustion engine technologies in the first half of the 20th century, the availability of cheap oil resources, and the widespread adoption of mass production techniques led to electric vehicles being relegated to the background. However, the oil crises of the 1970s brought the issue of energy supply security back to the forefront and accelerated research into alternative propulsion systems. Since the 1990s, stricter environmental regulations, concerns about urban air quality and advances in battery technology have brought electric vehicles back into the spotlight. In particular, the commercial viability of lithium-ion batteries is considered a turning point in the development of modern electric vehicles [10].

3. Types and Classification of Electric Vehicles

Electric vehicles are examined under different categories based on their energy source and drive system architectures. This classification is important for understanding the usage scenarios and environmental impacts of the vehicles. Electric vehicle technologies are categorised under three main models: fully electric vehicles, hybrid electric vehicles, and battery or non-battery fuel cell vehicles [10]. Figure 2 shows the classification of electric vehicles according to their types.

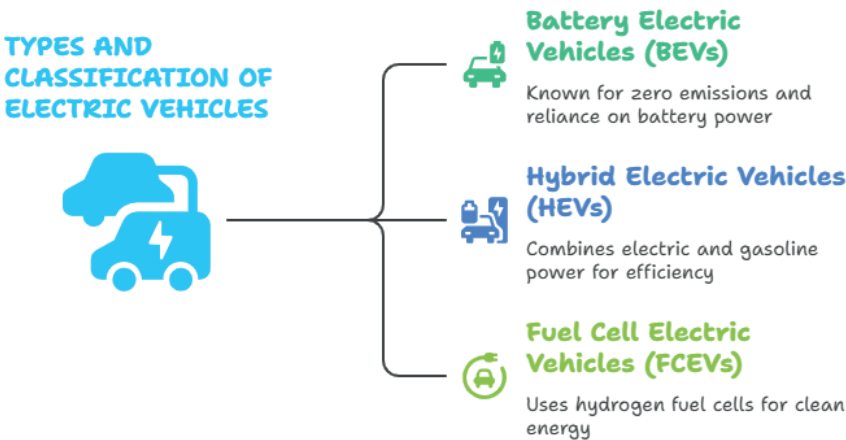


Figure 2. Classification of electric vehicles

3.1. Battery Electric Vehicles (BEV)

Battery-powered electric vehicles are vehicle systems that derive all their propulsion energy from electrical energy stored in battery packs. These vehicles do not contain internal combustion engines; kinetic energy is generated solely through electric motors. The high efficiency of electric motors and the energy recovery provided by regenerative braking systems contribute significantly to reducing overall energy consumption. The BEV architecture reduces maintenance requirements due to its mechanically simpler structure. However, limited range and dependence on charging infrastructure are among the main factors limiting the widespread use of these vehicles. The key features of BEVs include a fully electric drive system, typically high-capacity lithium-ion-based battery packs, high motor efficiency, and regenerative braking capability. The absence of an internal combustion engine eliminates exhaust emissions, contributing to improved air quality and reduced greenhouse gas emissions. The main advantages of battery-powered electric vehicles include zero exhaust emissions, low energy costs, reduced maintenance requirements, and quiet operation. Furthermore, tax reductions and incentive mechanisms implemented in many countries increase the economic appeal of BEVs. However, range limitations dependent on battery capacity, relatively long charging times, battery life, and battery replacement costs are considered fundamental constraints of these vehicles. Additionally, environmental benefits may vary depending on the structure of the energy sources used in electricity production [11].

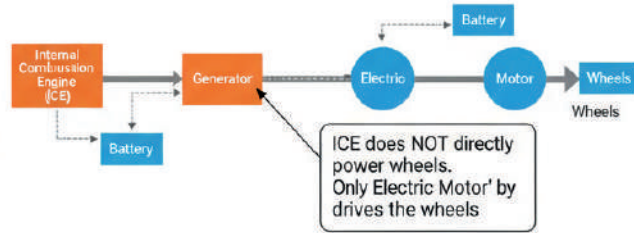
3.2. Hybrid Electric Vehicles (HEV)

In hybrid electric vehicles, the internal combustion engine and electric motor work together to meet the vehicle's propulsion needs. The electric motor typically engages at low speeds and in stop-start conditions, contributing to reduced fuel consumption and emissions. Due to the limited capacity of the battery, energy is mostly supplied through regenerative braking or via the internal combustion engine. Plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) feature higher-capacity batteries that can be charged from an external power source. This allows short journeys to be completed in fully electric mode, while the internal combustion engine kicks in for longer distances, reducing range anxiety [12].

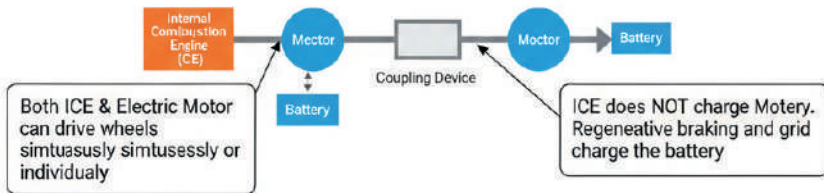
Hybrid electric vehicles (HEVs) are defined as vehicles that utilise multiple energy storage and conversion systems simultaneously. In the literature, hybrid vehicles are primarily classified based on their propulsion architecture, degree of hybridisation, and the nature of the energy source used. In terms

of drive architecture, hybrid vehicles are considered as series, parallel, and series-parallel (combined or power-split) hybrid systems. In a series hybrid structure, the internal combustion engine is solely responsible for electricity generation and has no mechanical connection to the wheels. In parallel hybrid systems, the internal combustion engine and electric motor are mechanically connected to the wheels and can provide propulsion either together or separately. Series-parallel hybrid systems combine the advantages of both architectures, allowing engine power to be transmitted both mechanically and electrically, thereby achieving higher efficiency under different driving conditions. In the classification based on the degree of hybridisation, micro (or mild), medium and full hybrid vehicles come to the fore. In micro and mild hybrid systems, the electric motor generally plays a supporting role, while in full hybrid vehicles, it is possible to drive solely on electric power for limited distances. In addition to this group, plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs), which can be charged from an external source, offer a longer electric driving range thanks to their higher battery capacities. Classification based on the nature of the energy source includes electric-internal combustion engine hybrids and fuel cell hybrid systems. Fuel cell hybrid vehicles typically have a series hybrid architecture, with the fuel cell serving as the primary energy source and the battery or supercapacitors used to meet sudden power demands [13]. Figure 3 shows hybrid vehicles in terms of drive architecture.

1. Series Hybrid



2. Parallel Hybrid



3. Series-Parallel (Mixed / Power-Split Hybrid)

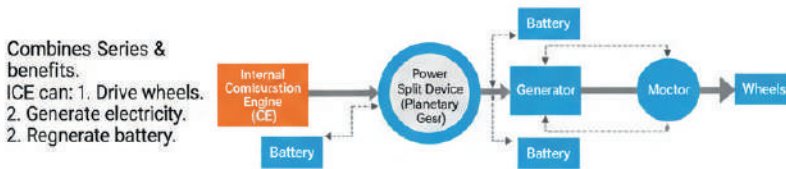


Figure 3. Hybrid vehicles in terms of drive architecture

The most significant advantages of hybrid electric vehicles include improved fuel economy, reduced emissions and the elimination of range anxiety. However, increased system complexity, relatively high purchase costs and partial dependence on fossil fuels are considered to be the main limitations of these vehicles.

3.3. Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV)

In fuel cell electric vehicles, electrical energy is produced through electrochemical reactions between hydrogen and oxygen. In these systems, the electric motor serves as the primary propulsion element, while the battery is typically used as an auxiliary energy storage unit. The fact that only water vapour is emitted during operation makes these vehicles an environmentally appealing alternative [14].

The basic components of FCEVs include high-pressure hydrogen storage tanks, a fuel cell stack, an electric motor, and a small-capacity battery system. The fuel cell stack generates electricity through the reaction of hydrogen and oxygen, and the resulting energy is transferred directly to the electric motor. Energy recovered during regenerative braking is stored in the battery [15]. Figure 4 shows a schematic representation of fuel cell vehicle components.

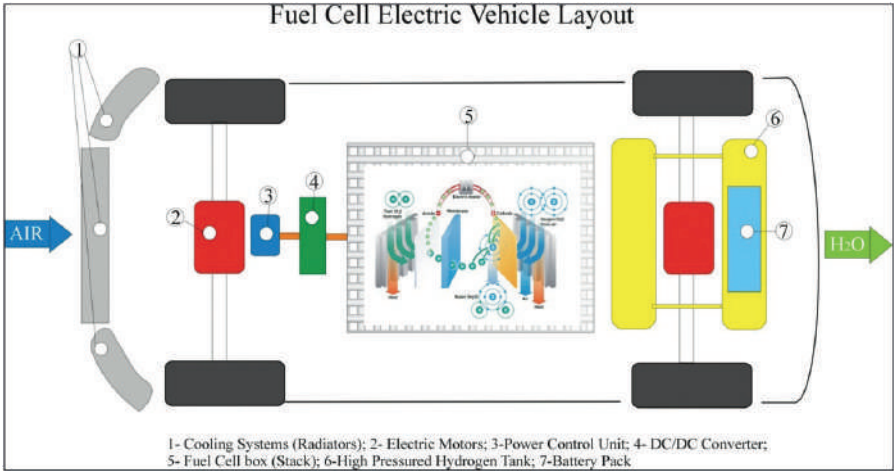


Figure 4. Schematic representation of fuel cell vehicle components [16]

Fuel cell electric vehicles offer significant advantages such as zero-emission operation, long driving range, and short refuelling times. However, the energy-intensive nature of hydrogen production, the limited availability of hydrogen production based on renewable sources, and the lack of hydrogen refuelling infrastructure are among the main obstacles to the widespread adoption of this technology. Furthermore, high system costs and ongoing research into the long-term durability of fuel cells are considered important issues to be addressed in the development process of FCEV technology [17].

4. Basic Technical Components of Electric Vehicles

The performance, efficiency and reliability of electric vehicles depend on the design and integration of their technical components. These components cover a wide range, from the vehicle's energy storage system (usually a battery) to the electric motor, power electronics systems and energy management systems. The correct selection and integration of each component has a direct impact on the overall performance of electric vehicles.

4.1. Electric Motors

One of the most important components directly determining the performance of the drive system in electric vehicles is the electric motor. In the literature, motors used in electric vehicle applications are examined in five main groups: DC brushed motors, DC brushless motors, asynchronous (induction) motors, synchronous motors, and switched reluctance motors. These motor types exhibit different characteristics in terms of criteria such as power-to-weight ratio, torque-speed characteristics, efficiency, control complexity, and cost [18]. Figure 5 schematically illustrates some characteristics of different types of electric motors.

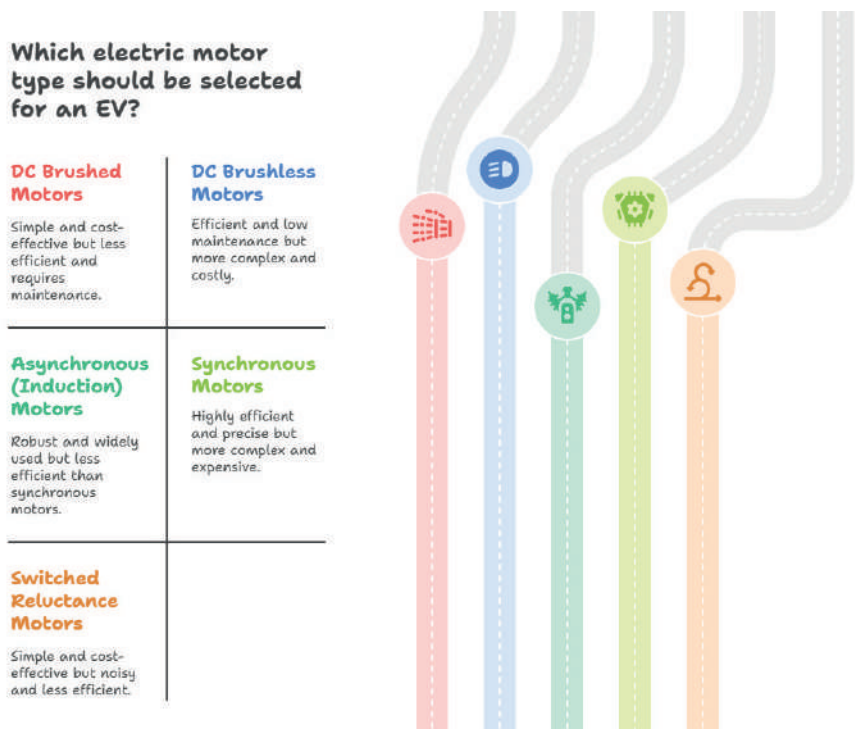


Figure 5. Schematic representation of some characteristics of different types of electric motors

Brush-type DC motors have been widely favoured in early applications of electric vehicles due to their high starting torque and simple control structures. However, mechanical wear caused by brushes and commutators increases maintenance requirements and limits maximum operating speed. Furthermore, their relatively low power density restricts the use of these motors in modern electric vehicles [18].

Brushless DC motors (BLDC) offer higher efficiency, longer service life and lower maintenance requirements thanks to the electronic implementation of mechanical commutation. High power-to-weight ratios and good speed-torque characteristics make BLDC motors attractive for electric vehicle applications. However, the high cost of these motors' drivers and control systems is considered a significant disadvantage [18].

Asynchronous motors are another type of motor widely used in electric vehicles due to their robust construction, high reliability and lack of a commutator. Their ability to operate across a wide speed range and deliver high efficiency at both full and partial loads are key factors in their popularity. However, the limited operating range in the constant power region can impose performance constraints under certain driving conditions [18].

Keyed reluctance motors, on the other hand, stand out due to their simple rotor structures, high starting torques, and ability to operate across a wide speed range. Furthermore, these motors are considered a potential alternative for electric vehicles due to their fault tolerance and relatively low motor and driver costs. However, issues such as torque fluctuations and acoustic noise are among the factors limiting the widespread use of these motors [18].

Ultimately, the selection of the motor type used in electric vehicles depends on numerous parameters, including vehicle performance, energy efficiency, cost, and intended use. Therefore, different motor types are evaluated according to different electric vehicle architectures and driving requirements.

4.2. Power Electronics Systems

Power electronics systems are one of the fundamental components of electric vehicles and convert the direct current obtained from the battery into the alternating current required for the electric motor. These systems consist of two main components: inverters and converters.

Inverters: Inverters convert the direct current power from the battery into the alternating current power required for the electric motor to operate. The efficiency of inverters has a direct impact on motor performance and the vehicle's overall energy consumption. Modern inverters use high switching frequencies and advanced control algorithms to achieve high efficiency and low harmonic distortion[19].

Converters: Converters perform energy conversion between different voltage levels. For example, they are used to step up or step down the battery voltage to the voltage level required by the motor or other auxiliary systems.

Converters can be of different types, such as DC-DC (Direct Current - Direct Current) and AC-DC (Alternating Current - Direct Current)[19].

The switching frequencies of power electronics systems are critical in terms of efficiency and thermal management. Higher switching frequencies allow for the use of smaller and lighter components, but they can also increase switching losses. Therefore, in power electronics design, a careful balance must be struck between switching frequency, efficiency, size, and cost.

4.3. Energy Management Systems

Energy management systems optimise the flow of energy between the battery, motor and auxiliary systems in electric vehicles, thereby increasing the vehicle's efficiency and range. Energy management systems develop and implement strategies to reduce energy consumption based on driving conditions, battery status and driver preferences.

The basic functions of energy management systems are as follows:

Battery Management: The battery management system extends battery life and ensures safety by controlling the battery's charging and discharging processes. The battery management system continuously monitors the voltage, temperature, and current of the battery cells and activates protection mechanisms in cases of overcharging, over-discharging, and overheating [20].

Motor Control: The motor control system adjusts the motor's torque and speed according to the driver's demands. This system optimises the motor's efficiency, reducing energy consumption and improving driving performance [20].

Regenerative Braking: The regenerative braking system converts the vehicle's kinetic energy into electrical energy to charge the battery. This system extends the vehicle's range, particularly in urban driving, by increasing energy recovery [20].

Management of Auxiliary Systems: Energy management systems optimise the energy consumption of auxiliary systems such as air conditioning, heating, lighting, and others. For example, smart algorithms can be used to ensure that the air conditioning system only operates when necessary, thereby reducing its energy consumption [20].

Energy management systems are critical for increasing the efficiency and range of electric vehicles. Using advanced control algorithms and sensor technologies, the performance of energy management systems is continuously being improved.

5. Energy Storage Systems and Battery Technologies

Energy storage systems directly affect the range, performance and service life of electric vehicles.

5.1. Battery Technologies Used in Electric Vehicles

In electric vehicles, batteries are considered fundamental energy storage components that directly affect the vehicle's range, performance, safety, and total cost of ownership. Advances in battery technology have played a decisive role in the commercial proliferation of electric vehicles. Batteries preferred for electric vehicle applications are expected to have high energy density, long cycle life, low energy loss, sufficient power density, and safe operating characteristics. Different battery types have been used throughout history to meet these requirements [21].

Lead-acid batteries are one of the oldest rechargeable battery types used in electric vehicles. Although they have been preferred for many years due to their low cost and mature production technologies, their low specific energy values, limited cycle life, and high mass have made them disadvantageous for modern electric vehicle applications. Today, lead-acid batteries are mostly limited to electric two-wheeled vehicles, forklifts, and applications requiring low speeds [21].

Nickel-cadmium batteries, despite offering a longer cycle life and better power performance compared to lead-acid batteries, have not found widespread use in the electric vehicle market due to cadmium being a toxic heavy metal and their relatively low energy density. Similarly, nickel-metal hydride batteries offered higher energy density and a more environmentally acceptable structure than nickel-cadmium batteries. Thanks to these characteristics, they were used for a certain period, particularly in hybrid electric vehicles, but lost their competitive edge with the development of lithium-based batteries [21].

Lithium-ion batteries are currently the most widely used energy storage technology in electric vehicles. These batteries offer significant advantages for electric vehicle applications due to their high specific energy and energy density, low self-discharge rate, long cycle life, and relatively lightweight construction. Furthermore, the absence of the memory effect is another important factor that increases the efficiency of lithium-ion batteries. These characteristics contribute to increasing the range of electric vehicles and improving overall system efficiency [21].

5.2. Battery Management Systems

Battery management systems are considered fundamental control and monitoring units that ensure electric vehicle batteries operate safely, efficiently, and with a long service life. These systems aim to enhance battery performance and durability by balancing cell voltages, maintaining battery temperature under control, and ensuring critical parameters such as voltage, current, and temperature remain within safe operating limits. Furthermore, battery management systems prevent battery overload by optimising charging and discharging processes, thereby supporting system safety. Predicting internal parameters such as the battery's state of charge and health allows for the evaluation of the battery's current capacity and remaining service life. Furthermore, recording operational data and sharing it with vehicle control systems contributes to monitoring battery performance and optimising vehicle operation. Battery management system structures, supported by advanced sensing and control algorithms, are among the critical systems that directly affect the safety, efficiency, and service life of electric vehicle batteries [22].

5.3. Promising Battery Technologies

Various alternative battery technologies are being developed to overcome the current limitations of lithium-ion batteries and further enhance the performance of electric vehicles.

Solid-State Batteries: Solid-state batteries use a solid electrolyte instead of a liquid electrolyte. This increases the battery's energy density, improves its safety, and enables faster charging. Solid-state batteries are more stable and less flammable than lithium-ion batteries, which reduces the risk of fire. Furthermore, as they have a higher energy density, they can increase the range of electric vehicles [23].

Lithium-Sulphur Batteries: Lithium-sulphur batteries have a higher theoretical energy density than lithium-ion batteries. Sulphur is a more abundant and cheaper material than lithium, so these batteries may offer a cost advantage. However, lithium-sulphur batteries need improvement in areas such as cycle life and charge/discharge speed [23].

Sodium-Ion Batteries: Sodium-ion batteries use sodium instead of lithium. Sodium is a more abundant and cheaper element than lithium. These batteries may be suitable for large-scale applications, such as energy storage systems [23].

6. Charging Infrastructure and Network Integration

As electric vehicles become more widespread, the adequacy, reliability and accessibility of the charging infrastructure emerge as critical determinants. The level of development of the charging infrastructure reduces users' range anxiety and directly affects the integration of electric vehicles into daily transport systems. In this context, various charging technologies have been developed and implemented for different power levels and usage scenarios.

Alternating current (AC) slow charging systems are generally preferred in homes, workplaces and long-term parking areas. These systems operate at relatively low power levels and ensure that batteries are charged over longer periods of time. The positive effects of slow charging on battery life make this method a suitable option for daily use. Direct current (DC) fast charging systems, on the other hand, operate at higher power levels, enabling batteries to be charged significantly in a short time. These systems are particularly favoured on motorways, inter-city routes and in high-traffic areas, increasing the usability of electric vehicles for long-distance travel. Ultra-fast charging technologies, on the other hand, aim to reduce charging times to levels comparable to conventional fuel refuelling by offering much higher power levels; however, the widespread adoption of these systems is closely linked to technical limitations such as battery thermal management and grid capacity [24], [25].

The interaction between charging infrastructure and the electricity grid is becoming increasingly complex with the widespread adoption of electric vehicles. Charging a large number of vehicles simultaneously can place additional strain on distribution networks in particular. In this context, smart charging systems are considered an important solution for balancing grid load and ensuring the efficient use of energy resources. Smart charging approaches aim to optimise charging processes by taking into account parameters such as grid conditions, energy prices and user preferences [26].

Vehicle-to-Grid (V2G) applications, defined as the transfer of energy from the vehicle to the grid, enable electric vehicles to be considered not only as energy consumers but also as distributed energy storage units [27]. Thanks to this approach, the energy stored in electric vehicle batteries can be used via feedback during periods of high grid demand. V2G systems facilitate the integration of renewable energy sources into the grid and contribute to maintaining the energy supply-demand balance. However, the widespread adoption of these applications requires comprehensive consideration of issues such as battery life, standardisation, infrastructure investments, and regulatory frameworks.

7. Environmental Impacts

Life cycle analysis is used as a fundamental approach in assessing the environmental impacts of electric vehicles. This analysis method comprehensively addresses the environmental performance of electric vehicles by covering the stages of raw material sourcing, production, use and recycling. Battery production processes, in particular, stand out as one of the stages where environmental impacts are concentrated due to energy consumption and raw material use. However, advances in battery recycling technologies and improvements in production processes contribute to reducing these impacts. The environmental impacts of electric vehicles during the usage phase largely depend on the structure of the energy sources used in electricity generation. Increasing the share of renewable energy sources in electricity generation significantly reduces the total greenhouse gas emissions and environmental footprint of electric vehicles. Furthermore, the elimination of exhaust emissions contributes significantly to improving urban air quality.

8. Future-Oriented Technological Trends

The future of electric vehicle technology is being shaped by advances in digitalisation and energy storage. Autonomous driving systems, artificial intelligence-supported energy management and advanced battery chemistries are among the key technological components of this transformation.

Autonomous driving technologies aim to increase driving safety and improve traffic efficiency through advanced sensing and control systems. The software-based structure of electric vehicles facilitates the integration of these systems [28]. Artificial intelligence-supported energy management optimises energy consumption [29], extends battery life and improves vehicle performance by taking driving conditions and user behaviour into account.

New generation chemistries developed in battery technologies are advancing towards higher energy density, shorter charging times, and increased safety targets. These developments are expected to contribute to electric vehicles becoming more competitive in terms of range and cost. Overall, these technological trends are strengthening the role of electric vehicles within sustainable and smart transportation systems.

9. Conclusion and Evaluation

Electric vehicles stand out as a strategic technology area in line with the objectives of increasing energy efficiency, reducing greenhouse gas emissions, and developing sustainable transport systems. Both the structural advantages

in propulsion systems and the elimination of local emissions place electric vehicles in an important position among future transport solutions.

Advances in battery technology play a decisive role in improving the range, performance, and safety features of electric vehicles. In parallel, the widespread deployment of charging infrastructure and its planning in harmony with the electricity grid are making electric vehicles more accessible for everyday use. The shaping of energy policies to support renewable energy sources further strengthens the environmental benefits of electric vehicles.

In this context, addressing the technical, environmental and economic dimensions of electric vehicle technologies together is important for both academic research and industrial applications. A holistic approach will contribute to increasing the share of electric vehicles in transport systems and support the achievement of sustainable mobility goals.

References

- [1] G. Öztürk, A. Aslan, and M. Firat, 'The Effect of Dibutyl Maleate Additive on Combustion Characteristics in Compression Ignition Engines and Analysis of Performance Prediction Based on Machine Learning'. 2025.
- [2] Ö. Karaman, A. Aslan, G. Öztürk, and M. Canpolat, 'Machine Learning Algorithms For Electric Vehicle Charging Station Energy Consumption Prediction'. 2025.
- [3] Y. Altunkaynak and M. Canpolat, 'Effective removal of Cu (II) ions from aqueous solutions using low-cost, eco-friendly natural and modified potato peels', *Environ Monit Assess*, vol. 197, no. 3, p. 309, Feb. 2025, doi: 10.1007/s10661-025-13762-8.
- [4] M. Canpolat, 'Removing Co(II) and Mn(II) ions effectively from aqueous solutions by means of chemically non-processed Mardin stone waste: Equivalent, kinetic, and thermodynamic investigations', *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 42, no. 3, p. e14042, 2023, doi: 10.1002/ep.14042.
- [5] M. Canpolat and Y. Altunkaynak, 'Use of low-cost processed orange peel for effective removal of cobalt (II) and manganese (II) from aqueous solutions', *Ionics*, vol. 30, no. 1, pp. 591–605, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11581-023-05291-6.
- [6] G. Öztürk, M. N. Tansu, and U. Uz, 'Türkiye’de Hibrid Ve Elektrikli Araçlara Eğilimin Araştırılması', *Ejons International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences*, vol. 5, no. 20, pp. 814–823, Dec. 2021, doi: 10.38063/ejons.517.
- [7] K. G. Høyer, 'The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars', *Utilities Policy*, vol. 16, no. 2, pp. 63–71, June 2008, doi: 10.1016/j.jup.2007.11.001.
- [8] M. Singh, 'Green Energy for Metropolitan Transport', *International Journal on Power Engineering and Energy*.
- [9] M. Valenta, 'Doctor of Business Administration'.
- [10] A. Kerem, 'Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri', 2014.
- [11] A. Faraz, A. Ambikapathy, S. Thangavel, K. Logavani, and G. Arun Prasad, 'Battery Electric Vehicles (BEVs)', in *Electric Vehicles: Modern Technologies and Trends*, N. Patel, A. K. Bhoi, S. Padmanaban, and J. B. Holm-Nielsen, Eds, Singapore: Springer, 2021, pp. 137–160. doi: 10.1007/978-981-15-9251-5_8.
- [12] M. A. Hannan, F. A. Azidin, and A. Mohamed, 'Hybrid electric vehicles and their challenges: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 135–150, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.097.

- [13] M. Kebriaci, A. H. Niasar, and B. Asaci, 'Hybrid electric vehicles: An overview', in 2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), Oct. 2015, pp. 299–305. doi: 10.1109/ICCVE.2015.84.
- [14] T. Selmi, A. Khadhraoui, and A. Cherif, 'Fuel cell-based electric vehicles technologies and challenges', *Environ Sci Pollut Res*, vol. 29, no. 52, pp. 78121–78131, Nov. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-23171-w.
- [15] M. Muthukumar, N. Rengarajan, B. Velliyangiri, M. A. Omprakas, C. B. Rohit, and U. Kartheek Raja, 'The development of fuel cell electric vehicles – A review', *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 1181–1187, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.679.
- [16] B. Tanç, H. T. Arat, E. Baltacıoğlu, and K. Aydın, 'Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 20, pp. 10120–10128, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.112.
- [17] A. Pramuanjaroenkij and S. Kakaç, 'The fuel cell electric vehicles: The highlight review', *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 25, pp. 9401–9425, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.103.
- [18] S. Ravindra Jape and A. Thosar, 'Comparison Of Electric Motors For Electric Vehicle Application', *IJRET*, vol. 06, no. 09, pp. 12–17, Sept. 2017, doi: 10.15623/ijret.2017.0609004.
- [19] C. C. Chan and K. T. Chau, 'An overview of power electronics in electric vehicles', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 3–13, Feb. 1997, doi: 10.1109/41.557493.
- [20] D. Rimpas et al., 'Energy management and storage systems on electric vehicles: A comprehensive review', *Materials Today: Proceedings*, vol. 61, pp. 813–819, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.352.
- [21] S. Muslimin, Z. Nawawi, B. Y. Suprpto, and T. Dewi, 'Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles', presented at the 5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021), Atlantis Press, Feb. 2022, pp. 421–425. doi: 10.2991/ahe.k.220205.074.
- [22] R. Xiong and W. Shen, 'Battery Management Systems in Electric Vehicles', in *Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles*, Wiley, 2019, pp. 231–248. doi: 10.1002/9781119481652.ch8.
- [23] K. Itani and A. De Bernardinis, 'Review on New-Generation Batteries Technologies: Trends and Future Directions', *Energies*, vol. 16, no. 22, p. 7530, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16227530.
- [24] Ö. Karaman, S. Çelebi, and G. Öztürk, 'Electric Vehicle Charging Stations and Harmonic Problem', 2024, pp. 25–44.
- [25] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. Sealy, P. Israelsen, and J. Muhs, 'A review on inductive charging for electric vehicles', in 2011 IEEE International Ele-

- ctric Machines & Drives Conference (IEMDC), May 2011, pp. 143–147. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994820.
- [26] H. Tu, H. Feng, S. Srdic, and S. Lukic, ‘Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview’, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 861–878, Dec. 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2958709.
- [27] S. Çelebi, Ö. Karaman, and G. Öztürk, ‘Autonomous Driving Technologies and Cyber Security in Vehicles’, 2024, pp. 1–39.
- [28] G. Öztürk, S. Çelebi, and Ö. Karaman, ‘Autonomous Vehicles: Systems, Technologies and Sensors’, 2024, pp. 34–81.
- [29] A. Aslan, ‘Deep Learning In Neurological Imaging: A Novel Cnn-Based Model For Brain Tumor Classification Türkiye And Health Risk Assessment’, *JHVS*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, June 2025, doi: 10.33715/inonusaglik.1645318.

Digital Transformation of Aviation Maintenance: Artificial Intelligence-Enabled Approaches

Mustafa Melikşah Özmen¹

Bekir Aksoy²

Abstract

Aircraft maintenance is a cornerstone of flight safety, operational continuity, and cost-effectiveness in the aviation industry. Traditional maintenance approaches, relying on scheduled inspections and corrective actions, face limitations in flexibility and efficiency due to their dependence on human intervention. In recent years, artificial intelligence has revolutionized the sector by shifting maintenance management from reactive methods to predictive and data-driven strategies. This transformation has enabled innovative solutions in digital twins, structural health monitoring, automated visual inspections, foreign object debris detection on runways, decision-support systems, and spare parts logistics optimization.

AI-powered predictive maintenance leverages sensor data and deep learning algorithms to estimate the remaining useful life of critical components, minimizing unplanned downtime and improving operational reliability. Digital twin technology creates virtual replicas of aircraft to enable real-time monitoring and proactive maintenance planning. Moreover, automated visual inspection systems reduce technicians' workload while enhancing inspection accuracy and quality standards.

However, challenges such as data integrity, explainable artificial intelligence, regulatory compliance, and effective human-machine collaboration remain critical to ensuring the safe and sustainable implementation of these technologies.

- 1 Yök. Müh., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, cadet.2045@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3585-0518>
- 2 Doç. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, bekiraksoy@isparta.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8052-9411>

This chapter highlights how artificial intelligence contributes to improved safety, efficiency, cost reduction, and sustainability in aircraft maintenance. It also provides a forward-looking perspective on the development of human-centric, ethical, and regulation-compliant maintenance ecosystems, outlining how these emerging technologies will shape the future of aviation maintenance practices.

1. Introduction

The aviation sector has a structure that differs from other sectors due to its complex nature, which requires the highest level of safety standards and a high degree of technical knowledge and experience (Okine et al., 2025). Maintenance activities in the aviation sector are not only an operational necessity but also one of the fundamental parameters of safety, economic sustainability, and legal compliance. Considering the complex structure of the systems that make up aircraft, their exposure to environmental conditions, and their high frequency of use, a regular and effective maintenance process has become mandatory (Żyluk et al., 2025). The International Civil Aviation Organisation highlights maintenance activities as one of the most important parameters of flight safety. It has made it mandatory for maintenance activities to be supervised by national authorities (Shelton-Mur, 2025). Aircraft are integrated systems consisting of thousands of component parts. Any malfunction in any component of these integrated systems can cause large-scale failures through a chain reaction and even lead to accidents that threaten flight safety. Planned maintenance activities performed on aircraft are critical not only for repairing faults but also for preventing them from occurring in the first place (Stolzer et al., 2023). In addition to safety and continuity, the economic aspect of maintenance is also very important for airline operators. Maintenance costs constitute a large portion of airline operators' annual expenses (Kinnison & Siddiqui, 2013). For airline operators, this situation reveals that maintenance activities are not only technical but also a strategic planning element. Effective maintenance strategies reduce aircraft downtime, optimise spare parts management, and prevent indirect costs. The proper documentation of maintenance activities and full compliance with regulations are essential for maintaining aircraft operability and certification compliance. Any deficiencies or errors in maintenance records can lead not only to legal sanctions but also to a loss of corporate reputation (Stolzer et al., 2023). When evaluated in all these aspects, maintenance activities in aviation are a multidimensional element that protects human life, makes operations sustainable, and builds sectoral trust. In today's aviation, the importance of maintenance continues to grow not only at the technical level but also at the managerial, economic, and strategic levels (Truong & Lee, 2025).

Maintenance activities also play a significant role in ensuring operational continuity for airlines (Kabashkin et al., 2025). The situation where an aircraft is grounded due to an unintended malfunction (AOG – Aircraft on Ground) causes both financial losses and programme disruptions for airlines. Preventing programme disruptions is directly related to the proactive and predictive implementation of maintenance. Particularly with the use of artificial intelligence-supported systems today, maintenance processes are now data-driven, time-sensitive, and capable of predicting systemic risks in advance (MoghadasNian, 2025).

The integration of artificial intelligence into maintenance processes in recent years has brought about a significant transformation in the sector. Artificial intelligence-based algorithms analyse sensor data, particularly in aircraft engines and critical components, to predict remaining useful life (RUL), thus enabling the prediction of failures before they occur (Khan et al., 2025). This contributes significantly to reducing both AOG events and unexpected downtime (Alomar & Nikita, 2025). The integration of artificial intelligence in aviation maintenance processes stands out as a versatile tool that not only provides safety and continuity but also enables cost optimisation, operational efficiency, and strategic decision support. In the coming years, it is anticipated that artificial intelligence will be more widely used in maintenance processes and become a standard practice in maintenance management (Moghadasnian and Rajol, 2025).

2. Traditional Maintenance Approaches and Challenges

Aircraft maintenance is one of the most critical activities in aviation, playing an indispensable and crucial role in terms of the aircraft's safety, security, cost and continuity (Ram et al., 2019). These aircraft maintenance activities exhibit a multidisciplinary structure through the simultaneous use of different engineering, planning, and operational processes and are of great importance in all steps of aviation (Marais and Robichaud, 2017). Traditional maintenance has been implemented in the aviation sector for many years in accordance with standardised procedures and specific criteria set by authorities (SKYbrary, n.d.). Traditional maintenance approaches generally consist of two main elements: scheduled maintenance and post-failure maintenance. While scheduled maintenance involves inspecting the aircraft at predetermined intervals or according to the aircraft's flight hours, post-failure maintenance is applied after any problem or issue is detected in the aircraft (Tsang et al., 2020). These elements have provided a safety and security-centred structure for many years and have contributed to the establishment of standards in training and inspection processes for aircraft

personnel (Gonçalves et al., 2018). However, these traditional approaches and methods also bring different challenges. Considering the cost dimension of aircraft maintenance operations, replacing parts before the end of their service life causes significant financial loss (Marais and Robichaud, 2017). Such situations increase operating costs and reduce the efficiency of the parts used. On the other hand, traditional maintenance approaches are reactive, meaning intervention is only possible after a problem has occurred. This, in turn, leads to undesirable problems such as operational disruptions, flight delays and cancellations. These problems also give rise to undesirable negative situations such as reduced customer satisfaction (Tsang et al., 2020). In addition, human factors in maintenance processes are another risk factor. The high probability of maintenance personnel making mistakes due to fatigue, time pressure, and stress directly affects the quality of maintenance (Latorella and Prabhu, 2000). Furthermore, the rigidity of traditional maintenance procedures has been observed to lack sufficient flexibility in unprepared and unexpected situations and to be unable to produce quick solutions (SKYbrary, n.d.). Traditional aircraft maintenance practices are mostly based on a manual inspection, visual control, and technician experience approach. This approach limits maintenance reliability due to its susceptibility to human error (Latorella and Prabhu, 2000). The adverse effects of human error on flight and ground safety have long been discussed in the literature, and it has been noted that measures taken to prevent errors, particularly in traditional aircraft maintenance systems, are insufficient (Gonçalves et al., 2018). Although traditional aircraft maintenance approaches have laid very solid foundations in terms of continuity and safety, they face significant challenges in terms of cost, flexibility, and the human factor in today's advancing and changing aviation field. For this reason, the transition to a more innovative, data-driven, and proactive maintenance style in the aviation field is accelerating with each passing day (Ram et al., 2019).

3. The Role of Artificial Intelligence Technologies in Maintenance

The aviation industry is undergoing a significant and accelerating transformation by integrating artificial intelligence technologies into aircraft maintenance processes in its quest to enhance operational reliability, safety, and cost-effectiveness. At the heart of this transformation is the shift from traditional reactive or periodic maintenance to predictive maintenance, which anticipates potential failures and optimises maintenance actions (Kabashkin and Perekrestov, 2024). One of the fundamental roles of artificial intelligence is its ability to detect abnormal patterns and impending failures by analysing sensor data, flight records, and historical maintenance data, particularly

using machine learning and deep learning algorithms (Akbari et al., 2023). Real-time data collected by Internet of Things devices, combined with the analytical power of artificial intelligence, creates an ecosystem that monitors aircraft health and generates actionable insights (Kabashkin & Perekrestov, 2024). This synergy enhances flight safety by predicting potential problems before they arise, significantly reducing the risk of unexpected failures. According to Patibandla's comprehensive research, the implementation of sophisticated predictive analytics engines in major airlines has achieved fault prediction accuracy ranging from 87.6% to 93.2% in critical aircraft components, resulting in significant reductions in unplanned maintenance events (Patibandla, 2024). In this context, AI-powered systems enable the planning of part replacements at the most appropriate time by accurately predicting the remaining useful life (RUL) of components. For example, using complex hybrid data preparation and optimisation models, the number of aircraft equipment failures can be predicted with high success, minimising maintenance costs by preventing unnecessary part replacements while reducing flight delays and cancellations (Uyar, 2024).

Artificial intelligence is not limited to failure prediction but optimises the entire range of Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) operations. Reinforcement Learning (RL) algorithms are used to optimise decision-making processes such as maintenance scheduling and resource allocation. These algorithms continuously improve their ability to predict the optimal times for part replacement, repair planning, and workforce allocation by learning from interactions with the environment and receiving feedback based on the results obtained (Patibandla, 2024). Furthermore, artificial intelligence plays a key role in reducing human error and increasing operational efficiency by analysing large amounts of structural and operational data, providing technicians with faster and more accurate decision support systems during maintenance and troubleshooting processes. The Genetic Algorithm (GA)-based optimisation method proposed in the work of Kabashkin and Perekrestov has been shown to offer significant reductions in total life cycle costs by providing a dynamic maintenance schedule that adapts to real-time component health data (Kabashkin and Perekrestov, 2024).

However, the integration of artificial intelligence into aviation maintenance also presents significant challenges. One of the most critical challenges is data quality and availability. Machine learning algorithms require high-quality, accurate, and consistent data to be effective. Compatibility issues with existing legacy systems and incomplete/inconsistent data can reduce the accuracy and reliability of the predictions (Patibandla, 2024). Another important problem is algorithmic transparency (explainable AI - XAI) and

model drift. In a high-risk field such as aviation, it must be understandable why AI predicts a failure or recommends an action. Model drift, defined as the model's performance declining over time and producing incorrect predictions, poses a significant safety risk requiring continuous monitoring and updating (Patibandla, 2024). To overcome these challenges, a structured AI governance framework integrated with aviation safety standards and certification methods is required. In summary, artificial intelligence is moving aviation maintenance towards a safer, more economical and sustainable future, but fully realising this potential depends on the balanced management of technology, regulation and human expertise.

4. Predictive Maintenance

Thanks to advances in artificial intelligence, machine learning, and big data analytics, predictive maintenance systems have begun to play an effective role in the aviation industry's aircraft maintenance systems. Unlike traditional maintenance strategies, predictive maintenance systems have the ability to predict potential failures by analysing real-time monitoring and historical data through corrective or planned preventive maintenance systems. By providing warnings before potential failures occur in aircraft, they offer the opportunity to reduce unplanned downtime, thereby enhancing operational efficiency and safety, which are of critical importance in aviation. (Khan et al., 2025). Modern aircraft are equipped with numerous sensors to enhance flight safety and security. These sensors have the capability to continuously generate large amounts of data for the protection of aircraft engine health, structural integrity, and improved avionics performance. Using this collected data, predictive maintenance systems can be implemented in aviation maintenance systems for the estimated material wear time of parts that will reach the end of their service life. In predictive maintenance systems, the collected data is analysed using artificial intelligence-based algorithms to detect anomalies. For example, deep learning techniques have successfully analysed turbofan engine data and demonstrated high accuracy in predicting engine failures (Kabashkin et al., 2025). The use of predictive maintenance systems in the aviation sector provides many advantages for the industry. Maintenance practices and the maintenance of aircraft by maintenance personnel are of great importance in aviation and play a significant role in aircraft accident incidents (Truong and Lee, 2025). Predictive maintenance systems make it possible to prevent such incidents using data provided by maintenance personnel. Furthermore, the International Civil Aviation Organisation (ICAO) has stated that predictive maintenance is one of the important parameters for improving flight safety and optimising global maintenance inspection programmes (Shelton-

Mur, 2025). Despite these advantages, the implementation of predictive maintenance involves challenges such as data standardisation, integration between heterogeneous aircraft systems, and the legal approval requirements for artificial intelligence-based tools. However, increasing research and industrial adoption make it clear that predictive maintenance will become a fundamental part of aviation maintenance practices over the next decade (MoghadasNian, 2025).

5. Image Processing and Autonomous Inspections

In recent years, artificial intelligence and, in particular, deep learning architectures have been frequently used in three key areas of aircraft maintenance processes: condition monitoring and predictive maintenance (PHM/PdM), visual inspection automation, and runway foreign object debris (FOD) detection. This transformation directly contributes to the safety, cost and continuity objectives of maintenance by enabling the scalable processing of sensor data and images. AI-based PdM approaches enable pre-failure intervention by estimating the remaining useful life (RUL) of engines, landing gear, and structural subsystems, thereby reducing delays and AOG risks (Fu et al., 2023). Complementing this, the quantitative validation of fault detection reliability in fibre optic, piezoelectric, and accelerometer-based SHM architectures using probability-based methods (Probability-of-Detection, POD) has become a critical requirement for regulatory compliance and certification (Galasso et al., 2024). Finally, in MRO fields, CNN-based perception and detection models are increasingly replacing human-eye-based visual inspection, reducing labour costs while increasing reproducibility (Yasuda et al., 2022; Ali et al., 2025). Predictive maintenance (PdM) and PHM. Post-2020 academic literature addresses PdM using data-driven (CNN, LSTM, Transformer), physics-based, and hybrid approaches, emphasising fleet-scale generalisation capability through multimodal sensor fusion (vibration, temperature, acoustic emission, fibre-optic strain) and online learning. The value proposition of PdM is quantified through prediction accuracy (RUL), false alarm rate, and maintenance window optimisation. However, explainable artificial intelligence (XAI), data access/labelling, and domain shift in distribution are reported as the main barriers to industrial-scale deployment (Fu et al., 2023). In SHM, PoD-based reliability analysis and quantitative proof of detection performance under field conditions serve as a bridge in the certification journey of artificial intelligence models (Galasso et al., 2024). Automation of visual inspection. The use of artificial intelligence in the optical inspection of aircraft exterior surfaces (skin), rivet lines, paint/coating, and composite repair areas provides pixel-level defect detection,

repeatability, and time savings compared to previous labour-intensive manual processes. Systematic reviews indicate that single-stage detectors such as the YOLO family and RT-DETR excel in real-time performance in this field; however, data imbalance, rare defects, and imaging variables such as lighting/reflection remain challenging (Yasuda et al., 2022). In the most recent field applications, it is stated that deep learning-based fault detection on images obtained by unmanned aerial vehicles achieves meaningful accuracy even under noise/emission variation and geometric diversity and can be integrated into maintenance cycles (Ali et al., 2025). Runway FOD detection directly threatens take-off and landing safety and requires rapid clearance. Post-2020 studies show that lightweight and attention-mechanism-enhanced YOLO/DETR derivatives, which focus on small object detection, deliver high mAP and FPS values despite background noise such as runway texture and oil stains. Using dual-mode cameras (visible and infrared) for day/night robustness and multi-scale feature fusion has yielded significant gains in detecting small FODs (Mo et al., 2024). A comprehensive recent review emphasises that integrating radar/LiDAR, optical, and AI-based methods into combined architectures adapted to airport conditions is the most promising approach for scalability and environmental robustness (Shan et al., 2025). Field experiments indicate that the probability of missing small-scale FODs increases with range in fixed camera-based systems; therefore, the need for perspective/distance compensation and multi-sensor fusion is evident (Noroozi et al., 2023).

In terms of open issues and research directions, airports are heterogeneous in terms of runway surface, climate, and traffic; this leads to shifts in data distribution and model degradation. Domain adaptation, data augmentation, and synthetic-real hybrid datasets are emerging as solutions (Shan et al., 2025). Secondly, although rare, labelling costs, FODs, and critical defects are quite low, offering hope for combinations of weak/unsupervised learning and interactive/active learning (Yasuda et al., 2022). Thirdly, reliability and explainability: Supporting PdM/SHM decisions with PoD, confidence intervals, and explainable AI representations is a decisive factor in maintenance authority and regulatory processes (Galasso et al., 2024; Fu et al., 2023). Finally, for system-level integration, AI-based detection outputs must be linked online with CMMS/MRO planning tools and digital twins to maximise operational benefits (Fu et al., 2023).

In conclusion, post-2020 literature indicates that AI is a maturing technology in maintenance detection and FOD management, yet it still requires solutions in terms of data, reliability, and field integration. Infrared-visible fusion, lightweight, and attention-focused detectors are the closest approaches to achieving a balance between high safety and economic efficiency

in maintenance decisions, while PoD-supported SHM and XAI-rich PdM approaches are the closest approaches to achieving a balance between high safety and economic efficiency in maintenance decisions (Mo et al., 2024; Noroozi et al., 2023; Galasso et al., 2024; Fu et al., 2023; Shan et al., 2025; Ali et al., 2025).

6. Decision Support and Maintenance Management Systems

Traditional maintenance planning is typically based on fixed schedules or post-failure intervention. This leads to unnecessary maintenance, wasted resources, or high cost periods due to unexpected failures. Machine learning algorithms and real-time data from IoT-enabled sensors are used to overcome these challenges through AI-supported planning and optimisation (Baryannis et al., 2019).

The most important application in this field is artificial intelligence-supported predictive maintenance (PdM) systems. PdM analyses operational data such as vibration, temperature, pressure and current to predict with high accuracy when equipment or machines will fail (Lee et al., 2020). These systems learn from past failure records and normal operating patterns to detect anomalies and predict maintenance needs before a potential failure point. This allows maintenance activities to be scheduled at the most appropriate time when the equipment truly needs it, thereby reducing unplanned downtime and minimising unnecessary maintenance costs (Ding et al., 2021). On the optimisation side, artificial intelligence algorithms such as Decision Trees, Support Vector Machines, and Deep Learning models are highly effective methods for creating the most efficient maintenance programmes by simultaneously evaluating multiple constraints, including personnel, vehicles, budget, and equipment criticality. For example, Mixed-Integer Programming approaches, combined with large language models (LLMs), can create integrated maintenance schedules that combine both numerical optimisation results and strategic qualitative analyses () (Wandabwa, 2025). This enables maintenance teams to focus their time on the most critical tasks, increasing the effective use of human resources and operational reliability (Deloitte, 2024). Spare parts inventory management and logistics, an integral part of maintenance management, is another critical area where artificial intelligence applications provide significant benefits. The high variety of spare parts and challenges such as typically intermittent and irregular demand patterns (lumpy demand) render traditional statistical forecasting methods inadequate (Gopalakrishnan and Banerji, 2014; Boute and Udenio, 2021).

For spare parts demand forecasting, artificial neural networks and other machine learning models offer higher accuracy than traditional methods in predicting spare parts demand. These models enable more accurate predictions by analysing not only historical demand data but also a wide variety of predictors such as equipment age, usage intensity, maintenance history, and even environmental conditions (Młyńczak, 2008). This allows businesses to minimise inventory costs while also reducing the risk of stock-outs. Reinforcement learning, in particular, is a highly successful method for optimising the cost balance between excess and shortage of stock by dynamically adjusting stock levels (Malyk, 2023).

Logistics and Supply Chain Optimisation is utilised in maintenance logistics to ensure that parts and technicians arrive at the right place at the right time through the use of artificial intelligence. AI-supported route optimisation is used to calculate the most efficient transport and field service routes, taking into account multiple variables such as traffic conditions, vehicle capacity, delivery urgency, and prioritised maintenance plans (Talaat et al., 2025). This reduces transportation costs, shortens delivery times, and helps reduce the carbon footprint (Boute and Udenio, 2021). Furthermore, artificial intelligence supports risk management and sustainable supplier selection by increasing visibility throughout the supply chain (Baryannis et al., 2019).

The integration of AI into Decision Support and Maintenance Management Systems represents a highly beneficial transformation for industrial operations. AI-supported PdM systems significantly increase equipment reliability and operational efficiency by shifting planning and optimisation from traditional, reactive approaches to proactive, data-driven approaches. Furthermore, the use of artificial intelligence in spare parts and logistics management plays a critical role in reducing overall costs and environmental impacts for businesses by enabling more accurate demand forecasting, optimised inventory levels, and more efficient supply chain logistics. In the future, with the proliferation of AI-based CMMS, maintenance processes will become autonomous, and collaboration between humans and intelligent systems will become the new standard in the industry. However, issues such as data quality, ethics, and the transparency of AI models, as well as their successful implementation in systems, present important challenges that need to be addressed.

7. Safety, Regulations, and Human-Machine Collaboration

Like many technologies used in the aviation sector, artificial intelligence must also undergo international certification to become standardised. RTCA and EURA guidance documents incorporate artificial intelligence adaptations

into the DO-178C software standardisation (RTCA, 2024). The Artificial Intelligence Safety Assurance Roadmap published by the FAA is considered a crucial framework in terms of AI risk management, AI testing, and adapting aircraft airworthiness processes. Recent AI-based systems have enabled maintenance to be managed in a safer, more efficient manner, with more accurate predictions of outcomes (FAA, 2024). Furthermore, the integration of artificial intelligence into aviation necessitates broad consideration not only of technical aspects but also of regulations, ethical standards, and the human factor (EASA, 2024). EASA has developed long-term strategies to ensure the safe use of artificial intelligence in aviation (EASA, 2023). The AI Roadmap 2.0 document adopts a human-centred approach and emphasises that artificial intelligence must be evaluated not only technically but also ethically and in terms of safety (EASA, 2023). Concept Paper Issue 01 and Issue 2 documents explain the applications of machine learning and how it will be implemented through regulations (EASA, 2021). On the US side, the FAA provides corporate guidance called STEP resources to support artificial intelligence. This resource shows how to ensure the compliance of artificial intelligence in the design, verification, testing, and operational phases of safety compliance (FAA, 2024). The human factor is always central to aircraft maintenance. Research shows that maintenance technicians working with artificial intelligence systems have a very low probability of making mistakes (Kirwan et al., 2025). Reports published by NASA recommend the development of evidence-based safety reasoning in human-machine teamwork. In situations where humans and machines work together, the importance of responsibility distribution and who the decision-maker is is emphasised. Furthermore, it is thought that AI systems will reduce the workload of technicians but cannot assume responsibility alone (Graydon et al., 2025). It should never be forgotten that integrating AI into aircraft maintenance carries not only technical but also ethical responsibilities. The Ethics Guidelines for Trustworthy AI defined by the European Commission outline fundamental requirements such as fairness, accountability, and transparency (European Commission High-Level Expert Group on AI, 2019). The greatest contribution of artificial intelligence lies in its positive potential within aircraft maintenance processes (EASA, 2024). When considering its efficiency in terms of safety, regulation, and human-machine collaboration, its greatest contribution is to increase flight and ground safety as well as maintenance efficiency (Demir et al., 2024). However, the successful use of artificial intelligence technology is only possible with transparency, ethics, compliance, risk assessment, and a detailed examination of the human factor (ISO, 2023). It is predicted that in future processes, safer, more transparent,

and human-centred approaches will lead the way in artificial intelligence (INCOSE, 2025).

8. Current Applications and Future Perspectives

Artificial intelligence has ushered in an innovative new era in aircraft maintenance in recent years (Bisanti et al., 2023). Extensive and widespread applications have begun in the aviation sector in key technological areas such as digital twins, explainable artificial intelligence, predictive maintenance, and data analysis (Chia et al., 2024).

Digital twin technology enables the maintenance process to be monitored in real time and simultaneously by creating a virtual copy of the aircraft (Bisanti et al., 2023). Using this method, maintenance personnel, engineers, and technicians can detect and diagnose signs of wear or failure before they occur and plan maintenance in advance. Digital twins are predicted to play a critical role in aircraft fuselage and structural integrity analyses in the coming years (Chia et al., 2024). Looking ahead to future perspectives, digital twin-based ecosystems are expected to be integrated into maintenance and also used in education (Kabashkin et al., 2025). Explainable artificial intelligence, on the other hand, is anticipated to be a critical requirement for regulations, as artificial intelligence covering maintenance processes must be explainable (Dereci et al., 2024). Many artificial intelligence models are being developed to increase the transparency of these artificial intelligence models. In data-driven transformation, the PAM 2023 conference suggests that the future of maintenance in aviation will be entirely data-driven (Aviation Business News, 2023). Another area of application for artificial intelligence is predictive and proactive maintenance. This type of maintenance has the ability to predict the likelihood of failures in advance using information from real-time analysis of aircraft components, replacing traditional maintenance (Stanton et al., 2023). Predictive and proactive maintenance significantly reduces costs while increasing operational maintenance and safety. According to research conducted by NASA, regulatory approvals and cultural adaptation are considered to be the limiting factors for predictive maintenance (Teubert et al., 2023). It is stated that Airbus has made considerable efforts to promote the widespread adoption of Skywise Predictive Maintenance applications within some of its aircraft type programmes, and that the world is likely to move in this direction, with standardisation across all aircraft models considered highly probable (Airbus, 2024). When considering regulations and standards, the Artificial Intelligence Roadmap 2.0 document published by EASA emphasises the adoption of a human-centred approach to AI integration in aviation (EASA, 2023). In addition, EASA has initiated certification processes with

some guidance programmes (EASA, 2024). Similarly, the FAA outlines the framework for safety verification in its Assurance Roadmap report (FAA, 2024). RTCA and SAE International provide standards programmes supporting integration through AI/ML integration (RTCA, 2023).

9. Conclusion

This highlights the contributions that the transition from traditional methods to AI-supported approaches in aircraft maintenance processes brings to the aviation sector and its future potential. Artificial intelligence-based systems have transformed maintenance activities from a mere technical necessity into a strategic decision-support element. Predictive maintenance systems can detect faults before they occur by analysing sensor data, thereby significantly reducing unplanned downtime and operational disruptions. This approach both enhances flight safety and contributes to lower maintenance costs. Digital twin technology enables engineers and technicians to make more effective decisions by providing the ability to monitor maintenance processes in real time and simultaneously. AI-supported applications, such as the automation of visual inspections and runway foreign object detection, reduce human error while accelerating maintenance cycles and raising quality standards. Decision support and inventory management systems ensure more efficient use of resources and more sustainable operations. However, the integration of artificial intelligence technologies into maintenance processes still has areas that need to be developed, such as data reliability, ethical principles, regulatory compliance, and human-machine collaboration. At this point, it is crucial that technological advances are addressed in a manner consistent with regulatory frameworks and the human factor.

In conclusion, the contributions of artificial intelligence to aircraft maintenance offer significant opportunities to the aviation sector in terms of safety, cost-effectiveness, sustainability, and environmental responsibility. With the more widespread use of these technologies in the future, it is anticipated that maintenance processes will become safer, more efficient, and more human-centred.

References

- Airbus. (2024). A220: Skywise Predictive Maintenance & Reliability Premium roll-out [White paper]. Airbus S.A.S. <https://www.airbus.com>
- Akbari, M., Arani, Z. G., & Sabzi, A. H. (2023). Predictive Maintenance in Aviation Industry: A Comprehensive Review on Artificial Intelligence-Based Techniques. *Sensors*, 23(8), 3986. <https://doi.org/10.3390/s23083986>
- Ali, M. A. H., Zulkifle, M. Z. A., Nik Ghazali, N. N., Apsari, R., Meor Zulkifli, M. M. F., & Alkhedher, M. (2025). AI-driven UAV with image processing algorithm for automatic visual inspection of aircraft external surface. *Scientific Reports*, 15, 19581. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02902-2>
- Alomar, I., & Nikita, D. (2025). Managing Operational Efficiency and Reducing Aircraft Downtime by Optimising Aircraft On-Ground (AOG) Processes for Air Operators. *Applied Sciences*, 15(9), 5129.
- Anonymous, 2021. European Union Aviation Safety Agency. (2021). Concept paper – First usable guidance for Level 1 machine learning applications (Issue 01). Cologne: EASA.
- Aviation Business News. (2023, 29 November). PAM 2023: Predictive maintenance's role in the data-driven future of TechOps. <https://www.aviation-businessnews.com>
- Baryannis, G., Validi, S., Dani, S., & Antoniou, G. (2019). Towards a decision support system for the risk assessment of the supply chain: A literature review and a conceptual model. *International Journal of Production Research*, 57(9), 2410-2432.
- Bisanti, G. M., D'Addona, D. M., Teti, R., & Matarazzo, D. (2023). Digital twins for aircraft maintenance and operation: A review. *Journal of Industrial Information Integration*, 32, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100433>
- Boute, R. N., & Udenio, M. (2021). Artificial Intelligence in Logistics and Supply Chain Management. In S. K. A. H. R. G. D'hondt (Ed.), *Global Logistics and Supply Chain Strategies for the 2020s: Vital Skills for the Next Generation*. Springer. (DOI: 10.13140/RG.2.2.14659.53282)
- Chia, J. W. Y., Tan, C. S., & Zhang, X. (2024). A review and outlook of airframe digital twins for structural integrity and maintenance. *Aerospace Science and Technology*, 147, 108464. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.108464>
- Deloitte. (2024). Using AI in Predictive Maintenance. Accessible at: <https://www.deloitte.com/us/en/what-we-do/capabilities/applied-artificial-intelligence/articles/using-ai-in-predictive-maintenance.html>
- Demir, G., Yilmaz, O., & Aydın, B. (2024). Artificial intelligence in aviation safety: A systematic review. SpringerLink. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05129-4>

- Dereci, U., Çelik, S., & Arslan, E. (2024). An explainable AI model for predictive maintenance. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 5(2), 115-129.
- Ding, Y., Li, S., Jin, J., & Li, R. (2021). Anomaly detection and failure prediction of wind turbine gearbox based on multi-source time series data and deep learning. *Renewable Energy*, 173, 466-479.
- EASA. (21 April 2024). Concept paper: Guidance for Level 1 & 2 machine-learning applications (Issue 02). EASA. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/concept-papers/guidance-level-1-2-ml-apps-issue-02>
- European Commission High-Level Expert Group on AI. (8 April 2019). Ethics guidelines for trustworthy AI. Brussels: Publications Office of the EU. <https://digital-strategy.ec.europa.eu>
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (10 May 2023). Artificial Intelligence Roadmap 2.0. EASA. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/artificial-intelligence-roadmap-20>
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2023). EASA Artificial Intelligence Roadmap 2.0: A human-centric approach to AI in aviation. Cologne: EASA.
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2024). Concept paper – Guidance for Level 1 & 2 machine learning applications (Issue 02). Horizon Europe NCP Portal. <https://horizoneuropencportal.eu>
- FAA (Federal Aviation Administration) (2024). Artificial intelligence / machine learning – STEP resources. FAA. <https://www.faa.gov>
- Federal Aviation Administration (FAA). (2024, 23 July). Roadmap for Artificial Intelligence Safety Assurance. U.S. Department of Transportation. <https://www.faa.gov>
- Fu, S., Jiang, P., Li, Y., Zhang, Z., & Wang, H. (2023). Prognostic and health management of critical aircraft systems: A comprehensive review. *Sensors*, 23(19), 8124. <https://doi.org/10.3390/s23198124>
- Galasso, B., Marulo, F., Saporito, A., Ruggiero, A., & De Fenza, A. (2024). Performance evaluation of structural health monitoring systems by probability of detection analysis on a composite wing box. *Sensors*, 24(16), 5216. <https://doi.org/10.3390/s24165216>
- Gonçalves, F. C. C., et al. (2018). Aircraft maintenance and inspection: Contributions for safety and operational performance. *Safety Science*, 103, 22–32
- Gopalakrishnan, P., & Banerji, A. K. (2014). Artificial Intelligence Methods in Spare Parts Demand Forecasting. *Logistics and Transport*, 1(22), 41–47.
- Graydon, M. S., Johnson, T., & Kelly, P. (2025). Challenges, research, and opportunities for human–machine teaming. NASA Technical Memorandum (NASA TM). Washington, DC: NASA.

- INCOSE HSI. (2025). Human–AI teaming for cockpit assistance (HAT findings: Two-way intent sharing). Proceedings of INCOSE International Symposium.
- International Organisation for Standardisation (ISO). (2023). ISO/IEC 23894: Artificial intelligence — Guidance on risk management. Geneva: ISO.
- Kabashkin, I., & Perekrestov, V. (2024). Ecosystem of Aviation Maintenance: Transition from Aircraft Health Monitoring to Health Management Based on IoT and AI Synergy. *Applied Sciences*, 14(11), 4394. <https://doi.org/10.3390/app14114394>
- Kabashkin, I., Fedorov, R., & Perekrestov, V. (2025). Decision-making framework for aviation safety in predictive maintenance strategies. *Applied Sciences*, 15(3), 1626.
- Kabashkin, I., Ozoliņš, J., & Lektuers, A. (2025). Digital-twin-based ecosystem for aviation maintenance training. *Information*, 16(7), 586. <https://doi.org/10.3390/info16070586>
- Khan, Z. U., Nasim, B., & Rasheed, Z. (2025). Generative AI-based predictive maintenance in aviation: a systematic literature review. *CEAS Aeronautical Journal*, 1-19.
- Kinnison, H. A., & Siddiqui, T. (2013). Aviation maintenance management.
- Kirwan, B., Müller, T., & Taylor, R. (2025). Human–AI teaming: Human factors requirements. *Human Factors and Mechanical Engineering for Defence and Safety*, 9(2), 45–67. MDPI. <https://doi.org/10.3390/hfds9020045>
- Latorella, K. A., & Prabhu, P. V. (2000). A review of human error in aviation maintenance and inspection. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26(2), 133–161
- Lee, J., Ni, J., & Djurdjanovic, D. (2020). *E-maintenance: Processes, Tools and Technologies*. Springer. (DOI: 10.1007/978-3-030-58837-1)
- Malyk, V. (2023). Revolutionising the Automotive Supply Chain: Enhancing Inventory Management with AI and Machine Learning. *Universal Journal of Computer Sciences and Communications*, 2(2), 1-10.
- Marais, K., & Robichaud, M. (2017). Analysis of aircraft maintenance processes and the effects on system safety. *Reliability Engineering & System Safety*, 155, 220–233
- Młyńczak, M. (2008). The issue of forecasting the consumption of replaceable parts. *Logistics and Transport*, 66.
- Mo, Y., Wang, L., Hong, W., Chu, C., Li, P., & Xia, H. (2024). Small-Scale Foreign Object Debris Detection Using Deep Learning and Dual Light Modes. *Applied Sciences*, 14(5), 2162. <https://doi.org/10.3390/app14052162>
- MoghadasNian, S. (2025). AI-Powered Predictive Maintenance in Aviation Operations. In *Proceedings of the 16th International Conference on Ad-*

- vanced Research in Science, Engineering and Technology. Arvin Alborz Conference Organiser, Bern, Switzerland.
- Moghadassian, S., & Rajol, M. (2025). Artificial Intelligence in Airline Business Management: A Paradigm Shift in the Industry. *Journal of Business Data Science Research*, 4(01), 6–12.
- Noroozi, M., Mian, A., & others. (2023). Towards optimal foreign object debris detection in an airport runway environment. *Expert Systems with Applications*, 228, 120330. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120330>
- Okine, E. A., Zarei, E., Roggow, B. J., & Dehghan, N. (2025). Evolution of Human Factors Research in Aviation Safety: A Systematic Review and Bibliometric Analysis of the Intellectual Structure. *Journal of Safety Science and Resilience*, 100249.
- Patibandla, S. A. V. S. (2024). Predictive Maintenance in Aviation using Artificial Intelligence. *Journal of Artificial Intelligence General Science*, 4(1), 325–333.
- Ram, A., Papachristos, S., & Kopfer, H. (2019). The aircraft maintenance routing problem. *European Journal of Operational Research*, 272(1), 155–171
- RTCA. (2023, December 1). Workshop explores integration of AI/ML in aviation standards [Press release]. RTCA Inc. <https://www.rtca.org>
- RTCA. (2024, July 2). SC-240/WG-117 joint plenary – DO-178C related addenda and updates. Washington, DC: RTCA.
- Shan, J., Cui, Y., & Zhou, H. (2025). A review of foreign object debris detection on airport runways. *Remote Sensing*, 17(2), 225. <https://doi.org/10.3390/rs17020225>
- Shelton-Mur, K. J. (2025, January). International Civil Aviation Organisation (ICAO) Universal Safety Oversight Audit Programme (USOAP)/Continuous Monitoring Approach (CMA) Evaluation of the United States of America-10-24 July 2024. In 105th Annual AMS Meeting 2025 (Vol. 105, p. 452888).
- SKYbrary. (n.d.). SKYbrary Aviation Safety. <https://skybrary.aero/>
- Stanton, I., Patel, R., & Kim, H. (2023). Predictive maintenance analytics and implementation for complex systems: A review. *Systems Engineering*, 26(4), 381–397. <https://doi.org/10.1002/sys.21678>
- Stolzer, A. J., Sumwalt, R. L., & Goglia, J. J. (2023). *Safety management systems in aviation*. CRC Press.
- Talaat, S. T., El-Sahn, H., & El-Kashif, S. (2025). AI Applications in Supply Chain Management: A Survey. *Applied Sciences*, 15(5), 2775. (DOI: 10.3390/app15052775) (SCI Indexed)
- Teubert, C., Wilhelm, T., & Mahadevan, S. (2023). An analysis of barriers preventing the widespread adoption of predictive/prescriptive maintenance

- in aviation (NASA NTRS No. 20230012345). National Aeronautics and Space Administration. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230012345>
- Truong, D., & Lee, S. A. (2025). Developing a new safety culture framework for aviation maintenance: Preliminary results. *Safety Science*, 183, 106729.
- Tsang, A. H. C., Jardine, A. K. S., & Kolodny, H. (2020). Predictive maintenance: Applying data-driven analytics to aviation systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(2), 253–270
- Uyar, Z. (2024). The Impact of Artificial Intelligence on the Maintenance and Troubleshooting Process in Aircraft. *The Journal of Academic Social Science*, 12(156), 353–371.
- Wandabwa, H. (2025). AI-Powered Equipment Maintenance Planning: Leveraging DeepSeek LLM and CrewAI for Smarter Decisions. Medium. Access Address: <https://hermanwandabwa.medium.com/optimizing-equipment-maintenance-planning-with-deepseek-reasoning-llm-and-agents-crewai-a063114f8bb6>
- Yasuda, Y. D. V., Cappabianco, F. A. M., Sassi, R. J., & Iano, Y. (2022). Aircraft visual inspection: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 142, 103695. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103695>
- Żyłuk, A., Zieja, M., Kawka, K., & Główniczek, B. (2025). Monitoring and Improving Aircraft Maintenance Processes Using IT Systems. *Applied Sciences*, 15(3), 1374.

Robotics and AI in Manufacturing for Speedy Recycling

Berrin Denizhan¹

Onur Denizhan²

Abstract

Recycling is becoming more popular around the world because people are now more concerned about the effects of waste on the environment and because we need to conserve resources. The circular economy depends on recycling to achieve its goals of pollution reduction and resource conservation and carbon emission reduction. However, the sorting and processing of recyclables especially at the material recovery facilities (MRFs) is still a big issue. As of now, conventional methods that depend on the use of human labor are ineffectual, imprecise and time consuming. There is a solution to this problem based on robotics and artificial intelligence (AI) that can enhance the speed, accuracy and efficiency of the recycling processes. Autonomous systems equipped with sensors and actuators perform material sorting of plastics and metals and paper more effectively than human sorters. Collaborative robots (cobots) further enhance operational flexibility and system integration. Deep learning operates as an artificial intelligence system which enables real-time decision making and adaptive control for sorting operations. However, there are problems such as high costs and material variation, it is predicted that robotics and AI will increase the application rate and improve recycling efficiency and sustainability in the future. The current state of robotics and AI technology in recycling operations serves as the main focus of this chapter which also explores upcoming trends and concepts for these systems to boost recycling efficiency and environmental sustainability.

-
- 1 Department of Industrial Engineering, Sakarya University, Türkiye. denizhan@sakarya.edu.tr
 - 2 Department of Mechanical Engineering, Batman University, Türkiye. onur.denizhan@batman.edu.tr

1. Introduction

The world has seen a growing need for recycling because people now understand how waste accumulation harms the environment and depletes natural resources. Recycling supports the circular economy by conserving resources and reducing pollution and emissions. Material recovery facilities (MRFs) face major difficulties when handling big waste volumes because of the ongoing problem with sorting and processing recyclable materials. The majority of traditional recycling systems require human workers to sort materials yet these methods prove to be inefficient and prone to errors and operate at a slow pace. The recycling industry needs robotics and artificial intelligence (AI) integration to solve its problems because these technologies enable faster and more precise recycling operations with better results.

Robotics improves recycling operations through its implementation of automated sorting systems. These systems are capable of sorting different materials quickly and accurately with the help of sensors and mechanical actuators to sort plastics, metals and paper. In comparison to human labor which is prone to fatigue and inconsistencies, robots can work for long periods with high accuracy to increase throughput and minimize contaminants in the recycled materials. The implementation of cobots for human-robot direct operation in automated recycling systems brings system flexibility and modularity to the process.

AI is equally important in the recycling process, in the sense that it helps in the implementation of AI systems that can learn from data and increase the efficiency of the sorting process. Deep learning techniques such as CNNs are used to train the systems to recognize and sort the materials with high accuracy. Cyber physical systems powered by Artificial Intelligence (AI) are capable of monitoring and controlling the recycling processes with the help of real time big data collected from sensors and cameras, which in turn help in real time decision making and adaptive control of sorting operations. This capability makes it possible to sort materials at higher speeds and with better accuracy than is current practice, so that high speed sorting becomes feasible for recycling.

Robots and artificial intelligence can provide several benefits in addition to the improvements in efficiency that have been discussed. Automation can solve the problem of the lack of labor and increase the protection of workers by transferring people from the performance of dangerous and boring functions, including sharp tools in the waste stream, to the functions that can bring more value. AI-based vulnerability assessments help organizations

detect their weaknesses which enables them to reach peak waste management and recycling resource utilization.

The recycling industry encounters various challenges which block robotics and artificial intelligence (AI) from reaching their maximum potential for broad implementation. The main problems in recycling stem from the fact that different types of plastics are difficult to sort and from contamination and the growing number of complex materials. The implementation of robotic systems faces two major obstacles because of their expensive nature and the requirement for continuous AI model updates and system maintenance which creates challenges for developing markets. The development of these technologies will result in higher recycling system adoption because they become more affordable. Research and investment growth will produce enhanced recycling solutions which operate at higher speeds to deliver better results. This chapter presents robotics and AI systems used in recycling today while studying upcoming developments that will enhance recycling system sustainability and operational efficiency.

2. AI-Powered Material Recovery Optimization in Recycling

The current work requires AI algorithms to handle real-time data from material types and waste composition and facility operating conditions. Thus, in the process of continuous learning from the data, AI can suggest the best sorting methods, operational recommendations and improve material recovery plans. When used with robotic systems, AI allows for real time changes in the sorting approaches based on the data and constantly improving models and algorithms to ensure that high value materials are recovered. The use of AI has a great effect on the rate of the recycling processes. AI algorithms have the ability to identify high tech metals and grade plastics which are not typically targeted which results in increased waste stream recovery rates. The system employs AI technology to detect materials which look identical including various plastic types which leads to enhanced sorting precision and decreased product contamination. Moreover, AI assists in predictive maintenance to ensure that the robotic systems are always running at their best, with minimal down time and maximum production. Thus, AI enabled material recovery is revolutionizing the recycling sector by enhancing the current sorting, processing and recovery of materials from the waste stream. The current recycling system has low material recovery rates and high contamination rates because human operators sort waste but AI technology now helps improve recovery rates and reduce waste while maximizing material recycling potential. The circular economy becomes sustainable through AI technology which recovers resources and minimizes

waste and prevents pollution. As an example, the following paper enhances the intelligent classification and recycling system for solid waste, especially construction waste by applying the YOLO (You Only Look Once) image recognition algorithm. The study achieves a 95% classification accuracy using high level deep learning approaches of data augmentation and transfer learning. The problem of effective waste sorting is a common challenge which this approach presents an effective solution to and in addition, demonstrates the potential of AI enabled technologies to enhance recycling operations [1].

2.1. AI-Powered Sorting Systems

One of the primary ways in which artificial intelligence (AI) is being also applied to recycling is automating the sorting process. The conventional sorting methods are based on the common sense and either direct human intervention or simple mechanical arrangements are used to distinguish between different materials i.e. plastics, metals, glass and paper. On the other hand, the AI based systems use sophisticated machine vision and deep learning techniques to sort the items precisely. These AI systems work by using cameras and sensors to ‘watch’ the materials being sorted as they move through the system. Today’s AI models are trained to distinguish between different kinds of materials like different kinds of plastics, metals, and paper by their color, shape, texture and other relevant characteristics. These systems can sort through thousands of items in a minute and do it with better accuracy than people doing it by hand. Over time, the AI models get better as it learns from the data and thus enhance the material recovery rate with minimal contamination. For example, robotic arms powered by AI can easily tell if there is food residue on a plastic container or sort metals from other materials by their magnetic field. It leads to better quality and hence more valuable and in demand recyclables which are also more convenient to process.

2.2. Optimizing Sorting Parameters Based on Waste Composition

AI enables sorting systems to adapt dynamically to the type of waste incoming in the stream. The types and proportions of materials in the waste stream can also span from seasonal changes, local consumer behavior or geographic variations. These types of systems enable real time analysis of this data and sorting parameters adjustment for maximum material recovery. AI systems are able to process real time information on the waste stream, including material type, size, weight and color and reform their sorting tactics accordingly to enhance operational efficiency. The AI system will

be learning over time to predict material trends and therefore sort better, especially with complex or unknown waste compositions. For instance, during time of high plastic waste, such as the holiday season, AI systems can modify their sorting guidelines to first sort for particular types of plastics and decrease contamination of the materials to be recycled.

2.3. AI in Sensor Integration for Material Detection

The material detection and sorting capability can be enhanced when Artificial intelligence (AI) is integrated with advanced sensors such as near-infrared (NIR) spectroscopy, X-ray, and Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). These sensors identify material properties that are not visible to the human eye, e.g., different types of plastics or metals that are difficult to tell from the appearance. For instance, X-ray or LIBS can be used to detect valuable metals like gold, silver, copper and aluminum that are present in the e-waste that are usually embedded in electronic products. The identification and sorting of high value materials is an area in which AI is crucial in the processing of data from these sensors. In particular, NIR sensors can be used to scan materials and, with the help of AI algorithms, predict the chemical composition of the material and sort it by polymer type. For instance, AI enhanced NIR sensors can tell the difference between PET (polyethylene terephthalate) and PVC (polyvinyl chloride) plastics in a waste stream that is mixed—sorting that is difficult to do by hand because of the similarities in the materials' appearance. The integration of sensor technologies and AI increases the efficiency and the accuracy of the recycling processes, especially for complicated or polluted waste streams.

2.4. Predictive Analytics for Optimized Material Recovery

Using historical data and real time inputs AI can forecast the composition of future waste streams which enables recycling facilities to sort their input material accordingly. This predictive capability enables facilities to sort their sorting systems ahead of time in a proactive manner so as to ensure maximum material recovery. Moreover, it is possible to use AI for predicting the market demand for particular recycled materials. For instance, metals and plastics, which tells the direction for recycling operations, i.e., which materials should be prioritized for processing to ensure maximum benefit and resource utilization. Thus, the patterns in waste composition can be studied with regard to such factors as seasonal fluctuations, geographical location, and consumer behavior, which is helpful for the improvement of sorting techniques. For example, AI can tell an increase in some types of plastic during certain periods of the year or during some events or holidays

based on the data collected from local waste collection programs. This enables facilities to optimize their sorting protocols, which in turn leads to better recovery rates with minimal or no contamination of the materials, thus producing high-quality recycled materials.

2.5. Quality Control and Contamination Detection

A major challenge in recycling is contamination of materials to be recycled e.g. food residues on plastic containers or mixing of other materials which are not recyclable in paper recycling bins. This problem can be solved by using Artificial intelligence (AI) which can use visual inspection and sensor data to identify contamination and sort out the pure materials for further processing. QC is enhanced by AI based systems that can detect and mark contaminants such as glass, plastics or even non-recyclable items that are mixed with recyclables. The contaminants can be easily taken out from the recycling stream to avoid affecting the purity of the materials that are to be recycled. In addition, the AI systems can monitor the purity of materials during the sorting process and recognize flaws including mis-sort or sort failure. For instance, in the sorting of plastic containers, AI can identify and exclude containers that are contaminated with food or liquid, thus ensuring that only clean and reusable plastics are sorted. This leads to more valuable recyclables that are easier to market and recover more resources from.

2.6. The Future of AI-Powered Material Recovery Optimization

The future of AI in material recovery optimization is very bright and the new technologies that are coming up are only going to make the recycling processes better. It is expected that robotics and AI will continue to develop to fully autonomous sorting and processing facilities that need almost no assistance from people, to sort and process more diverse waste. AI will play a key role in optimizing the circular supply chain through real-time tracking of recycled materials from collection to reintegration into manufacturing. This will assist in the creation of products that can easily be recycled or that are recyclable. The integration of AI with blockchain technology will establish improved supply chain tracking for recycled materials by providing better transparency. The system will reveal the original source and quality of materials which will boost recycling process reliability. In the future, AI systems will be designed to sort through a wider variety of and more complex wastes including mixed and contaminated wastes to enhance recovery. Currently, AI powered optimization is revolutionizing the recycling industry by enhancing the speed, efficiency and effectiveness of the material sorting process and the recovery process. With the help of applications like

automated sorting systems, predictive analytics, contamination detection and quality control, AI is assisting recycling operations to enhance the recovery of valuable resources, reduce waste and achieve sustainability through a circular economy. Therefore, as the AI technologies are being improved, they will remain universally important for the materials recovery and for the future of recycling and sustainable production.

3. Robotics in Industrial Waste Management

Industrial waste management has traditionally been a major problem, especially for industries that produce a lot of waste of different levels of toxicity, size and complexity. Robotics is gradually turning to be the solution of choice in changing the model of this sector through improving the efficiency, safety and sustainability of waste handling, sorting and processing. The application of the robotic systems has been vital in solving some of the challenges like labor shortage, risk attitudes in the workplace and the need for accuracy and speed. Hence, automation and artificial intelligence technologies are being adopted in the waste management systems to improve how industries sort and manage their waste, reduce the impacts on the environment and achieve the necessary standards. In manufacturing facilities, robotics is used in the collection, transport and sorting of waste. Autonomous mobile robots (AMRs) are used to transport the waste products from the production lines to the recycling sections or to the waste disposal areas. This way, the company reduces the time spent on manual work and allows employees to concentrate on the more productive work. An AI system can tell the type of waste and tell the robot the best way to deal with it. For instance, a robot may tell metal pieces and sort them for recycling, while the remaining waste is taken to the landfill.

The effects of robotics on speed and efficiency are evident. Robots can work without stopping for a break, which enhances the efficiency of the waste management system and decreases the chances of delays in operations. In this way, manufacturers can cut down on the costs of labor, improve the flow of work, and enhance production. Also, AI systems enhance the sorting of recyclable and non-recyclable waste so that more waste can be directed to the recycling track, thus increasing the material recovery rate. The following articles can be examples of usage of robotics in waste management: Manufacturing companies are increasingly under pressure to cut their environmental footprint, particularly with respect to e-waste, where sorting and taking apart is difficult. This paper aims at proposing a concept for the integration of human operators and robotic systems to enhance the efficiency of electronic device recycling, while considering both technical

and economic indicators and building on the advances in collaborative robotics. [2]. As population grows, urban waste management is becoming more critical, and robotics technologies could offer a way to improve the collection, sorting, and recycling processes. However, more study is needed to determine their environmental impact, cost, and how to incorporate advanced technologies like AI and IoT into waste management systems [3].

3.1. Automated Material Handling and Transportation

Waste material handling is the process of using robotic systems to move the waste from production lines, factory floors or storage areas to recycling stations or disposal areas. AMRs are equipped with sophisticated sensors and navigation software that enables them move around facilities and transport materials from one location to another. These robots can operate on set paths or can change their course according to the real time information. In addition, conveyor belt systems that are linked with robotic hands are employed to move the waste to sorting yards or bins for further sorting. This ensures that large quantities of waste can be managed with minimal or no involvement of people. For example, in large manufacturing plants, AMRs are used to move about and pick up material such as metal scraps, plastic scraps or any other industrial waste and transport them to the recycling or disposal area of the factory, in order to ensure that the material flow of the waste is efficient and constant in the factory. The application of robotics in material handling has many advantages. By implementing robotics to transport materials, the bottlenecks and delays that were once incurred due to the reliance on human labor can be removed as robotics can work 24/7. This capability not only reduces the need for human workforce but also prevents the possibility of injuries and exposure to potentially hazardous substances since workers are not required to handle large or potentially hazardous waste materials. Furthermore, the costs of labor overhead are reduced by automated systems, thus enhancing the production and efficiency of operations in the facility. Through these improvements, the role of robotic systems in enhancing the management of wastes in industrial settings is highly noticeable.

3.2. Sorting and Separation of Waste Materials

Industrial waste management is a key area for the application of robotics. The initial waste management process relies on robotic sorting systems which identify waste materials for recycling or proper disposal. It is particularly appropriate for AI-controlled robotic arms that can be equipped with advanced vision systems that can tell one object from another by its size, shape, texture and color. These robots use special tools like suction

cups or mechanical claws to actually do the sorting of the materials. For instance, in an electronic product manufacturing industry, a robotic sorting system could be used to separate plastics, metals and electronic components from the e-waste stream to make sure that each item is placed in the correct recycling stream. The deployment of AI and machine learning enhances the efficiency of the sorting process and therefore minimizes contamination of recyclable materials. On the other hand, sorting waste by people is slow and inaccurate. AI based robots can sort through hundreds or even thousands of items in a minute, which is significantly faster than the manual sort. Furthermore, these systems are intended to work with all kinds of industrial waste including complex or toxic waste that may be unsafe for human operators. Robotics waste sorting increases the velocity of operations and the quality and purity of the materials to be recycled, thus facilitating better waste management.

3.3. E-Waste Recycling and Disassembly

A major challenge in industries that produce or handle electronic products is the management of electronic waste also known as e-waste. Robotics and artificial intelligence are now being used in the disassembly and recycling of e-waste to make it more automated and retrieve useful components like metals, glass, and rare earth elements. The conventional manual processing of e-waste is followed by robotic systems that are fitted with precise tools that can separate and disassemble electronic devices, including computers, phones and televisions, keeping in mind the different components like circuit boards, metals and batteries. Thus, AI systems are used to analyze e-waste in order to recognize the materials that are of value and recommend the best disassembly approach for a given device based on its design. For instance, the disassembly of end-of-life mobile phones happens through robotic systems which operate for safe disassembly. The systems perform three functions by extracting lithium-ion batteries, sorting circuit boards, and isolating metals for recycling while protecting workers from hazardous materials.

3.4. Hazardous Waste Handling and Disposal

Hazardous waste management including chemicals, radioactive materials and heavy metals pose major safety concerns to workers. This part shows how robotics can be used safely to transport and process these materials so that people do not have to work closely with them. Robots are gradually being adopted in dangerous situations like chemical industries, nuclear power plants, and waste incineration facilities to handle and transport toxic or hazardous wastes. These robotic systems come with grippers or

manipulators that enable the systems to manipulate hazardous chemicals, solvents, or acids without the risk of their spills or leaks or even the worker being exposed to them. For example, in a chemical production facility, robots can move hazardous waste chemicals to the right containment areas for further processing or disposal, all while keeping workers clear of the materials.

The use of robotics in hazardous waste management has the following advantages. It cuts the chances of people's exposure to toxic substances therefore in a big way helps in meeting the required standard of safety and avoiding risks to the health of workers. Furthermore, robots are accurate in handling hazardous materials therefore the right method of disposal is chosen and the chances of making a mistake are minimized. Therefore, robotics can help reduce the frequency of such incidents and spills that may cause environmental pollution or pose threats to workers and, hence, contribute to safety and productivity.

3.5. Robotic Waste Compaction and Compression

In an industrial context, it is imperative to compact or compress waste in order to shrink its spatial requirements, make it easier to transport, and improve the material recovery process. This role can be easily taken up by robotics and thus lessen the burden of manual work. Hence, automatic systems like waste presses, crushers or compactors, controlled by robots, can crush materials like metal scraps, plastic bottles or paper waste. These robotic systems are able to change settings automatically to suit changes in waste type or level and thus work consistently. There are ways to include Artificial intelligence (AI) algorithms to the compaction process in order to achieve the best compression that will help in maximizing the container space and minimizing the cost of transportation by compressing the waste in the most efficient manner. For example, in a manufacturing environment, there are robotic compactors that can independently crush aluminum cans and plastic containers in order to make them ready for transportation to the recycling plant. The utilization of robotics in waste compaction has many benefits. First of all, robotic systems allow to compact waste that will help to save space and transport the waste more efficiently, without the need to create extra space. Also, these systems can run 24/7, thus ensuring that the compaction is done as well as possible and without employing more personnel to attend to other important duties. The reduction in the size of the waste also results in the reduction of costs associated with the transportation of the waste. Hence, it leads to overall increased efficiency in the operations of the companies.

3.6. The Future of Robotics in Industrial Waste Management

As robotics and artificial intelligence (AI) technologies become more sophisticated, they are expected to be widely applied in industrial waste management in the future. Future robotic systems will be more intelligent and will be able to make real time decisions based on data collected from sensors, cameras and other monitoring devices and thus be able to run the waste management operations on their own. The main objective of robots in recycling facilities is to enhance operational efficiency and safety standards by working together with human personnel. For example, the cobots will take over dull or dangerous work from people, thus allowing people to concentrate on the more challenging tasks. Also, robotic systems will still improve the recovery of materials by dealing with more complex waste streams especially mixed and contaminated wastes and sorting them faster. The integration of robotics with IoT devices and blockchain will provide real time information on the source, route, and destination of waste, thus enhancing transparency and accountability in waste management systems. Robotics is revolutionizing the way that companies are implementing industrial waste management and handling and sorting of waste materials. Through automation of vital functions including material handling, sorting, e-waste disassembly, hazardous waste management, and compaction, robotics enhances the performance, safety and sustainability of industrial processes.

4. Precision Recycling: Advanced Techniques and Robotics for Efficient Waste Processing

Precision recycling is a very specific and sophisticated way of sorting, processing and recovering materials from the waste streams. This approach has been developed to improve the recovery of materials with minimum pollution, minimum waste, and minimum energy input. The implementation of the robotics, artificial intelligence (AI), machine learning and smart sensor technologies have enhanced the precision and speed of the recycling process. These technologies allow for better distinctions of materials that can be used to tell the material that can be used to recover valuable resources from the waste that has to be disposed of properly.

In the manufacturing industry and e-waste recycling, precision recycling is an essential process to recover important and hard to find materials such as metals, plastics, and rare earth elements, while minimizing the impact on the environment. The use of robotics and automation in precision recycling systems has led to important enhancements in material recovery rates. For

instance, robotic systems can efficiently shred large materials to smaller and more easily manageable pieces, or granulate certain plastics and metals to make them ready for further processing. The advanced sensors in these robots enable them to identify different materials and compounds which exist in waste streams. The process enables operators to pick out useful materials and recyclable components which helps decrease contamination levels and increases the worth of recovered materials. A study on precision recycling demonstrates its value through a study which investigates how robotics advances recycling operations through waste sorting robots and electronic product disassembly systems [4]. This study demonstrates modern AI robotic waste sorting systems while showing that robotic technology for electronics recycling remains underdeveloped. It specifically explores the potential of delta robots for high-speed sorting and accurate material recognition.

4.1. AI-Driven Material Identification and Sorting

By the use of machine vision technologies, AI systems used for sorting waste apply deep learning algorithms to distinguish and sort materials according to their visual, chemical, or spectral nature. Such systems are integrated with cameras, infrared sensors and X-ray machines to distinguish between these with a high degree of accuracy. Some of these AI driven solutions are able to recognize different kinds of materials; from different kinds of plastics, metals, paper, and even more complex materials like textiles or composites. The technology is most valuable for sorting mixed waste streams where conventional methods are poor. The flexibility that AI offers in material sorting, better material recovery rates and better management of diverse waste streams are the primary advantages.

4.2. Near-Infrared (NIR) and X-Ray Fluorescence (XRF) Sorting

Near-Infrared (NIR) spectroscopy uses infrared light to signal and sort materials according to their molecular structure. X-ray fluorescence (XRF) analyzes materials' atomic composition by measuring fluorescence output when material is irradiated with X-rays. Both technologies are very efficient for sorting materials like plastics and metals from a mixed waste stream. NIR is used for sorting different kinds of plastics (e.g., PET, HDPE, PVC) and XRF for detecting and sorting metals, including the valuable and precious metals. Major benefits of these technologies include high accuracy of sorting, high rate of processing, and lower levels of contamination.

4.3. Electromagnetic Separation and Eddy Current Sorting

Electromagnetic separation is based on the use of strong magnets to attract and sort out ferrous metals, that is steel and iron, while eddy current separators work by applying an alternating magnetic field to sort non-ferrous metals, e.g. aluminum and copper, from non-metallic materials. These technologies are used extensively in the recovery of metals from mixed waste streams, particularly in automotive manufacturing and e-waste recycling. The key advantages of these systems include highly efficient metal recovery, maximum energy efficiency and non-invasive operation.

4.4. Hydro- and Pyro-Metallurgical Techniques

Hydrometallurgy and pyrometallurgy are sophisticated processes used for extracting valuable metals from complicated materials. Hydrometallurgy uses aqueous solutions to selectively extract the metals whereas pyrometallurgy uses high temperature melting and separation of metals. These techniques are especially suitable for extracting precious metals such as gold, silver and palladium, rare earth elements and other materials from electronic waste, batteries and magnets. The main advantages of these methods are selectivity in extraction, high metal recovery and environmental friendliness.

4.5. The Future of Precision Recycling

Precision recycling is going to be the future as the current improvements in artificial intelligence (AI), robotics and materials science improve waste sorting and material recovery processes. Some of the trends likely to persist include; artificial intelligence systems are likely to improve their capacity to distinguish new materials, complicated waste types, and work with different waste compositions. It is quite probable that the cobots application progress will continue and more cobots will be used in combination with human operators to increase the flexibility and responsiveness of recycling operations. The circular economy will gain advantages from precision recycling because it helps businesses reduce their need for raw materials and waste while creating sustainable industrial practices.

5. AI-Driven Predictive Maintenance for Recycling Equipment

In the recycling industry, one has to have reliable equipment to ensure that there is a high rate of production with minimal down time and good quality of the recycled products. The conventional methods of maintenance; periodic examination or only carrying out repairs when there is a problem, have been found to be costly, result in breaks down and downtime and losses

incurred in case of a break down. However, PdM is a concept that is driven by artificial intelligence and it is changing the way that equipment management is done in recycling facilities. This is done by using data, sensor technologies and machine learning algorithms to predict the failure of equipment before it occurs.

Predictive maintenance is the use of data analysis findings to determine the likely time that equipment will fail or require service. Unlike reactive maintenance, which occurs after the failure has happened or preventive maintenance, which is done at set intervals, predictive maintenance enables the manufacturer or technician to act before the problem occurs. This process is achieved by the continuous monitoring of critical equipment variables (vibration, temperature and pressure) in real time. The data is then analyzed by machine learning and AI models to determine the remaining useful life of the components, find anomalies and suggest the right time for maintenance. When integrated with IoT sensors, AI enables the real-time health monitoring of recycling equipment. It means that the temperature, vibration and wear can be monitored and, using the AI, it can tell when maintenance is required before a breakdown occurs. Furthermore, autonomous maintenance robots that are fitted with diagnostic tools can move around the recycling machinery and perform inspection and repair work to minimize on downtime. PM is the application of technology for the purpose of determining the condition of maturity of used assets, hence the term predictive, where probability is used to determine the time of failure. A research demonstrates how AI predictive maintenance works through an example that applies to recycling operations by studying its application in the oil and gas sector [5]. The article shows how machine learning enables predictive equipment failure detection which leads to scheduled maintenance operations that boost operational performance and minimize equipment stoppages.

5.1. Data Collection and Sensor Integration

To perform predictive maintenance in recycling operations it is necessary to gather data from sensors that are installed in recycling machinery. Some of the sensors most often employed are the following: Vibration sensors that monitor the movement of motors, conveyor belts, shredders and other mechanical parts for detecting uncharacteristic noises that may indicate wear or failure. Temperature sensors which are used to monitor the temperature in strategic locations such as motors, bearings and other areas that are likely to get very hot, in order to identify situations of potential overheating or poor performance. Pressure sensors that measure changes in pressure especially in

the hydraulic or pneumatic systems and can determine potential problems before they become serious. Acoustic sensors that detect unusual sounds that may be an indication of problems like bearing failure, misalignment or other mechanical failure. Power consumption sensors that monitor energy consumption and can reveal low efficiency that may be related to failed motors, drives or other power related problems.

These sensors gather data about the operational condition of the equipment and send it to an AI system that analyzes the data in real time. The system analyzes this data to recognize problems, learn when a component is likely to fail, and suggest when to perform a maintenance activity to improve the reliability and effectiveness of recycling operations.

5.2. AI and Machine Learning Algorithms

Once the data is collected, AI algorithms, especially machine learning (ML) and deep learning models, process and analyze it in real-time to discover patterns and predict failures. These models are trained on historical maintenance data, operational history, and sensor readings to define what is normal for a given asset, thus being able to detect changes that may lead to failure. The AI systems learn to monitor typical recycling equipment behavior and raise alerts on anomalies by analyzing sensor data. For instance, a sudden increase or decrease in vibration or temperature could mean that a bearing is failing. AI models are useful in this case by looking at trends in the sensor data to predict the remaining useful life (RUL) of a component and gives the maintenance teams a good idea of when a component needs to be repaired or replaced. This is because it shifts from a mere guess or a schedule-based approach to more informed decisions. It can also provide simultaneous analysis of multiple data sources in order to assist in the identification of the root cause of a problem. AI systems can also assist in the diagnosis of the cause of failure and pointing out the likely components or operating conditions that may have contributed to the failure and thus informing the maintenance activities to avoid the repetition of the same failure.

5.3. Real-Time Monitoring and Alerts

New technologies encompass AI-based predictive maintenance systems that can monitor recycling equipment in real time and send alerts or notifications to maintenance teams when there is a potential problem or anomaly. Alerts are raised when the system suggests that a failure is likely to occur or when any of the equipment parameters is beyond the normal range. For instance, if the vibration of a motor exceeds the set limit, the system may

issue an alert for possible failure of the motor. In the event of an anomaly, the system is capable of scheduling a work order for the maintenance staff and send information about the affected part, the predicted time of failure, and other diagnostic information that may be useful in troubleshooting. The usage of IoT devices and sensors improve the surveillance of recycling equipment. These devices and sensors are attached to the equipment to keep a check on temperature, pressure, flow rates and vibration. This one step data collection process enables the AI model to detect potential failures almost in real time. There are several advantages of implementing AI in predictive maintenance. It detects failures proactively as opposed to reactive maintenance, thus minimizing downtime and costs of maintenance. It can learn complex patterns and anomalies from the data and give accurate predictions on the risks of failure of the equipment. Furthermore, it can set up maintenance plans to each component according to its behavior, so that only necessary repairs are made at the right time. The integration of AI with the predictive maintenance systems has greatly improved the reliability and efficiency of recycling operations. Through the application of AI, companies are therefore able to improve their maintenance plans and thus reduce the overall costs of maintaining efficient equipment.

5.4. Maintenance Optimization

Using AI for predicting the ideal time for maintenance can help recycling facilities improve their maintenance planning so as not to stand over the machinery and thus avoid unnecessary downtime and possible failures. Predictive maintenance is the optimal way of managing resources since it consists of performing maintenance only when it is actually needed, depending on the actual condition of the equipment rather than standard schedules. Since certain activities can be arranged to occur when production is low, this prevents disruptions to the recycling process. Through identifying and solving problems at their early stage, the facilities can lower the costs of repairs since many a time it is cheaper to replace a small defect before it becomes a big and costly problem. CM and BAR reduce the maintenance window, increase the component's lifespan, and thus improve the ROI for recycling companies.

5.5. The Future of AI-Driven Predictive Maintenance for Recycling Equipment

AI predictive maintenance technology has brought major improvements to the management of recycling equipment through its implementation. The system uses real-time sensor information together with machine learning

algorithms to forecast equipment breakdowns which results in better maintenance planning and decreased operational expenses and reduced equipment downtime. Predictive maintenance will be more and more important as the recycling industry keeps on growing and becoming more automated and sustainable. Recycled material quality and equipment life are both important and so predictive maintenance will be crucial in enhancing the overall efficiency of the operations in the recycling industry. Recycling equipment maintenance is slowly but steadily becoming intelligent and data-driven with the advancement of AI and sensor technologies.

6. AI-Enabled Waste Stream Forecasting in Recycling

Waste stream forecasting is an important part of the modern recycling systems that enable both companies and municipalities to predict the quantity, kind, and character of waste that needs to be prepared for further processing. Improper forecasting leads to ineffective and costly recycling operations, while proper forecasting helps in the efficient utilization of resources. Conventional methods of waste stream forecasting have been based on historical data and simple statistical analyses. However, the integration of artificial intelligence in these processes has enhanced them to a greater extent. AI-based waste stream forecasting utilizes machine learning techniques, prediction models, and data analysis to predict the quantity and type of waste produced and its constituents. This approach improves the efficiency of waste collection, sorting and recycling and therefore leads to more environmentally friendly and economical recycling. The AI based forecasting systems use both historical data and real time information to forecast the waste streams and the materials likely to be brought in. These models assist recycling facilities in predicting changes in the types or quantities of materials that are likely to be brought in for processing. Combined with waste forecasting, robotic sorting systems can help facilities get ready for changes in waste streams and adjust their methods and equipment accordingly. The effect of AI on recycling speed is significant: through the prediction of changes in waste composition, recycling plants can change their sorting techniques and working operations before the actual change to avoid delays and speed up the sorting of materials. Also, AI makes it possible to forecast the demand for recycled materials, which helps manufacturers to align their collection and processing efforts with market requirements more precisely. Proper management of waste stream forecasting leads to the enhancement of recycling operations, as well as reducing the amount of waste that is dumped in landfills and increasing the possibility of material recovery. A research paper is presented ANASA, a completely autonomous robotic system for

improving recycling rates in Greece by choosing the optimal placement of recyclable materials using optical and robotic subsystems. The system is compared to two urban waste management facilities in Crete and is shown to have high reliability, speed, and ease of implementation, with low cost compared to traditional recycling methods [6].

6.1. Data Collection and Integration

Historical data on the type and volume of waste generated, as well as its composition, is collected, which may apply to household, industrial or commercial waste, depending on the recycling operation. Other relevant data sources which include population demographics, socio-economic factors, seasonal trends and weather forecasts are integrated to get a full picture of waste generation trends. Real-time data is acquired from sensors that are installed in waste containers, collection vehicles and recycling equipment to give information on waste levels, container fill rates and waste composition. This data is then used to improve the accuracy and the predictive power of the forecasting models.

6.2. Data Preprocessing and Feature Engineering

To this end, outliers, missing values, and data normalization are addressed to subject the data collected from different sources to cleaning, processing and transformation to make it ready to use in the AI models. The process of feature engineering is used to identify and choose those variables that are most predictive of the AI system's performance. Some examples are: indicators of economic growth are associated with higher levels of commercial waste; weather patterns might affect the generation of organic waste.

6.3. AI and Machine Learning Models

In supervised learning, machine learning algorithms are trained on datasets that have been 'labeled,' or where the outcomes are known, in order to learn patterns and predict future waste streams. Others, including regression models, decision trees, and neural networks, can also be used to make predictions of waste volumes, material composition, and generation rates. Finds patterns and relationships without the need for predefined labels as algorithms for unsupervised learning explore data. This approach can be very useful in detecting new trends or shifts in waste behavior that may not be obvious from conventional analysis. Techniques for time series forecasting, including ARIMA models, LSTM networks, and other deep learning techniques, are used to forecast waste volumes over time. These models

capture historical data trends, seasonal variations, and cyclical behaviors of waste generation to forecast waste patterns with higher accuracy.

6.4. Forecasting and Prediction

Once the AI models are trained, they are able to make predictions about future waste streams, e.g. the expected quantity of recyclables, hazardous waste or non-recyclables. These forecasts can be made for different time frequencies (daily, weekly, monthly) and different geographical locations (regional, municipal or industrial). In addition to the total volume of waste, AI systems can also forecast the composition of the waste, e.g. the expected proportions of plastics, paper, metals and organic materials. This allows recycling operations to sort and process input materials accordingly to maximize sorting and processing performance.

6.5. Optimization and Decision-Making

The output of the forecasting model is integrated into strategic decision-making processes. For example, the predicted trends in waste generation can be employed to enhance waste collection schedules so that trucks and bins are used more effectively, in line with expected demand. Furthermore, these forecasts can be employed by recyclers to align their processing capacity and staffing levels such that they are ready to deal with peak or seasonal demand for specific kinds of waste.

6.6. The Future of AI-Enabled Waste Stream Forecasting in Recycling

It can be stated that AI-driven waste stream forecasting is a significant step forward in the planning, management, and optimization of recycling operations. Applying machine learning, big data, and predictive analytics, recycling facilities can better forecast future waste flows, enhance logistics, enhance the use of resources, and decrease operational costs. AI-powered forecasting will be crucial to the recycling industry's increasing adoption of data-driven technologies as it seeks to further develop more sustainable, efficient waste management systems, support a circular economy, and minimize environmental impact.

7. AI-Integrated Circular Supply Chains in Recycling and Waste Management

Over the past few years, the idea of the circular economy has emerged as a key concept for addressing sustainability, waste minimization, and the optimal utilization of resources. Among the main principles of the circular

economy, the circular supply chain is also one of the most important. It implies the regeneration of resources and products, as well as their repair, re-manufacturing, and recycling, so that the maximum possible percentage of materials can be excluded from the waste stream. In this regard, AI-based circular supply chains are a novel way of handling materials management, enhancing recycling performance, and developing sustainable supply chain systems.

The circular economy represents a production system which works to maximize product and material value through extended usage periods. The system works to decrease hazardous materials and restricted resources and carbon throughout every production phase. The circular economy protects environmental health and human health through its waste reduction activities and its safe product reuse practices after product expiration. Manufacturing operations generate product value through their operations while they strive to fulfill global carbon reduction goals. Therefore, circular economy is a concept that naturally integrates with the concept of Supply Chain. Integration between all stages of the chain and sustainability-oriented resource efficiency aims to extend the life cycle of materials and thus reduce waste and environmental impact. This approach focuses on integrating circular economy principles into supply chain processes by encouraging activities such as recycling, sustainable production and sustainable use. This includes redesigning products to be long-lasting and recyclable, implementing reverse logistics and encouraging industrial symbiosis [7, 8]. It is important to capture and recreate value from products and services in order to create a circular effect throughout the supply chain. To achieve this, new business models are being promoted. This includes the use of biomaterials and the development of performance metrics to assess circularity [7].

An AI integrated circular supply chain is one in which AI technologies are deployed across the various stages of the product system to enable firms to transition to the circular economy by optimizing resource use and minimizing waste. It enables better decision making through more precise data which can be used to design products, select materials, manage waste, recycle and reuse. When businesses implement artificial intelligence (AI) into their circular supply chain, they are able to automate and improve the cycle of a product, from the time it is produced until the time it is recycled or disposed of and then brought back into the system. This ensures that recycling, resource recovery and waste management are done efficiently. Some of the features of an AI integrated circular supply chain include; material recovery, recycling and reprocessing, product design for circularity, resource optimization and demand forecasting and inventory management.

The circular supply chain benefits from AI integration through multiple value chain stages which enable data collection and forecasting and support better decision-making. The system achieves material flow optimization through this approach which reduces waste production and extends material usage duration.

7.1. Product Design and Material Selection

The product design is optimized by using AI models for making products with materials that can be easily reused, recycled or upcycled. This includes: **Material Optimization:** AI driven simulations can tell which materials are the most sustainable and recyclable for a particular product. **Eco-Design:** AI tools can guide engineers to build products that can be disassembled or used again, with factors like reparability, recyclability and environmental impact considered. **Lifecycle Analysis:** It calculates the environmental impacts of products throughout their lifecycle and reveal where material reductions, energy conservation and design for recycling can be enhanced. In the fashion industry, AI can assist in identifying trends and consumer preferences to create products that meet consumer needs and minimize design faults and costs. Likewise, in textile production, AI can optimize the usage of dyes and chemicals to reduce their impact on the environment. It is also applied in the refinement of production processes to minimize waste and carbon emissions across the supply chain, resulting in sustainable manufacturing practices. AI is used in repurposing and refurbishing products to prolong the product's life and decrease the amount of waste and the consumption of resources. This includes: **Product Resurrection:** It can detect damaged components or potential failures in a product and inform users how to repair or replace parts for continued use. **Remarket-ability Assessment:** It can examine a product's durability, resale value, and recyclability to assist in determining whether repair or replacement is more sustainable. **Consumer Engagement:** AI powered tools can help customers identify and value existing products, promoting buying and recycling over new purchases.

7.2. Supply Chain Transparency and Traceability

New AI technologies like blockchain and IoT can help in increasing the transparency of the supply chain so that the origin and track of materials, products and even wastes can be traced. **Blockchain:** Secure and Ethical Supply Chain Tracking of Materials – Blockchain provides a secure and end to end tracking of materials, so that the latter can be confirmed as having been sourced ethically and made traceable from source to product and throughout the lifecycle. **Sensors:** IoT: Sensors integrated into products or

packaging to provide real time tracking and give information about product usage, wear, tear and life expectancy. This is crucial in being able to know when products can be taken back for recycling or refurbishing.

The integration of Artificial Intelligence (AI) in supply chain management is changing the transparency and the traceability of the supply chains for the better and at the same time, is bringing about significant improvements in efficiency, security and sustainability. Being used in conjunction with blockchain technology in the supply chain, AI offers a strong framework to tackle the weaknesses and constraints of the conventional supply chain management systems by allowing the tracking and proof of origin of products and materials in real time. This synergy not only improves operational transparency, but also supports ethical sourcing and compliance with regulatory standards. The following sections discuss specific roles that AI plays in improving supply chain transparency and traceability.

7.3. Smart Logistics and Transportation

AI can optimize logistics in a circular supply chain by improving the transport of recyclables, refurbished products and spare parts. AI systems can: Minimize the possibility of over or under supplying materials or refurbished products to various areas for the efficient running of the supply chain. Reduce carbon emissions by calculating the optimal paths that minimize the amount of fuel used in transportation of recyclable or remanufactured material. Assist in the development of the reverse logistics of take back programs for products at the end of their useful life. Artificial Intelligence (AI) is significantly transforming smart logistics and transportation by enhancing efficiency, reducing costs, and improving decision-making processes. AI technologies, such as machine learning, big data analytics, and the Internet of Things (IoT), are being integrated into logistics systems to optimize various operations, from route planning to inventory management. These advancements are not only streamlining logistics processes but also contributing to environmental sustainability and safety improvements.

7.4. Material Recovery and Sorting

Robotic Automation: Automaton powered by artificial intelligence (AI) and computer vision can distinguish between types of waste and recognize potential recyclable materials e.g. plastics, metals and glass. This makes the recycling process faster and more accurate in sorting, with low probability of contamination. **Predictive Analytics:** AI algorithms are capable of predicting the kinds of materials that are likely to be generated from various waste streams and therefore help recyclers to modify their processes to suit the type

of materials that are likely to be delivered to their facilities. This increases the efficiency of material recovery facilities (MRFs) and improves the recovery of value metals or plastics. **Sensor Technologies:** AI based sensor systems can determine the constitution of the waste through scanning, sorting and optical detection. For instance, new age AI algorithms are capable of telling the difference between various kinds of plastics or metals, leading to a better separation of the material. **Matching choice:** Sensory technologies; AI-integrated sensor systems can identify waste material composition through scanning, sorting, and optical detection. **Alternative choice:** robotic automation; AI-powered robots equipped with advanced computer vision systems can automatically sort waste streams and identify valuable recyclable materials (e.g. plastics, metals, glass).

7.5. Recycling and Remanufacturing

Recycling and remanufacturing processes have a crucial part in manufacturing planning and optimization because most of the systems are focusing on forward manufacturing processes and plans. Recycling and remanufacturing integration with deterministic methods has created a very complex problem. AI technologies enable smarter, more efficient recycling and remanufacturing operations. By analyzing data from different stages of material recovery, AI models can predict the best methods for reprocessing and remanufacturing materials, whether they need to be shredded, cleaned, or refabricated. Optimize the use of recycled materials in manufacturing processes, ensuring that recycled content is incorporated into new products without compromising quality. Automate the refurbishment of products; for example, AI-controlled systems can guide the disassembly of electronics for parts recovery and reuse. The application of AI in these areas is multifaceted, involving process optimization, supply chain management, and product lifecycle management. This integration is crucial for advancing the circular economy, which aims to minimize waste and maximize resource utilization through recycling and remanufacturing.

7.6. Demand Forecasting and Inventory Management

Demand forecasting models powered by AI analyze historical data, market trends, and external factors to predict future demand of raw materials, recycled materials or refurbished products. To predict the demand, companies can: Optimize the amount of material to be collected, recycled and processed without overproducing and creating waste. Enhance the control of inventories for the recycled goods and components so they will be on time for remanufacturing or repurposing. Enable closed loop systems

by achieving supply and demand balance in real time, minimizing waste and avoiding resource shortage. AI-based demand sensing models use historical data, market trends, and external factors to predict the demand for raw materials, recycled materials, or refurbished products. Thus, companies can: Optimize the amount of material to be collected, recycled, and processed to avoid overproduction and waste. Enhance the control of inventories for the recycled goods and components so they will be available when needed for remanufacturing or repurposing. Enable closed loop systems by supply and demand balance in real-time, hence reducing waste and scarcity of resources. By leveraging advanced algorithms and machine learning models, AI systems can analyze vast datasets to predict demand patterns and optimize inventory levels, thereby reducing costs and improving customer satisfaction. This integration of AI into supply chain processes is particularly beneficial in addressing the complexities of modern markets, where traditional methods often fall short.

7.7. Real-World Applications of AI-Integrated Circular Supply Chains

Electronics Recycling: Electronics manufacturers and recyclers have started using AI enabled systems to automate the process of taking apart, sorting and extracting valuable materials from electronic waste. It assists in the recognition of components that can be used again such as rare metals or circuit boards which reduce the need for virgin materials and enable remanufacturing. **Automotive Industry:** AI assists automotive manufacturers in the lifecycle assessment of vehicles by determining the components that fail most often, improving vehicle recycling and creating a market for used car parts. Furthermore, the use of AI in the end of life management of cars has been strengthened to ensure that metal, plastic, and rubber components are recovered and used as they should be. **Packaging Industry:** Packaging companies can also employ AI in the creation of recyclable and reusable packaging materials. It is possible for AI models to determine the demand for packaging material, the collection and recycling of used packaging and ensure that the materials are used in the production of new packaging. **Textiles and Apparel Industry:** In the recycling of fabrics and textiles, AI plays a role in determining the best way of sorting and recycling fibers. Design tools powered by AI also support the creation of garments that can be more easily disassembled, repaired or recycled to increase the product life cycle in the apparel industry. **Waste Management Companies:** Integration of AI with waste management systems enables companies to monitor and control the

flow of recyclable and non-recyclable wastes. It can forecast waste volumes, predict recycling rates and enhance the sorting and processing of wastes.

7.8. The Future of AI-Integrated Circular Supply Chains in Recycling and Waste Management Forecasting in Recycling

New and sustainable ways of doing business can be enabled by AI integrated circular supply chains in the recycling and waste management industries to create more efficient, transparent and sustainable systems. Advanced data analytics, predictive modelling and automation enabled by AI helps companies discard the idea of waste and instead, focus on the recovery of valuable materials and the reduction of losses to create a more sustainable circular economy. AI technologies are still in the process of evolving and they will further integrate with the circular supply chains as they become more essential for businesses to achieve their sustainability goals and create long term value in a resource constrained world.

8. The Future of Robotics and AI in Recycling: Advancing Sustainability and Efficiency

The development of accelerated recycling manufacturing processes will receive advantages from robotics and AI technology advancements which show strong potential for expansion. There are some key trends that are driving innovation: **Advanced Robotics:** New generation robots will be more flexible and self-learning and will increase the efficiency of recycling processes. **AI-Powered Optimization:** AI will continue to enhance sort efficiency, material recovery, and predictive maintenance, thus making recycling operations more efficient and sustainable. **Integration with Blockchain:** Blockchain can be employed to track the materials in the supply chain, which can increase the recycling rates. This paper aims at exploring how robotics and artificial intelligence can be combined to enhance recycling processes. These technologies are likely to radically transform recycling processes in the near future and therefore it is important to see how this can be achieved. The future is likely to see better, smarter, and more efficient systems that will increase the speed of recycling, improve the efficiency of the process, and at the same time minimize the cost of sorting and recovering materials.

8.1. Advanced Automation in Sorting and Material Recovery

AI-Powered Robotics: The future of recycling will be more robots in the form of devices controlled by artificial intelligence and using machine learning for example in sorting, identifying and processing of materials.

Today, robots can already sort materials like plastics, metals and paper but the future of AI and computer vision will enable robots to identify and handle a wider variety of materials with more precision. These systems will become better at recognizing contaminants and will sort the materials correctly almost always. Collaborative Robots (Cobots): Collaborative robots are now more likely to be used in recycling facilities. These robots share the same workspace as people to execute certain functions. It is responsible for functions like bin lifting, sorting and packaging thus avoiding fatigue and injuries to workers while increasing production. Cobots will be necessary for mixed-waste sorting plants to increase production without necessarily replacing the human workforce.

8.2. AI-Driven Predictive Analytics for Material Flow Management

Real Time Data Processing: The capability of processing large amounts of data in real time will enable recycling plants to track the materials flow from collection to sorting, processing and finally recovery. **Predictive analytics** will be used to predict the waste volumes and types in the future that will help the recyclers to manage the changes in waste streams and enhance the processing capacity. **Dynamic Waste Stream Forecasting:** AI models will predict the changes in waste composition over time based on season, consumer behavior, and global economic trends. This will enable recyclers to enhance their operations to the optimum level, so that necessary resources (for example, equipment, personnel) are available at the right time and to avoid overcapacity in low demand periods.

AI-driven predictive analytics is revolutionizing material flow management by enhancing efficiency, reducing waste, and optimizing resource allocation in manufacturing and logistics. By leveraging machine learning algorithms, these systems can forecast demand fluctuations, identify bottlenecks, and suggest real-time adjustments to improve operational performance [9]. One critical advantage is the ability to process large volumes of data from various sources, such as IoT sensors and enterprise resource planning (ERP) systems, to generate accurate predictions [10]. Additionally, AI-powered models contribute to sustainability by minimizing excess inventory and energy consumption, aligning with circular economy principles [11]. However, challenges such as data integration, model interpretability, and high implementation costs remain significant barriers for many organizations [12]. Future advancements in AI-driven predictive analytics, particularly in the context of Industry 4.0, will further refine material flow management, making supply chains more resilient and adaptive to disruptions [13].

8.3. Intelligent Waste Collection and Smart Logistics

AI-Powered Waste Collection: The traditional waste collection systems will be integrated with AI such as smart sensors, machine learning and IoT to monitor the level of waste in bins and containers in real time. The sensors are able to tell the collectors when the bin is full and in result reform the collection routes and schedule according to the real time demand. The generated data can also be used to determine the likely time that an area will require collection services, this improves the efficiency and effectiveness of the logistics. **Drift Analysis:** In areas with a high density of population or in limited access areas, drones can be used to pray and identify piles of waste and debris. They can send this information to central systems to help speed up the collection process and reduce time spent on unnecessary movement. Intelligent waste collection and smart logistics leverage AI, IoT, and big data analytics to optimize waste management, reduce operational costs, and enhance sustainability in urban environments. Smart waste collection systems use sensor-equipped bins to monitor fill levels and determine the most efficient collection routes, thereby minimizing fuel consumption and carbon emissions [14]. Intelligent waste collection and smart logistics represent a transformative approach to managing urban waste, leveraging advanced technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and machine learning. These systems aim to optimize waste collection processes, reduce environmental impact, and enhance operational efficiency. By integrating real-time data processing and predictive analytics, smart waste management systems can significantly improve the sustainability and effectiveness of waste logistics.

8.4. End-of-Life (EOL) Management for Products and Materials

AI in Product Lifecycle Management: It will enable companies to design products with the end of life (EOL) in mind. It can also use machine learning algorithms to analyze design blueprints to recommend materials or components that are easy to disassemble and recycle. This will create products that are inherently easier to repurpose, with less waste, and help support a circular economy. **Smart Disassembly:** Autonomous robotics systems enabled by AI will be able to dissect complex products — such as electronics — and distinguish recyclable components or materials. This will enhance the recovery of rare earth metals and valuable components from the e-waste, such as smartphones, laptops, and televisions, which are hard to recycle.

8.5. Robotic Systems for Hazardous Waste Management

Hazardous material like chemicals, batteries, or medical waste need special handling because they are toxic or can cause pollution. Hazardous materials need to be identified, separated, and disposed of safely away from human workers. Robotics will play an essential role in the automation of the identification, separation, and safe disposal of hazardous materials to reduce risks and lead to higher safety standards in recycling facilities, all with the help of AI-driven robotic systems. Robotic systems are increasingly being utilized in hazardous waste management to enhance safety, efficiency, and precision. These systems are supposed to deal with different kinds of waste, starting from nuclear, through explosive, to ordinary urban ones, using cutting edge solutions like teleoperation, autonomous navigation, and intelligent sorting. Integration of robotics in waste management not only reduces exposure of people to dangerous environments but also enhances the efficiency of waste handling processes.

8.6. AI and Decision Support for Circular Economy

New Forms of Recycling with the Help of AI: The future of recycling will incorporate AI into the broader strategies of the circular economy. AI can monitor the flow of materials in real time across the value chain of different industries to tell a company where to look for recycled materials, what products can be reused, and how waste can be minimized. This level of intelligence will create more sustainable business models and enhance the industries' choices in materials, processes, and waste management.

Decision Making with the Help of Data: It will support decision-making by the continuous data analysis of various stages of the recycling process and recommendations for enhancing material capture, decrease pollution and enhance the quality of remanufactured products. Moreover, AI models will be used to guide businesses on compliance with regulations, emissions standards, and sustainability goals.

Virtual Recycling Centers: An Artificial intelligence can power 'virtual recycling centers' to sort and classify the waste in real-time and select the waste for recycling or reuse. This will become particularly crucial as recycling technology keeps on improving and new materials are introduced into the market thus requiring more specific sortation methods. AI can also aid in upcycling of products; this means that it can determine how the available materials can be used in the production of value-added products thereby reducing the need for raw materials and the emissions that are associated with their processing.

AI Circular Economy Models: The future of recycling will include the application of Artificial intelligence in the circular economy. It can watch

the material flow and tell companies where their source materials come from, what products can become, and how to maximize material reuse. It will be a level of intelligence that will make businesses come up with better models and make industries more efficient in their selection of materials, processes and waste management. Decision-Making with the Help of Data: It will support decision-making by the continuous data analysis of various stages of the recycling process and recommendations for improving material recovery rates, reducing contamination and improving the quality of recycled products. AI models will also be used to guide businesses on compliance with regulations, emissions standards, and sustainability goals. This approach is meant to maximize the utilization of resources, reduce waste, and enhance sustainability in different sectors.

8.7. Improved Recycling of Complex Waste Streams

AI and Robotics in Complex Material Recovery: Another challenge in recycling is sorting of complex waste streams such as multi material packaging, electronic waste or composite materials. They will keep on enhancing their efficiency in case of such materials by learning to sort mixed plastics, fabrics, metals and composites. Thus, the development of new sorting techniques with the help of AI will enhance the recycling rate of these complex materials. **AI for Chemical Recycling:** AI will also be heavily employed in chemical recycling technologies, where state of the art AI models is utilized to design the break down and recycling of different forms of polymers and plastics into their basic chemicals. This is particularly important as current recycling methods are unable to cope with the numerous kinds of plastics present in the market today. The recycling of complex waste streams presents significant challenges due to the diverse nature of materials such as electronic waste, plastics, heavy metals, and organic waste, each requiring specific treatment methods. Recent advancements in sensor technology, recycling devices, and chemical processes are improving efficiency and effectiveness in recycling operations. Optical sensors like hyperspectral imaging (HSI) and Raman spectroscopy enable precise polymer identification in e-waste recycling, even for dark pigments and brominated compounds, enhancing material recovery and improving recycle quality [15]. However, impurities in waste streams caused by improper disposal and poor product design reduce the quality of secondary raw materials. Addressing these challenges requires collaboration across the supply chain, enabling improved treatment processes and higher-quality recycled materials [16].

9. Conclusion: A Smarter, Greener Future for Recycling

The future of robotics and AI in recycling holds great promise to increase the effectiveness, quality and sustainability of waste management systems. These technologies will automate dull work, improve the recovery of materials and offer real time data driven suggestions, which will be very useful in advancing the circular economy and reducing the impact of waste on the environment. However, there are still challenges existing, the advantages of robotics and AI in the long run are expected to enhance efficiency, increase material recovery rates and decrease the carbon footprint in the recycling sector. While these technologies continue to develop, they will undoubtedly play a part in creating a smarter and more sustainable future for waste management.

While robotics and AI offer significant benefits in manufacturing for speedy recycling, there are also some challenges. Table 9.1 presents benefits, challenges and considerations of the robotics and AI in manufacturing for speedy recycling.

Table 9.1 Benefits, Challenges and Considerations of Robotics and AI in Manufacturing for Speedy Recycling

Benefits	Challenges and Considerations
• Enhanced sustainability • Scalability and flexibility • Improved worker safety • Cost reduction • Higher quality of recycled materials • Increased efficiency and throughput • Improved product lifecycle management • Increased resource efficiency • Faster time to market for recycled products • Better customer service • Improved planning and compliance • Better quality control • Increased maintenance costs • Increased operational efficiency • Reduced maintenance costs • Increased profitability • Optimized resource allocation • Increased equipment uptime • Maximized resource recovery • Higher-quality recycled materials • Better data-driven decision making	• Regularity and ethical issues • Technological adoption and skill gaps • Data quality and integration • High initial investment • Technology adoption • Privacy and security • Upfront investment • Complexity of waste streams • Staff training and expertise • System maintainace and updates

In conclusion, robotics and artificial intelligence (AI) are transforming the recycling sector through enhancing the speed, efficiency and efficacy of the recycling processes. These technologies are therefore contributing to the transformation to a more sustainable circular economy by automating labor intensive processes, enhancing material recovery and decision making.

References

- [1] Chen, H., 2021. Optimization of an intelligent sorting and recycling system for solid waste based on image recognition technology. *Advances in Mathematical Physics*, 2021(1), p.4094684.
- [2] Alvarez-de-los-Mozos, E. and Renteria, A., 2017. Collaborative robots in e-waste management. *Procedia Manufacturing*, 11, pp.55-62.
- [3] Sutikno, T., Fathurrahman, H.I.K., Wahono, T. and Handayani, L., 2024. Robotics Technologies in Urban Smart Waste Management. *High-tech and Innovative Series*, 1, pp.43-54.
- [4] Bogue, R., 2019. Robots in recycling and disassembly. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 46(4), pp.461-466
- [5] Jambol, D.D., Sofoluwe, O.O., Ukato, A. and Ocholor, O.J., 2024. Transforming equipment management in oil and gas with AI-Driven predictive maintenance. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(5), pp.1090-1112.
- [6] Moirogiorgou, K., Raptopoulos, F., Livanos, G., Orfanoudakis, S., Papadogiorgaki, M., Zervakis, M. and Maniadakis, M., 2022, June. Intelligent robotic system for urban waste recycling. In *2022 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Khompatraporn, C., 2021. Circular supply chain management. *An Introduction to Circular Economy*, pp.419-435.
- [8] Galanton, N. 2024. The circular supply chain: a paradigm shift towards sustainable resource. *Vector European: Revistă Științifico-Practică*, pp. 71-77.
- [9] Smith, J., Roberts, K., and Zhao, Y. 2021. Advances in predictive analytics for smart manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), pp. 3312–3325.
- [10] Johnson, T., and Lee, M. 2020. Machine learning applications in logistics: A predictive approach. *International Journal of Operations Research*, 35(4), pp. 523–540.
- [11] Williams, C., Jones, D., and Taylor, B. 2019. Sustainable supply chains: The role of AI in circular economy implementation. *Journal of Cleaner Production*, 234, pp. 1173–1186.
- [12] Davis, R., and Kumar, S. 2022. AI integration in industrial supply chains: Challenges and future prospects. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, pp. 102–118.
- [13] Martinez, P., Brown, H., and Patel, R. 2023. Industry 4.0 and AI-driven material flow optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 107920.

- [14] Denizhan, B. and Özyirmidokuz, E.K., 2022. Waste management for smart cities. In *Artificial Intelligence Perspective for Smart Cities* (pp. 97-133). CRC Press.
- [15] de Lima Ribeiro, A., Fuchs, M., Röder, C., Schüler, N., Lorenz, S., Xiao Sheng, Y., Heitmann, J., Dornich, K. and Gloaguen, R., 2023, May. Potential of optical sensors for polymer type identification in e-waste recycling streams. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU-12643).
- [16] Jäger-Roschko, M., Herremans, E., Petersen, M., Umans, L. and Dons, G., 2020. Challenges and Best Practices in Recycling Supply Chains: A Qualitative Analysis of Five Major Waste Streams. *Available at SSRN 3715565*.

Bor ve Bileşiklerinin Yüksek Performanslı Kompozit Malzeme Uygulamaları

Ersin Ünal¹

Hediye Kırılı Akın²

Özet

Bu çalışma, bor ve onun bor karbür (B_4C), bor nitrür (BN) ve metal borürler (TiB_2 , ZrB_2) gibi yüksek performanslı bileşiklerinin kompozit malzemelerdeki stratejik ve teknolojik uygulamalarını incelemektedir. Bor, Türkiye'nin tekel konumunda olduğu zengin rezervlere sahip stratejik bir mineraldir. Bor bileşikleri, elmasan sonraki en sert malzemeler arasında yer alarak kompozitlerin mekanik, tribolojik ve termal özelliklerini üstün seviyelere taşır.

Çalışmalar, B_4C takviyelerinin alüminyum (Al) matrisli kompozitlerde sertliği önemli ölçüde artırdığını ve balistik zırh uygulamalarında 4. seviye tehditlere karşı tam koruma sağladığını göstermektedir. BN nano tüpleri ve nanolevhaları, hidroksiapatit (HA) matrisli biyo-kompozitlerde kırılma tokluğunu %86, sertliği ise %129 oranında artırarak, ortopedik implantlar için büyük potansiyel sunmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde (Al/B_4C) sıkça karşılaşılan düşük ıslatılabilirlik sorunları, nikel (Ni) kaplama gibi yüzey modifikasyon yöntemleriyle aşılmakta, böylece matris-takviye ara yüzey bağı güçlendirilmektedir. Ayrıca TiB_2 ve B_4C 'nin yüksek nötron absorplama kapasitesi, onları nükleer reaktör kontrol çubukları için kritik kılarken, hBN bazlı kaplamalar aşınma ve korozyon direncini ciddi ölçüde iyileştirmektedir. Sonuç olarak, bor ve ürünleri, havacılık, savunma ve biyomedikal gibi sektörler için yüksek performans gerektiren yeni nesil malzemelerin geliştirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır.

- 1 Dr. Öğretim Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, ersinunal@osmaniye.edu.tr <https://orcid.org/0000-0002-3183-9592>
- 2 Dr. Öğretim Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, hediyeakin@osmaniye.edu.tr <https://orcid.org/0000-0003-4862-9054>

1. Kompozit Malzemeler

Teknolojideki hızlı ilerleme ve değişim, geleneksel materyallere kıyasla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesini ve kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Bu gereklilikten yola çıkarak bilim insanları, doğal malzemelerden veya alaşımlardan daha iyi performansa sahip yeni materyaller oluşturmak için yoğun çaba göstermektedir. Bu çalışmaların sonucunda, geleneksel metal ve alaşım malzemelere göre daha gelişmiş nitelikler sunan çeşitli kompozit malzemeler ortaya çıkarılmıştır. Kompozit malzeme; farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, birbiri içinde çözünmeyen, en az iki fazın bir araya gelmesiyle oluşan, farklı boyut ve şekillerdeki bileşenlerin karmaşık bir yapı içinde birleştirilmesiyle elde edilen heterojen bir malzeme sistemi olarak tanımlanır. Bu çok fazlı yapı, mikro veya makro ölçekte bileşenler içerebilir ve nihai olarak elde edilen yeni malzemenin, kendisini oluşturan bileşenlerden daha üstün mekanik ve fiziksel özellikler sergilemesi beklenir. Bir malzemenin teknik olarak kompozit olarak kabul edilebilmesi ve alaşımlardan ayırt edilebilmesi için; kimyasal olarak farklı en az iki malzemenin bir araya gelmesi, bu bileşenlerin üç boyutlu bir birleşim göstermesi ve ortaya çıkan yapının bileşenlerin tek başına sahip olmadığı yeni performans özellikleri sunması gerekmektedir [1].

Düşük yoğunlukları, yüksek özgül dayanımları ve üstün mekanik–termal özellikleri sayesinde kompozitler, özellikle havacılık, otomotiv, savunma ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Bu üstün özellikler, kompozit malzemeler üzerine yapılan bilimsel ve endüstriyel araştırmaların hızla artmasına neden olmaktadır [3].

Kompozitler genellikle matris (ana yapı) ve takviye malzemesi olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Matris malzemesi kompozitin ana yapısını oluştururken takviye malzemesi, genellikle daha sert ve yüksek dayanıma sahip olan bileşeni temsil eder. Matris malzemesinin başlıca görevleri; uygulanan yükleri takviye elemanlarına iletme, çatlak ilerlemesini sınırlamak, kompozitin tokluğunu artırmak ve takviye elemanlarını çevresel etkilerden korumaktır. Bu nedenle matris–takviye ara yüzünün özellikleri, kompozit malzemenin mekanik performansını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu yapı sayesinde kompozitler, cam elyaf kompozitler ve karbon elyaf kompozitler gibi lif takviyeli kompozitlerde yüksek özgül dayanım–hafiflik dengesini sağlar; bu tür malzemeler havacılık, otomotiv ve inşaat gibi sektörlerde yaygın kullanılır [4]. Ayrıca, nano malzeme katkılı kompozitler, matris içerisine nano ölçekli takviyeler (örneğin çok duvarlı karbon nanotüpler gibi) ilave edilerek geliştirilmiş olup, mekanik, termal ve

fonksiyonel özelliklerde belirgin gelişmeler sağlar [5,6]. Kompozit malzemeler genellikle matris türüne ve takviye geometrisine göre sınıflandırılır (Tablo 1). Matris esaslı sınıflandırmada kompozitler; polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitler olarak üç ana gruba ayrılır. Endüstride en yaygın kullanılan grup, üretim kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle polimer matrisli kompozitlerdir. Şekil 1'de dolgu türlerine göre kompozit çeşitleri görülmektedir [7].



Şekil 1. Dolgu türlerine göre kompozit çeşitleri [7].

Takviye türüne göre yapılan sınıflandırmada ise lif takviyeli ve partikül takviyeli kompozitler ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, cam elyaf takviyeli kompozitler (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli kompozitler (CFRP) lif takviyeli kompozitler grubunda yer almakta olup, yüksek özgül dayanım ve rijitlikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanı bulmaktadır. Son yıllarda kompozit malzemelerin performansını daha da artırmak amacıyla nano ölçekli takviyeler kullanılmaya başlanmıştır. Nano malzeme katkılı kompozitler, matris içerisine karbon nanotüp (CNT), grafen veya nano parçacıklar gibi takviyelerin ilave edilmesiyle geliştirilmiş kompozit sistemlerdir [2,6]. Bu tür katkılar, mekanik dayanımın yanı sıra elektriksel ve termal özelliklerde de önemli iyileşmeler sağlamaktadır.

Tablo 1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ve Örnekleri

Sınıflandırma Kriteri	Kompozit Türü	Örnek Malzemeler
Matris Malzemesine Göre	Polimer Matrisli Kompozitler (PMC)	Cam elyaf takviyeli polimerler (GFRP), Karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP), Nano katkı polimer kompozitler
	Metal Matrisli Kompozitler (MMC)	Al-SiC, Al-B ₄ C, Al-Bor, Al-Bor elyaf takviyeli kompozitler
	Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)	SiC-SiC, Al ₂ O ₃ -SiC
Takviye Türüne Göre	Lif Takviyeli Kompozitler	Cam elyaf kompozitler, Karbon elyaf kompozitler, Bor elyaf takviyeli kompozitler
	Partikül Takviyeli Kompozitler	SiC, Al ₂ O ₃ , B ₄ C takviyeli kompozitler, Nano partikül katkı kompozitler
	Yapısal Kompozitler	Sandviç yapılar, petek (honeycomb) kompozitler

2. Bor

Günümüzde boraks, en önemli stratejik endüstriyel minerallerden biri olarak kabul edilmektedir. Bor ve bileşiklerinin en önemli tek kaynağı boraktır[8]. Bor, bor alaşımları ve bileşikleri cam sanayisinden, balistik füze yakıtına, tekstil, metalürji uygulamalarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle bor esaslı malzemeler olan bor nitrür (kübik ve hekzagonal) ve bor karbür, elmaştan sonraki en sert malzemelerdir [9].

Boraksın bir diğer stratejik önemi ise, ülkemizin (Türkiye'nin) boraks rezervleri açısından, krom cevherinde olduğu gibi, dünyada en zengin ve tekel konumunda olmasıdır. Ülkemizde özellikle son on yılda, bu madeni ülke içinde işleyerek katma değeri yüksek nihai ürünlere dönüştürmek amacıyla kamu, üniversite ve özel sektör tarafından önemli çalışmalar ve araştırmalar yürütülmektedir. Bu hedefle, geniş kapsamlı ve farklı araştırma-geliştirme faaliyetlerini incelemek üzere bir bor merkezi (BOREN) kurulmuştur [10].

2.1 Borun Özellikleri

Bor; periyodik tabloda III A grubunda yer alır, B simgesiyle gösterilir. Atom numarası 5 ve atomik kütlesi 10.81'dir, iki kararlı izotoptan oluşur. Ergime noktası 2300 °C, kaynama noktası ise 4002 °C olan metal ile ametal arası yarı iletken özellik gösteren bir elementtir.

Doğada serbest halde bulunmayan bor, diğer elementlerle bileşikler halinde mevcuttur. Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. En çok araştırılan kristalin polimorfları rombohedral formlardır. Bor elementinin kimyasal özellikleri, morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron boyutundaki amorf bor kolayca ve bazen şiddetli tepkimeye girerken, kristalin bor kolay kolay reaksiyona girmez. Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava, hidroklorik asit ve hidroflorik asitler karşısında soylu bir davranış sergiler ve yalnızca yüksek konsantrasyonlu Nitrik Asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilir. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile tepkimeye girerek bor oksit (B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile BN ve ayrıca bazı metaller ile Mg_3B_2 ve TiB_2 gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir.

Bor, bileşik halindeyken metal dışı bileşiklere benzer özellikler gösterirken, saf bor ise karbon gibi elektriği iletir. Kristalize bor, görünüm, sertlik ve optik özellikler açısından elmasa benzer bir yapıya sahiptir. Elementel bor, ilk kez 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından Bor Oksit'in Potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir [11-13].

2.2 Bor Ürünlerinin Sınıflandırılması

Endüstride kullanılan bor ürünleri, üretim aşamaları, prosesleri ve kullanım alanları dikkate alınarak, **ham bor**, **rafine bor ürünleri** ve **uç ürünler** şeklinde üç ana gruba ayrılabilir [14]. Uç ürünler, daha önce bahsedilen ham ve rafine ürünlerden üretilir. En önemli özellikleri, ileri teknoloji gerektiren yöntemlerle üretilmeleridir. Ham ve rafine bor ürünlerine kıyasla üretilen uç ürün sayısı daha fazladır. Başlıca uç ürünler arasında elementel bor, B_4C , BN ve bor alaşımları (demirli, nikelli ve kobaltlı) sayılabilir [14,15].

2.2.1 Elementel Bor

Bor fiberi, genellikle Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemiyle, karbon veya tungsten altlık (çekirdek) üzerine borun kaplanmasıyla üretilir. Uygulanan ısı işlem ile hibrit yapı üzerindeki kalıntı gerilmeler giderilir. Fiberin dayanımını azaltacak aşırı tane büyümesini engellemek için sıcaklığın dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Bor fiberler çok yüksek elastiklik modülü değerine sahiptir ancak oldukça pahalıdır.

Avantajlarına rağmen, Metal Matrisli Kompozit (MMK) üretimi sırasında bor fiberinin alüminyum (Al) ve titanyum (Ti) gibi metallerle hızla reaksiyona girmesi bir dezavantajdır. Ayrıca, tungsten telin bor ile kaplanması sırasında meydana gelen reaksiyon sonucu difüzyonla tungsten

boridik oluşumu gerçekleşir. Bu durum, borun dış yüzeyine yakın bir yerde eksenine dik bir basma gerilmesi yaratarak bor fiberi kırılğan hale getirir. Bu durumu önlemek amacıyla, borun üzerine kimyasal buharlaştırma (CVD) metoduyla SiC veya B₄C kaplanması tercih edilir ve bu kaplama kalınlığı 25-45 µm civarındadır [16].

2.2.2 Bor Karbür (B₄C)

B₄C, yüzlerce bor bileşiği içinde yüksek pazar hacmine sahip önemli bir bor uç ürünüdür. İleri teknolojik bir seramik malzemesi olan bor karbür; yüksek sertliği, düşük yoğunluğu, kimyasallara karşı direnci, ısıya dayanımı ve yüksek nötron absorplama özelliklerinden dolayı birçok askeri ve sivil uygulama alanı bulmuştur. B₄C üretimi için sol jel, kimyasal buhar biriktirme, kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık ve karbotermal indirgeme yöntemleri gibi çeşitli metotlar mevcuttur.

B₄C, SiC, Si₃N₄, elmas ve alümina gibi önemli sert ametall grubunda özel bir yere sahip, oksit olmayan bir seramik malzemedir. Kimyasallara karşı yüksek kararlılığı, iyi mukavemet özellikleri, nötron emme kabiliyeti ve düşük yoğunluğu gibi birçok üstün niteliği sayesinde zırh uygulamaları, nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu, kesici ve delici uçlar ve aşındırıcılar gibi çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. B₄C, elmas ve kübik bor nitrit (kBN)'den sonraki en sert üçüncü malzemedir [17].

Yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerine sahip olmasına rağmen, yüksek maliyeti nedeniyle kompozit malzemelerdeki kullanımı henüz arzu edilen seviyeye ulaşmamıştır. Sıcaklıkla çekme mukavemetinin artması gibi çok az malzemede bulunan bir özellik, B₄C'ü diğer takviye malzemelerine göre öne çıkarır. B₄C takviyeli kompozitlerin işleme problemleri ve mekanik özelliklerdeki sınırlamalar, alüminyumun matris malzemesi olarak kullanılmasıyla önemli ölçüde azaltılabilir.

B₄C'ün yoğunluğu 2.51g/cm³, ergime sıcaklığı 2450 °C'dir çekme dayanımı 980 °C'de 155 N/mm² ve 1425 °C'de 162 N/mm² olarak belirlenmiştir. Ayrıca eğme dayanımı 345 N/mm² ve basma mukavemeti 2850 N/mm²'dir. Bor karbür yalnızca HF, H₂SO₄, HNO₃ karışımlarında yavaşta olsa çözünmektedir [12].

B₄C seramiklerin şekillendirilmesinde sıcak presleme ve basınçsız sinterleme yöntemleri kullanılır. Yüksek sertliği nedeniyle bor karbür, en çok aşındırıcı olarak tüketilmektedir. Sement karbür ve teknik seramikler gibi sert malzemelerin taşlanması ve parlatılmasında, aşınmaya dayanıklı kesme işlemlerinde kullanılan nozullarda, hafif zırh malzemesi olarak helikopterlerde

ve can yeleklerinde plaka halinde ve nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu olarak kullanılmaktadır [18].

B₄C seramiklerin en hafifi olması, kompozitin toplam ağırlığını artırmadan mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılmasına olanak tanır. B₄C ile çalışırken dikkat edilmesi gereken bir dezavantaj, yüksek sertliği nedeniyle kompozitin ekstrüzyon kabiliyetinin sınırlı olmasıdır [19]. Tamamen yoğun mikroyapıların üretiminde karşılaşılan zorluklar ve B₄C 'ün gevrek kırılmaya karşı aşırı hassasiyeti, bu takviye malzemesinin temel sınırlılıklarıdır. Tablo 2 de geniş olarak B₄C'ün özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. B₄C'ün genel özellikleri[20]

Özellikler	Değerler
Bileşimi	B ₄ C
Moleküler Ağırlığı (g/mol)	55.26
Renk	Siyah (saf kristali transparan ve renksiz)
X-Ray yoğunluğu (gr/cm ³)	2,52
Termal iletkenlik (W/m.K)	30,00
Termal genleşme (10 ⁻⁶ /°C)	4,30
Elektriksel direnç (Ω.cm)	0,1-10
Vickers sertliği (GPa)	27,4-34,3
Elastisite modülü (GPa)	290-450
Kayma modülü (GPa)	165-200
Posion oranı	0,18
Esneme dayanımı (MPa)	323-430
Basma dayanımı (MPa)	2750
Oksitlenme direnci	Havada 600 °C'ye kadar oksitlenme direnci
Kimyasal direnç	Mükemmeldir.

2.2.3 Bor Nitrür (BN)

BN, düşük reaktifliği ve birçok uygulaması olan inorganik bir malzemedir. En sert insan yapısı malzemelerden bir tanesidir. Isıl, elektriksel, mekanik ve fiziksel özellikler gibi çok geniş bir malzeme nitelikleri dizisine sahip olması nedeniyle, birçok uygulaması vardır. Malzeme mühendisleri, çok çeşitli elektronik ve elektrik uygulamalarında yararlı olan, mükemmel bir ısıl şok özelliğine ilave olarak elektriksel yalıtkanlığın, yüksek ısıl iletkenliğin alışılmadık beraberliğini bor nitrürde bulmuşlardır [18].

BN'nin ilk sentezinin ardından bu konudaki çalışmalar uzun bir süre laboratuvar merakı olarak devam ettirilmiştir. Daha sonraları çok yüksek sıcaklıklara ve basınçlara çıkabilen preslerin geliştirilmesiyle suni elmas üretilebilmiş ve bor nitrür tekrar ilgi odağı haline gelmiştir. BN, kompozit malzemelerde katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Kovalent bağlı olması sebebiyle sinterlenmesi için bazı katkı maddeleri gerektirmektedir [21].

BN, grafitte çok benzer altıgen (hBN) yapıda tabakalar halinde veya kübik yapıda (kBN) elmasa çok yakın özelliklerde bulunabilir. kBN bilinen malzemeler içinde elmastan sonra en sert olduğundan, malzeme endüstrisinde sert metal kaplamalar yapmada (elmastan daha üstün özelliklerde, metal işlemede) kullanılmaktadır [22].

hBN havada 1000 °C'ye kadar kararlıdır. İndirgen koşullarda ve inert atmosferlerde 1800 °C'ye kadar kullanılabilir. Üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle elektriksel yalıtkan malzemeleri, kroze ve tepkime kapları, yüksek sıcaklık buharlaştırma kapları ve özel seramiklerin üretiminde endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Toz hBN makyaj malzemelerinde dolgu malzemesi olarak kullanım alanı bulmuştur [23].

Toz halindeki hBN, yüksek sıcaklıklarda yağlama malzemesi olarak geniş bir alanda kullanılmaktadır. Kübik bor nitrür ise elmas sertliğinde bir ürün olup “suni elmas” diye tanımlanabilmektedir. 1320 °C'ye kadar özelliklerini korur [15].

BN seramik tozlarının endüstriyel amaçlı üretiminde üç farklı sentez yöntemi mevcuttur.

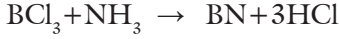
Geleneksel Endüstriyel Üretimler: Borik asit, bor oksit, azot gazı ve üre gibi azotlu organik bileşikleri hammadde olarak kullanarak hBN tozu üretimi geleneksel yöntemlere göre daha avantajlıdır. Bu yöntemle yüksek saflıkta toz üretimi mümkündür [24-26].

Plazma Yöntemi: Plazma prosesinde, çok ince tane boyutuna sahip hegzagonal bor nitrür tozları, borik asidin azot plazması altında ayrıştırılmasını takiben soğuk metan veya propan-bütan gazı ile soğutulması yöntemiyle üretilmektedir [27].

Karbotermik Redüksiyon: Bu yöntemde, bor nitrür tozlarının bor oksidin karbotermik redüksiyonu sonucu üretilmesi, B₂O₃ ile aktifleştirilmiş karbon karışımlarının azot atmosferi altında 1500 °C'de 120 dakika süre ile tutulması sonucu başarıyla gerçekleştirilmektedir [28].

kBN yüksek sıcaklık ve aşırı yüksek basınç altında sinterlenerek elde edilir. Sıcak sertlik, oksidasyon direnci ve kırılma tokluğunun iyi olması nedeniyle kBN'den yapılan kompozit kesici takımlar, sert demir içerikli malzemelerin kesme işleminde daha uzun takım ömrü ve mükemmel uç dayanımına sahiptirler.

Bor klorür ve amonyak aşağıdaki reaksiyonla, bor nitrür bileşimini meydana getirir:



Burada oluşan BN bileşiği, yaklaşık eşit sayıda bor ve azot atomlarının sırasıyla düzenlenerek oluşturduğu grafit yapısına benzer hegzagonal yapıya sahiptir. Hegzagonal boron nitrür hBN yumuşak, kaygan bir maddedir. hBN katalizör olarak bir alkali metali veya nitrürleri (lityum nitrür) gibi çözücü malzemeleri kullanarak kübik boron nitrüre kBN dönüşebilir.

Yüksek konsantrasyonlu kBN kesici uçların oda sıcaklığı sertliği karbür ve seramiklerden oldukça yüksek olup 3500-4000 HV arasında değişir. Yüksek sıcaklıkta 800-1000 °C'de kBN'ün sertliği alümina ve çoğu karbürlerin oda sıcaklığı sertliği ile karşılaştırılabilir. kBN endüstride ve araştırmalarda kullanımı, çoğunlukla tornalama ve delik büyütme işlemlerinde, çok az olarak da frezeleme işlemlerindedir [29].

2.2.4 Metal Borürler

Metal borür tozları, $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2/\text{B}_2\text{O}_3/\text{Mg}$ toz karışımlarının mekanokimyasal reaksiyon ortamında sentezlenmesi ile elde edilebilmektedir. Ayrıca Ti, Zr, Hf elementel tozlarının, elementel B tozu ile mekanik olarak alaşımlandırılması ile de borürlerin elde edilmesi mümkündür.

IVB grubu metal borürler, genel olarak, yüksek sertlik, yüksek ergime noktası, yüksek termal iletkenlik, yüksek elektriksel iletkenlik, düşük yoğunluk ve yüksek kimyasal kararlılık gibi üstün özelliklere sahiptirler. Bu özellikler, ileri teknoloji alanlarında kullanım yeri bulmalarına neden olmaktadır. IVB grubu metal borürler, karbotermik redüksiyon, metalotermik redüksiyon, ergimiş tuz elektrolizi, toz metalurjisi yöntemleri ve halojen metalurjisi ile üretilmektedir [30].

Titanyum Diborür (TiB_2), aşınma ve yüksek sıcaklık içeren uygulamalar için önem arz eden bir borürdür. TiB_2 , 3225 °C gibi yüksek bir ergime noktasına ve 4,52 g/cm³ düşük yoğunluğa sahiptir. Kesici takımlarda, aşınma direnci ekipmanlarında, zırh yapımında ve elektrolitik alüminyum üretiminde katot malzemesi olarak kullanılır. Nötron absorblama özelliği

bulunduğundan, yüksek sıcaklık nükleer reaktörlerde kontrol çubuk malzemesi olarak kullanılmaktadır [31].

Sıcak presle üretilmiş titanyum diborürün eğme mukavemeti 350-575 MPa, knoop sertliği değeri 2600 kg/mm² ve kırılma tokluğu 5-7 MPa. m^{1/2} dir. Elastiklik modülü 430-500 GPa ve poisson oranı 0.18-0.20'dir. TiB₂, SiC, TiC gibi oksit olmayan Al₂O₃ gibi oksit malzemelerle kompozit oluşturularak matris malzemenin dayanımı ve kırılma tokluğu artırılmaktadır [32].

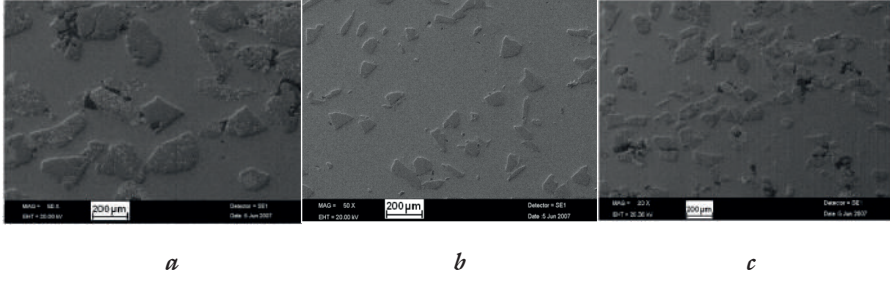
Zirkonyum Diborür (ZrB₂), sahip olduğu üstün özellikler (yüksek ergime noktası=3246 °C, Yüksek sertlik=2100 kg/mm² yüksek termal iletkenlik = 23-24 W/mK) sayesinde alüminyumun elektrokimyasal üretiminde katot olarak, aşındırma parçalarında, kesme takımlarında, nozullarda ve bazı zırh uygulamalarında kullanılır. Ayrıca yüksek oksidasyon direncine sahip olduğundan, geniş bir alanda kullanım yeri bulmaktadır. Bilinen en fazla kullanım alanı pota ve termokupl astarı yapımındadır [33].

Hafniyum Diborür (HfB₂), sahip olduğu mukavemet ve termal özelliklerinden ötürü yüksek hızlı araçlarda ısı kalkanı veya aerodinamik ana kenarlık olarak kullanılmaktadır. Ayrıca günümüzde bu borür, nükleer reaktör kontrol çubuklarında yeni bir malzeme olarak kullanılmaktadır [31,33].

3. Bor ve Ürünlerinin Kompozit Uygulamaları

Bor ve ürünleri kompozit malzemelerde takviye fazı veya matris olarak kullanılabilir. Bu ürünler daha çok metal matrisli kompozitlerde kullanılmakla birlikte, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozitlerde de uygulama alanı bulabilmiştir. Bor ve ürünlerinin yüksek maliyetlerinden dolayı SiC, Al₂O₃ gibi diğer takviye malzemelerine oranla daha az kullanıldığı görülmektedir.

Orhan ve ark. [34], %99 saflıkta Al tozları matris olarak, %99 saflıkta B₄C tozları ise takviye olarak kullanmış ve ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında B₄C içeren metal matrisli kompozitler üretmiştir. Kompozitler toz metalürjisi tekniği ile üretilmiş, soğuk izostatik preslemeden sonra sıcak presleme yöntemiyle gözeneklilik minimuma indirilmiştir. Artan takviye oranlarıyla birlikte mikrosertlikte artış olduğu ve yoğunlukta azalma olduğu saptanmıştır. Şekil 2'de üretilen kompozitleri SEM görüntüleri verilmiştir [34].

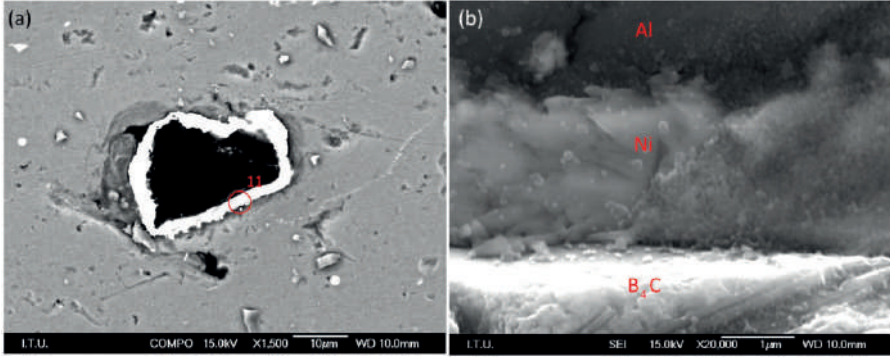


Şekil 2. Al/B_4C kompozitler a) %10 B_4C , b) %20 B_4C , c) %30 B_4C [34].

Al/B_4C kompozitler balistik açıdan zırh malzemesi olarak da kullanılabilir. Arslan ve ark. [35], savunma sanayisi için yaptıkları bir çalışmada, gözenekli bor karbür altlıklara 2024 alüminyum alaşımlarını argon ortamında basınçsız olarak emdirilmesi yöntemi ile B_4C / Al kompozitleri üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin içyapı, mekanik ve balistik özellikleri kontrol edilmiş; kalınlığı yaklaşık 1 cm olan kompozit plakaları cam elyaf örgülü destek plakası ile birleştirilerek elde edilen zırh sistemi, balistik testlerde 4. seviye tehditlere karşı tam koruma sağlamıştır [35]

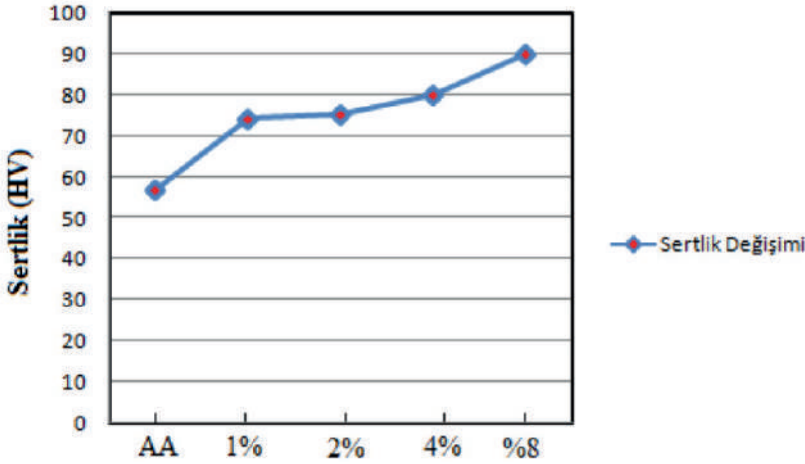
Alüminyum matrisli B_4C takviyeli kompozit malzemelerin geleneksel döküm yöntemleriyle üretiminde, sıvı alüminyumun B_4C partiküllerini ıslatabilirliğinin düşük olması bir problemdir. Bu problemi çözmek için takviye partiküllerinin kaplanması ve ön ısıtma gibi işlemler kullanılır. Nikel, alüminyum matrisli kompozit malzemelerde takviye fazın kaplanması için en çok tercih edilen metaldir.

Bir çalışmada [36], B_4C partiküllerinin yüzeyleri akımsız nikel ile kaplanarak veya farklı sıcaklıklarda oksitleyerek bor oksit tabakası oluşturularak ıslatılabilirlik iyileştirilmiştir. Akımsız nikel kaplanmış B_4C partikülleri kullanılarak döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretilmiştir. Yapılan çalışmalardan, yüzey özellikleri değiştirilen B_4C partiküllerinin, ergitme koşullarının optimizasyonu sağlandığında sıvı alüminyum tarafından ıslatılabilirliğinin iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır [36]. Şekil 3.'de Ni kaplanmış B_4C takviyeli bir kompozitin SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. Nikel kaplanmış B_4C parçacığının Al matris içindeki SEM görüntüsü [36].

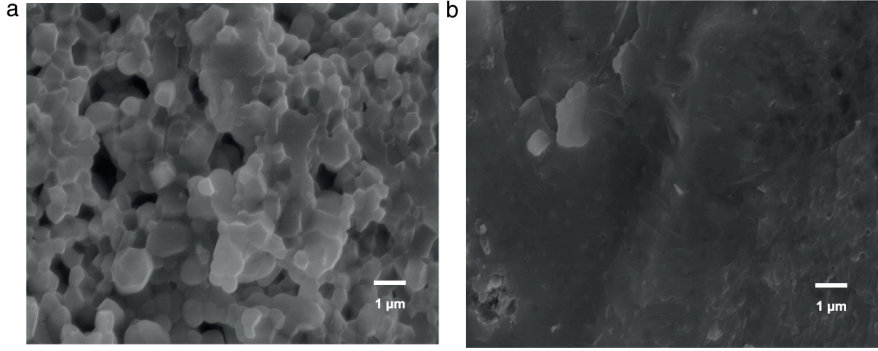
Al/ B_4C kompozitin B_4C takviye oranlarına göre sertlik değişimi grafiği, Şekil 4'te Al/ B_4C kompozitin B_4C takviye hacim oranlarına göre sertlik değişimi görülmektedir. Grafiğe göre %8 B_4C takviye oranında en yüksek sertlik (90 HV civarında) elde edilmiştir.



Şekil 4. Al/ B_4C kompozitin B_4C takviye oranlarına göre sertlik değişimi [37].

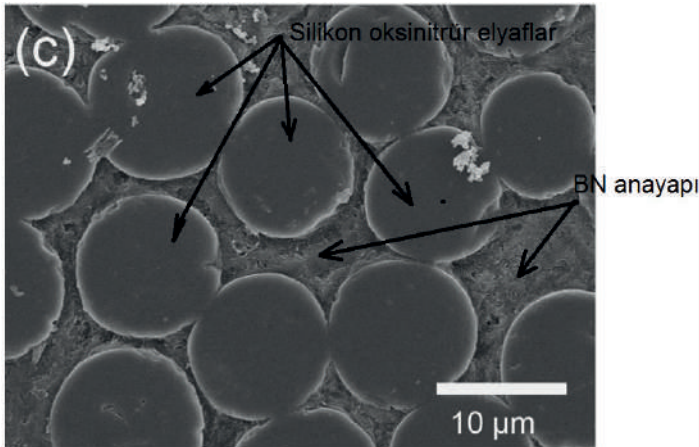
Ortopedik implant uygulamaları üzerine yapılan bir çalışmada [38], bor nitrür (BN) nano tüpleriyle (ortalama 1.98 μm boyu ve ortalama 71 nm çapında toz) takviye edilmiş hidroksiapatit (HA) matrisli (ortalama 210 nm boyu ve ortalama 37 nm çapında toz) bir kompozit malzeme üretilmiştir. Kompozit malzeme kıvılcım plazma sinterleme metoduyla üretilmiştir. %4 BN nano tüp içeren kompozit, HA ile karşılaştırıldığında elastik modülünde

%120 artış, sertlikte %129 artış, kırılma tokluğunda ise %86 artış gözlenmiştir (Şekil 5). Mekanik özelliklerdeki bu iyileşme, tane yapısındaki küçülme ve BN nanotüplerinin çatlakları köprülemesi ile sağlanmıştır. Aynı zamanda bu kompozitin aşınma direncinde ise %75 iyileşme gözlenmiştir [38].



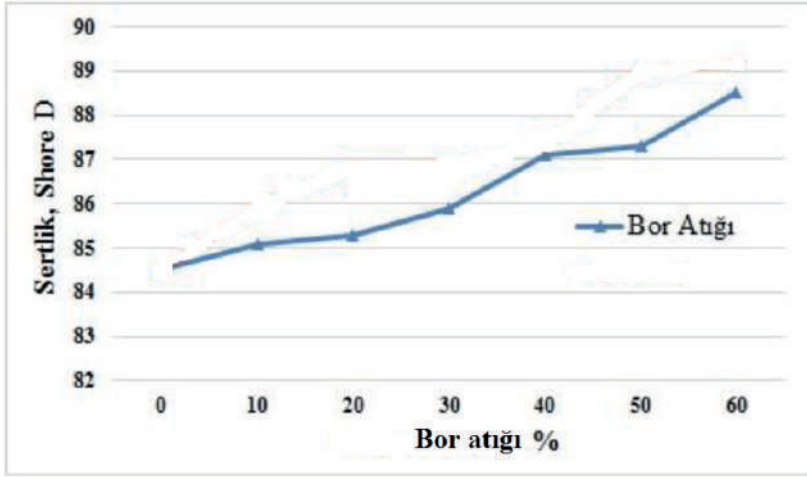
Şekil 5. Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) gözenekli HA, b) daha yoğun yapıda HA/BN nano tüp kompozit malzeme [38].

Zou ve ark. [39] yaptığı bir çalışmada Silikon oksinitrür ($S-N-O_f$) sürekli elyaflarla takviye edilmiş bor nitrür (BN) matrisli seramik kompozitlerin oksiasetilen üfleci altında ablasyon davranışı incelenmiştir. Şekil 6'da $S-N-O_f/BN$ kompozitin mikro yapısı görülmektedir [39].



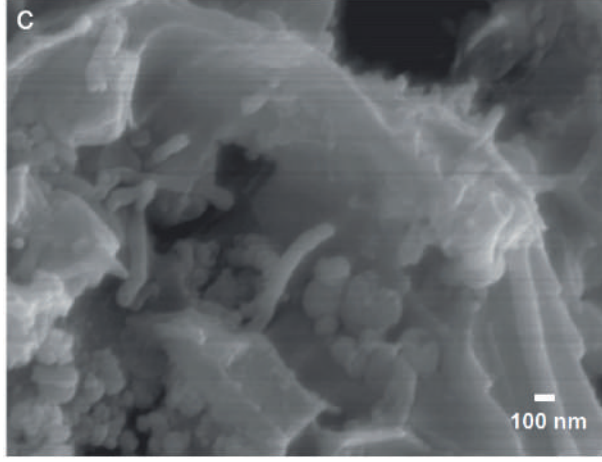
Şekil 6. $S-N-O_f/BN$ kompozitin mikro yapısı [39].

Afyon Kocatepe üniversitesinde yapılan bir tez çalışmasında bor atığı katkı polimer kompozitlerin mekanik ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Bor atığı ise öğütülüp $75\ \mu\text{m}$ 'luk ortalama toz boyutu elde edilmiştir (Şekil 7). Elde edilen kompozitlerin sertliği ve basma dayanımı bor atığı miktarıyla artmıştır. Ayrıca bor atığı takviyesi ile aşınma direncinde de artış gözlenmiştir [40].



Şekil 7. Bor atığı takviyeli epoksi matrisli kompozitin takviye miktarı-sertlik ilişkisi [40].

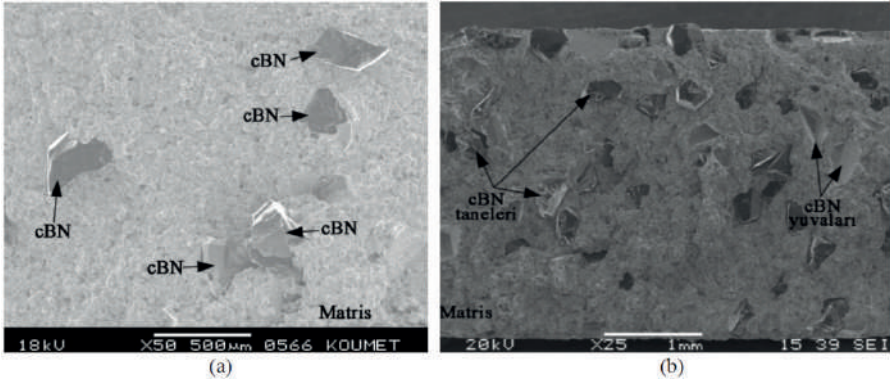
Lahiri ve ark. [41] yaptığı bir çalışmada bor nitrür nano tüplerle (BNNT) takviye edilmiş Al matrisli kompozitler kıvılcım plazma sinterleme yöntemiyle üretilmiştir. %2 ve %5 oranlarında takviyeli kompozitler üretilmiştir. %5 oranında üretilen kompozit numunede akma ve basma dayanımı sırasıyla 88 MPa ve 216 MPa elde edilmiştir ve bu değerler takviye edilmemiş Al'a göre %50 daha yüksektir. Şekil 8'de bu kompozitin iç yapısı görülmektedir [41].



Şekil 8. Al/BN nano tüp kompozit iç yapısı [41].

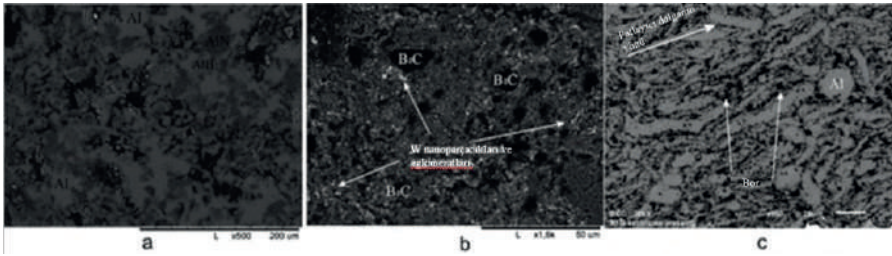
Lua ve ark. [42] yaptığı bir çalışmada %40 hacim oranında kübik bor nitrür (kBN) takviyeli NiCrAl alaşımı matrisli kompozit malzemeyi mekanik alaşımlama yöntemi ile üretmişlerdir. Mekanik alaşımlama için öğütme esnasında bilyelerde yabancı elementlerin bulaşmasını engellemek için, öğütme bilyelerini Ni ile kaplamışlardır. Üretilen kBN/NiCrAl kompozit numunede 1150 HV sertlik değerini elde etmişlerdir [42].

Fırat üniversitesinde yapılan bir doktora tezinde mermer kesici takımlarında elmas yerine kübik bor nitrür (kBN) takviye parçacıklarının kullanılması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Matris malzemesi olarak 45-50 μm ortalama toz boyutunda %99.9 saflıkta bronz (%85 Cu + %15 Sn) tozları kullanılmıştır. Numuneler 600-700 $^{\circ}\text{C}$ aralığında sinterlenmiştir. Yapılan test sonuçlarına göre kBN takviyeli kompozit numuneler elmas kadar olmasa da yakın özellikler sergilemişlerdir. Ayrıca kBN takviyeli kesici takım soketleri elmas takviyeli olanlara göre %30 daha fazla eğme dayanımı sergilemişlerdir. Şekil 9'da kBN takviyeli bir kesici takımın SEM görüntüleri verilmiştir [43].



Şekil 9. kBN takviyeli kesici takımın kırılma yüzeyi SEM görüntüleri a) 600°C’de sinterlenmiş b) 700°C’de sinterlenmiş [43]

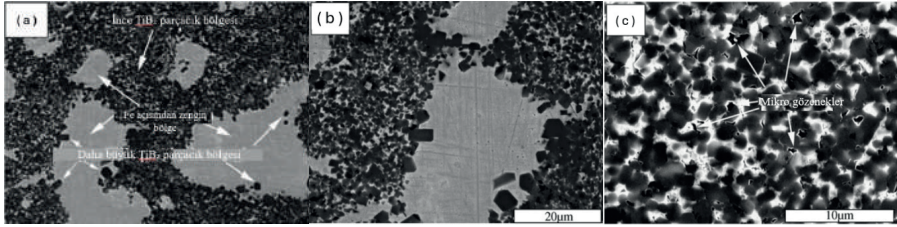
Gorshenkov ve ark. [44] yaptığı bir çalışmada Al-7075 alaşımı matrisli ve amorf bor, hegzagonal bor nitrür (hBN) ve bor karbür (B_4C) takviyeli kompozitler üretilmiş ve tribolojik testlere tabi tutulmuştur. hBN takviyeli olan numune vakum emdirme tekniği ile 800 °C’de üretilmiştir. Amorf bor takviyeli kompozit 100 μm ortalama toz boyutunda Al tozları %30 hacim oranında ve 10 μm ortalama toz boyutunda amorf bor tozları kullanılarak patlamalı presleme yöntemi ile üretilmiştir. %20 hacim oranında bor karbür (ortalama toz boyutu 100 μm) ve %2 tungsten tozları (ortalama toz boyutu 50 nm) ve Al matrisi ile mekanik alaşımlama metodu ile üretilmiştir. Test sonuçlarına göre en iyi tribolojik performansı B_4C ve W takviyeli numune göstermiştir. Bu üç numunenin de SEM görüntüleri şekil 10’da verilmiştir [44].



Şekil 10. Al matrisli a) hBN, b) B_4C ve c) amorf B ; takviyeli kompozit numunelerin SEM görüntüleri [44].

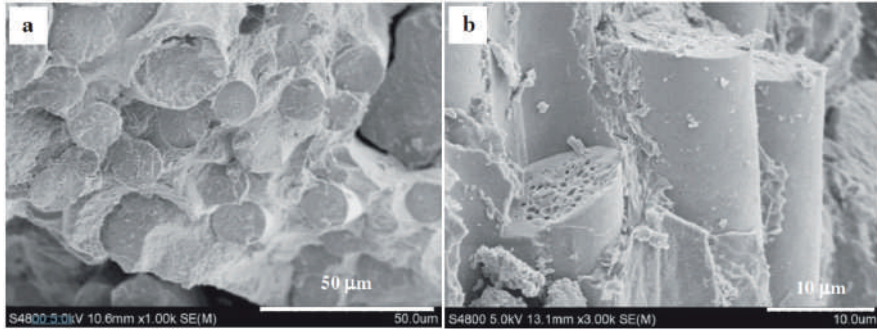
Wang ve ark. [45] yaptığı bir çalışmada Fe-Ti-B ön sisteminden %10-30-50-70 gibi farklı hacim oranlarında Fe içeriğiyle, in-situ tekniği kullanılarak

TiB₂ takviyeli kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit numuneler incelendiğinde 3 farklı bölge tespit edilmiştir. Fe içeriği bakımından zengin bölgeler, ince taneli TiB₂ bakımından zengin bölgeler ve kaba taneli TiB₂ bakımından zengin bölgeler ve de ayrıca az miktarda mikro gözenekler olduğu görülmüştür. Elde edilen kompozitin SEM görüntüsü şekil 11'de verilmiştir ve aşınma direnci takviyesiz çelik numuneden daha yüksektir [45].



Şekil 11. Çelik matrisli TiB₂ takviyeli kompozitin SEM görüntüleri [45].

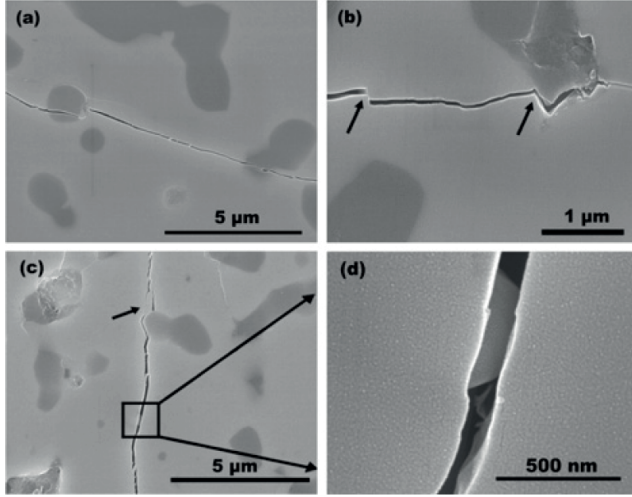
Li ve ark. [46] yaptığı diğer bir çalışmada ise silisyum bor nitrür (SiBN) elyaf takviyeli ve bor nitrür (BN) matrisli kompozit ön şekil emdirmeye tekniği ile 1000 °C'de üretilmiştir ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen kompozitin yoğunluğu 1.75 g/cm³ ve gözeneklilik miktarı %7.77'dir. Numunenin bükülme dayanımı 120.1 MPa, elastik modülü 46.6 GPa ve kırılma tokluğu 4.68 MPa.m^{1/2}'dir. Kompozitin SEM görüntüsü şekil 12'de verilmiştir [46].



Şekil 12. SiBN elyaf takviyeli BN matrisli kompozitin SEM görüntüsü [46].

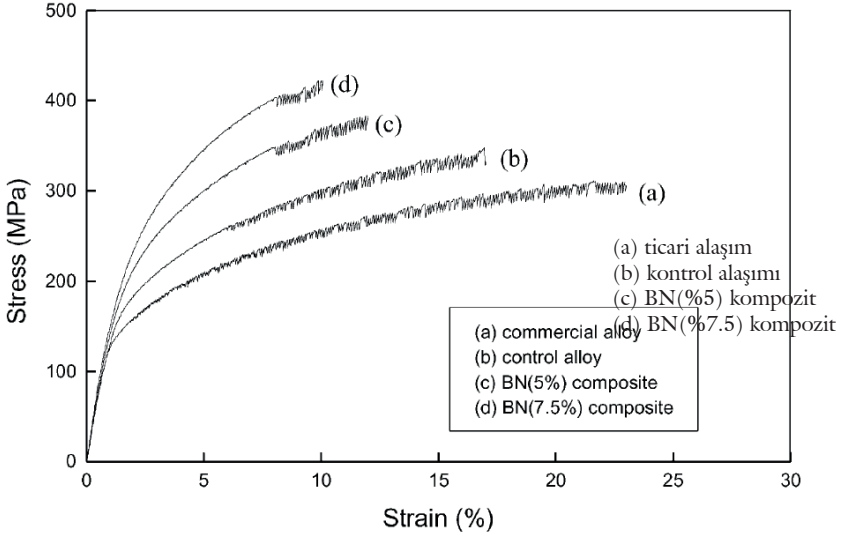
Yue ve ark. [47] yaptığı bir çalışmada ise zirkonyum diborür (ZrB₂) ve silisyum karbür (SiC) matrisli, bor nitrür nanotüp (BNNT) ve bor nitrür nanolevha (BNNP) karışımı takviyeli kompozit malzemeyi kıvılcım plazma sinterleme metodu ile üretmişlerdir. Takviye oranı %24.4'e kadar kırılma

tokluğunda artış gerçekleşmiştir. Kırılma tokluğu 3.73'ten 4.64 MPa.m^{1/2}'ye yükselmiştir. Kırılma tokluğundaki bu gelişme çatlak köprülenmesi, çatlak dallanması ve çatlak sapması mekanizmalarının birlikte etki etmesi ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 13'te bu mekanizmaların SEM görüntüleri verilmiştir [47].



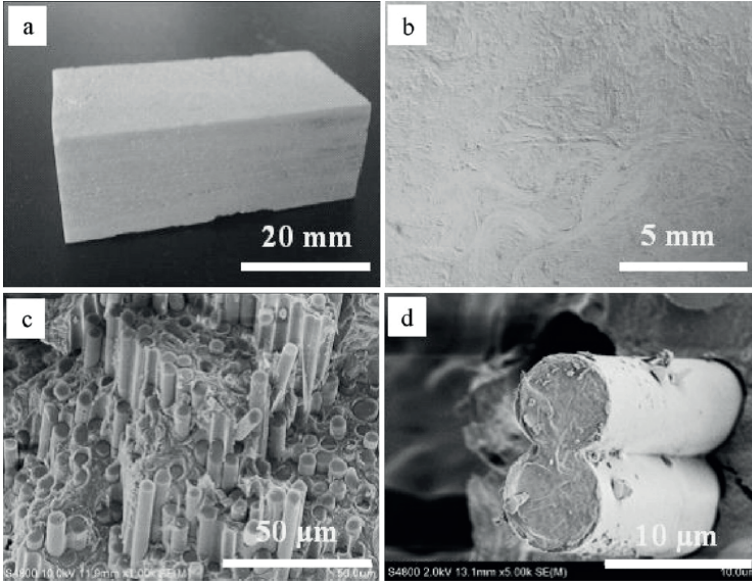
Şekil 13. (BNNT-BNNP)/(ZrB₂-SiC) kompozit malzemenin mikro çatlak SEM görüntüleri; a) mikro çatlak, b) çatlak sapması, c) çatlak dallanması, d) çatlak köprülenmesi (nanolevhalar vasıtası ile) [47].

Lee ve ark. [48] yaptığı bir çalışmada Al-%4.5Mg alaşımı matrisli ve bor nitrür (BN) takviyeli bir kompozit malzeme 800 °C'de basınçsız infiltrasyon metodu ile üretilmiştir. Üretim esnasında Al ve BN ara yüzeyinde oluşan reaksiyon sonucu alüminyum nitrür (AlN) intermetalik bileşiği oluşmuştur. Bu reaksiyon in-situ reaksiyonu olarak bilinmektedir. Elde edilen %7.5 BN takviyeli Al alaşımı esaslı kompozit ince taneli bir yapıdadır ve tane boyutu ortalama 4µm civarındadır ki bu değer ticari bir Al alaşımınınkinden 3.5 kez daha incedir. Hem BN takviyesi hemde in-situ prosesi sonucu oluşan AlN intermetalik bileşiği sayesinde dayanımda çok iyi gelişme sağlanmıştır. Şekil 14'te kompozit malzeme ve Al alaşımın gerilim-şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere BN takviyesinin dayanıma önemli ölçüde katkısı bulunmaktadır [48].



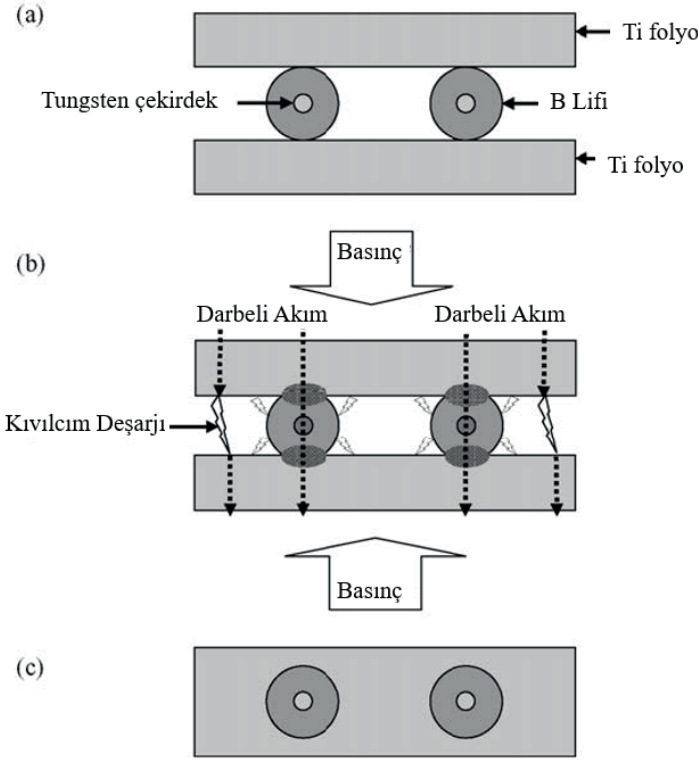
Şekil 14. Al-% 4.5 Mg alaşımı matrisli BN takviyeli kompozit malzeme ile Al-% 4.5 Mg alaşımının gerilme - şekil değiştirme eğrisinin karşılaştırılması [48].

Li ve ark. [49] bor nitrid (BN) elyaflarla takviye edilmiş BN matrisli kompozit bir malzemeyi ön şekil infiltrasyon yöntemi ile üretmişlerdir. Kompozit BN'nin ince kristalli ve yüksek içerikli yapısına sahiptir. Yoğunluğu 1.60 gr/cm^3 ve gözeneklilik oranı %4.66'dır. Kompozit iyi mekanik özellikler sergilemiştir ve bükülme dayanımı 53.8 MPa , elastik modülü 20.8 GPa , kırılma tokluğu $6.88 \text{ MPa.m}^{1/2}$ 'dir. Kırılma yüzeyinde yapılan SEM incelemelerinde kompozitin iyi matris/takviye arayüzüne sahip olduğu anlaşılmıştır. Aynı zamanda kompozit mükemmel dielektrik özellikler sergilemiştir. Elde edilen kompozit numunenin optik ve SEM görüntüleri şekil 15'te verilmiştir [49].



Şekil 15. BN elyaf/BN kompozitin optik ve SEM görüntüleri [49].

Mizuuchi ve ark. [50] yaptığı diğer bir çalışmada ise bor elyaf takviyeli titanyum matrisli kompozit malzeme puls akımı sıcak presleme yöntemi ile 800 °C'de ve 32 MPa basınçta üretilmiştir ve kompozitteki hacimce bor elyaf yüzdesi 17.2'dir. Üretim sıcaklığı 900 °C'nin üzerine çıkarıldığında matris ve elyaf arayüzeyinde TiB_2 ve bor elyafın merkezinde bulunan tungsten çekirdeği etrafında ise amorf yapıda bor kristalleri olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan test sonucunda kompozitin elde edilen çekme dayanımı 706 MPa'dır. Şekil 16'da bu kompozitin üretimi şematik olarak gösterilmiştir [50].

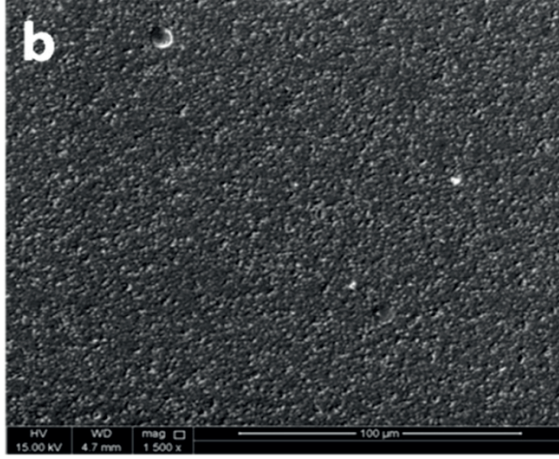


Şekil 16. Ti matrisli ve bor elyaf takviyeli kompozitin üretimi [50].

4. Bor ve Ürünlerinin Kompozit Kaplama Uygulamaları

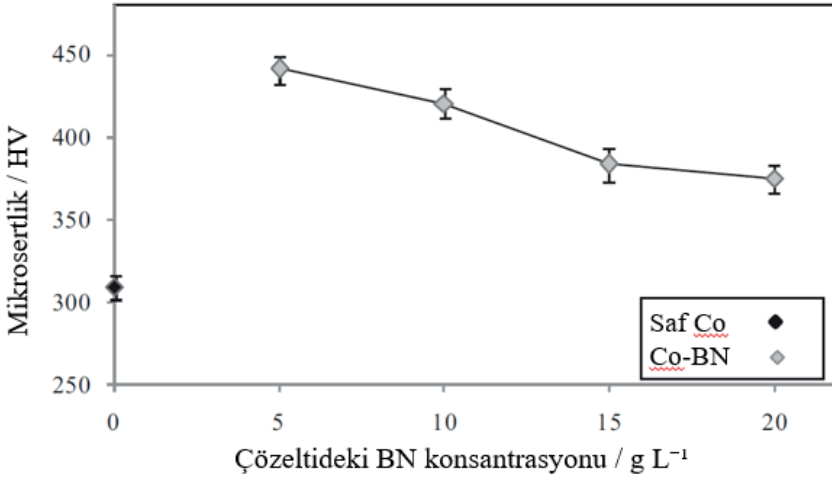
Bor ve ürünleri farklı üretim metodlarıyla çelik, alüminyum vb. metal alaşımları ile seramik veya polimerik malzemeler üzerine mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla kaplanabilmektedir. Bor ve ürünleri çeşitli metaller, seramik parçacıklar ve iletken polimerlerle birlikte kaplama olarak kullanılabilir. Borun element olarak Ni ile yaptığı alaşımların kompozit kaplamalarda kullanıldığı dikkat çekmektedir. Bu alaşımda Al_2O_3 , Si_3N_4 , ZrO_2 , SiC, elmas, CeO_2 , TiO_2 gibi takviye elemanları kullanılabilir. Ayrıca bor nitrüründe kompozit kaplamalarda metaller veya polimerle birlikte kullanıldığı görülmektedir.

Shakoor ve ark. [51] yaptığı bir çalışmada çelik altlık üzerine Ni-B matrisli, Al_2O_3 takviyeli kompozit kaplama elektro-depolama yöntemi ile kaplanmıştır. Elde edilen kaplamanın sertlik, elastik modülü ve korozyon direnci, Ni-B alaşım kaplamaya göre daha iyidir ve şekil 17’de Ni-B- Al_2O_3 kompozit kaplamanın SEM görüntüsü verilmiştir [51].



Şekil 17. Ni-B- Al_2O_3 kompozit kaplamanın SEM görüntüsü [51].

Shahri ve ark. [52] kobalt (Co) matrisini nano boyutta (70nm) hegzagonal bor nitrür (hBN) ile takviye ederek elektro-depolama yöntemi ile bakır altlık üzerine kompozit kaplama yapmışlardır. Saf Co kaplama ile karşılaştırıldığında optimum kompozisyona sahip hBN parçacıklı kompozit kaplama daha kaba yüzey pürüzlülüğü, daha yüksek mikrosertlik ve aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı sergilemiştir. Şekil 18’de hBN içeriği ile mikrosertlik ilişkisinin grafiği verilmiştir [52].

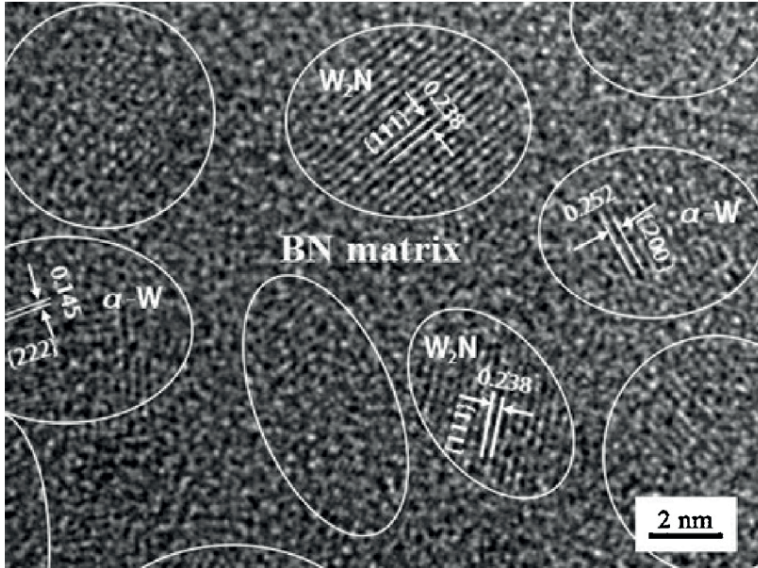


Şekil 18. hBN içeriği ile mikrosertlik ilişkisinin grafiği [52].

Xiaozhen ve ark. [53] yaptığı diğer bir çalışmada ise nikel matrisi içerisine samaryum oksit (Sm_2O_3) ve titanyum diborür (TiB_2) parçacıkları takviye edilerek elektro-depolama yöntemi ile kompozit kaplama üretilmiştir. 0.6-3 g/l arasında değişen konsantrasyonlarda Sm_2O_3 parçacık kullanılmıştır. Sm_2O_3 ve TiB_2 tek başına takviye olarak kullanımına göre birlikte kullanımı sertlik ve aşınma direncinde artışa, sürtünme katsayısında azalmaya neden olmuştur [53].

Huang ve ark. [54] yaptığı bir çalışmada korozyon direncini geliştirmek amacıyla poliamid matris, hegzagonal bor nitrür ile takviye edilerek çelik altlık üzerine kompozit kaplama elde edilmiştir. hBN parçacıklarının % 5'lik hacim oranındaki numunesi en yüksek korozyon direncini sergilemiştir [54].

Bor nitrür içeren diğer bir kompozit kaplama ise Yu ve ark. [55] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada WBN kompozit filmleri farklı bor içeriklerinde çoklu hedef magnetron sıçratma tekniği ile üretilmiştir. En iyi sertlik ve basma dayanımı %38.1 bor içeriği ile elde edilmiştir. Bu değerdeki sertlik 36.1 GPa ve basma dayanımı 2.6 GPa'dır. Ayrıca kaplama korozyon direncini de artırmıştır. Şekil 19'da kompozit kaplamanın HRTEM görüntüsü verilmiştir [54].



Şekil 19. WBN kompozit kaplamanın HRTEM görüntüsü [55].

5. Sonuçlar

Bu kapsamlı inceleme, bor ve bileşiklerinin, özellikle bor karbür (B_4C), bor nitrid (BN) ve metal borürlerin (TiB_2 , ZrB_2) yüksek performanslı kompozit malzemeler alanında oynadığı kritik rolü ve sunduğu potansiyeli açıkça ortaya koymaktadır. Geleneksel alaşım ve malzemelerin ötesine geçen üstün özellikler arayışı, bor esaslı takviyelerin kullanımını zorunlu kılmıştır.

Bor Bileşiklerinin Üstün Mekanik Performansı:

Bor karbür ve bor nitrid, elmaştan sonra gelen en sert malzemeler olarak kompozitlerin mekanik performansını dramatik bir şekilde artırmaktadır.

- **Bor Karbür (B_4C):** B_4C 'nin yüksek sertliği ve düşük yoğunluğu, onu zırh uygulamaları için ideal bir takviye yapmaktadır. Örneğin, Al/ B_4C kompozitlerin, balistik testlerde 4. seviye tehditlere karşı tam koruma sağladığı kanıtlanmıştır. B_4C takviye oranı arttıkça, Al matrisli kompozitlerin mikrosertliğinin de önemli ölçüde yükseldiği görülmektedir. Bu, sertlik artışı ve yoğunlukta azalma sağlayan toz metalurjisi ve sıcak presleme gibi yöntemlerle desteklenmektedir.
- **Bor Nitrid (BN);** nano tüpleri ve parçacıkları, özellikle seramik ve metal matrisli sistemlerde olağanüstü performans iyileştirmeleri sunmaktadır. Hidroksiapatit (HA) matrisli kompozitlerde, BN nano tüp takviyesi, kırılma tokluğunda %86, elastik modülünde %120 ve sertlikte %129 gibi dikkat çekici artışlar sağlamıştır. Bu iyileşmeler, BN nanotüplerinin çatlak köprüleme mekanizmasıyla ilişkilidir. Al matrisli kompozitlerde ise %7,5 BN takviyesi, in-situ reaksiyonla oluşan AlN bileşiği sayesinde dayanımı önemli ölçüde artırmış, hatta ticari Al alaşımından 3,5 kat daha ince taneli bir yapıya ulaşmıştır. BN'nin hegzagonal yapısı nedeniyle, hBN parçacıklı Co kaplamaların saf Co kaplamaya göre daha yüksek mikrosertlik ve aşınma direnci sergilediği gözlemlenmiştir.

Bor Bileşiklerinin Fonksiyonel Üstünlükleri:

Bor bileşikleri sadece mekanik dayanım sağlamakla kalmaz, aynı zamanda önemli fonksiyonel özellikler de sunar:

- **Nötron Absorpsiyonu ve Termal Kararlılık:** B_4C ve TiB_2 'nin yüksek nötron absorplama kabiliyeti, onları nükleer reaktörlerde kontrol çubuk malzemesi olarak vazgeçilmez kılmaktadır. hBN'nin yüksek termal kararlılığı (indirgen atmosferde 1800 °C'ye kadar) ve yüksek ısı iletkenlikle birleşen elektriksel yalıtkanlığı, onu elektronik ve yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal yapmaktadır.

- Islatılabilirlik Sorunları ve Çözüm Yolları: B_4C gibi bor takviyelerinin sıvı Al matrisleri tarafından düşük ıslatılabilirliği, döküm yöntemlerinde karşılaşılan temel bir zorluktur. Bu sorunun üstesinden gelmek için, B_4C partiküllerinin yüzeyleri nikel ile akımsız kaplama veya bor oksit tabakası oluşturacak şekilde oksitleme gibi yüzey modifikasyon yöntemlerinin başarıyla uygulandığı görülmektedir. Bu çözümler, matris/takviye ara yüzey bağ kuvvetini iyileştirerek kompozit performansını artırmaktadır.
- Aşınma ve Korozyon Direnci: kBN takviyeli kesici takımların yüksek sıcak sertliği ve kırılma tokluğu sayesinde sert demir içerikli malzemelerin işlenmesinde üstün performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca hBN'nin polimer matrisli kaplamalarda korozyon direncini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir.

Bor Kaynaklarının Stratejik Önemi:

Türkiye'nin boraks rezervleri açısından tek el konumunda olması ve borun yüksek katma değerli uç ürünlere dönüştürülmesi hedefi, bor esaslı kompozit araştırmalarına verilen önemi artırmaktadır. Bor atıklarının bile epoksi matrisli kompozitlerde sertliği ve aşınma direncini artırmak için başarıyla kullanılması, bu kaynağın ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesi potansiyelini göstermektedir.

Gelecek Perspektifi:

Bor ve bileşikleri, hafif zırh, kesici takımlar, nükleer reaktör bileşenleri ve ortopedik implantlar gibi yüksek performans gerektiren alanlarda kritik öneme sahiptir. Özellikle BNNT ve BNNP karışımı takviyelerin, seramik matrislerde çatlak dallanması, sapması ve köprülenmesi gibi mekanizmalarla kırılma tokluğunu belirgin şekilde iyileştirmesi, ultra yüksek performanslı seramik matrisli kompozitlerin geliştirilmesi için büyük bir potansiyel vadetmektedir.

Sonuç olarak, bor ve ürünleri, kompozit bilminde mekanik üstünlük, termal kararlılık ve fonksiyonellik açısından çığır açıcı özellikler sunan, stratejik değeri yüksek malzemelerdir. Türkiye'nin kaynak zenginliği ile birleşen bu teknik potansiyel, bor esaslı kompozitlerin gelecekteki mühendislik uygulamalarında merkezi bir rol üstleneceğini işaret etmektedir.

6. Kaynaklar

1. Çıtak, R. Metalik Ba-Al Başlangıç tozlarının Düşük Sıcaklıklarda Oksidasyonu ile Al Matrisli Kompozit Üretimi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-26, 1998.
2. Fedai, Y.; Basar, G.; Kirli Akin, H. (2022) Multi-response optimization in drilling of MWCNTs reinforced GFRP using grey relational analysis. *Tehnički vjesnik* 29, 742-751.
3. Fedai, Y. (2023) Optimization of drilling parameters in drilling of MW-CNT-reinforced GFRP nanocomposites using Fuzzy AHP-weighted taguchi-based MCDM methods. *Processes* 11, 2872.
4. Callister, W.D.; Rethwisch, D.D.; Genel, K. *Malzeme bilimi ve Mühendisliği*; Nobel: 2013.
5. Başar, G.; Fedai, Y.; Akin, H.K. (2020) Kompozit malzemelerin delme işleminde itme kuvvetinin taguchi metodu ile optimizasyonu ve regresyon analizi ile tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35, 969-982.
6. Fedai, Y. (2024) Karbon nano tüp katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin delme parametrelerinin Taguchi tabanlı Critic-CoCoSo yöntemleriyle optimizasyonu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 7, 729-750.
7. Yastımoğlu, F.; Özkan, A. (2017) Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 5, 56-66.
8. Garrett, D.E. *Borates: Handbook of deposits, processing, properties, and use*; Elsevier: 1998.
9. Bello, I.; Chong, Y.; Leung, K.; Chan, C.; Ma, K.; Zhang, W.; Lee, S.; Layyous, A. (2005) Cubic boron nitride films for industrial applications. *Diamond and related materials* 14, 1784-1790.
10. Atasoy, A. (Year) Processing and characterisation of chromite for metallurgical applications. In *Proceedings of the Proc 11th Int. Metall. and Metal. Conf. Istanbul*, pp. 718-729.
11. Odası, T.M.M. (2003) Bor Raporu. *Metaller Dergisi* 134, 1-50.
12. Teşkilatı, D.P.; Komisyonu, M.Ö.İ. *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri*; DPT: 2001.
13. Yiğitbaşıoğlu, H. (2004) Türkiye için önemli bir maden: Bor. *Coğrafi Bilimler Dergisi* 2, 13-25.
14. Acarkan, N. (2002) Bor ürün çeşitleri ve kullanım alanları, I. Uluslar arası bor sempozyumu, 1-5.

15. Samuk, T.B.(2015) Yapı malzemesi üretiminde kullanılan bor türevlerine yönelik çalışmaların analizi.
16. Akdoğan, E.(2008) Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri Ders Notları. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
17. Alp, E.; Karaçay, E.; Cabbar, H.C.(2013) Düşük sıcaklıkta bor karbür üretimi ve karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 28.
18. Weimer, A.W. *Carbide, nitride and boride materials synthesis and processing*; Springer Science & Business Media: 2012.
19. Lee, B.-S.; Kang, S.(2001) Low-temperature processing of B₄C–Al composites via infiltration technique. Materials Chemistry and Physics 67, 249-255.
20. Pierson, H.O. *Handbook of refractory carbides and nitrides: properties, characteristics, processing and applications*; William Andrew: 1996.
21. Pekin, Ş. Hegzagonal Bor Nitrür Sentezinde Reaksiyon Hızını Kontrol Eden Aşamalar ve Turbostratik-Hegzagonal Yapı Geçışı. Yüksek Lisans Tezi, 1992.
22. KÖYTEPE, S.; AKSOY, B.; SEÇKİN, T.(Yüksek Isıl Dayanıma Sahip Bor Nitrür Esaslı Poliimid Nanokompozitlerinin Hazırlanması ve Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi.
23. Kumashiro, Y. *Electric refractory materials*; CRC Press: 2000.
24. Funahashi, T.(1992) Development and application of high-purity hexagonal boron nitride (h-BN) powder. Kawasaki Steel Giho 24, 135-141.
25. Johnson, D.W.(1981) Nonconventional powder preparation techniques.
26. Lipp, A.; Schwetz, K.A.; Hunold, K.(1989) Hexagonal boron nitride: fabrication, properties and applications. Journal of the European Ceramic Society 5, 3-9.
27. Kostić, Ž.G.; Stefanović, P.L.; Pavlović, P.B.; Cvetinović, D.B.; Šikmanović, S.Đ.(2000) Optimal plasma process routes for boron nitride (BN) powder production from boric acid (H₃BO₃). Ceramics international 26, 165-170.
28. Aydoğdu, A.; Sevinç, N.(2003) Carbothermic formation of boron nitride. Journal of the European Ceramic Society 23, 3153-3161.
29. Şahin, Y. *Talaş kaldırma prensipleri*; Nobel Yayın Dağıtım: 2001.
30. Canöz, B.; Metin, A.Ü.; Gürü, M.(2021) Mekanokimyasal yöntemle elementlerinden magnezyum diborür (MgB₂) sentezi ve enerjetik madde olarak kullanımı. Politeknik Dergisi 24, 933-941.
31. Otmer, K. Encyclopedia of Chemical Technology., Volum 19, John Wiley and Sons. 1962.

32. TÖRE, İ.; AY, N.(Borlu Seramiklerin Karakterizasyonu Characterisation of Boron Ceramics.
33. Huppertz, H. Book Review: Handbook of Ceramic Hard Materials. Vols. 1+ 2. Edited by Ralf Riedel. **2001**.
34. Orhan, A.; Gür, A.; Çalığıülü, U.(2007) Al matrisli B4C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 4, 8-13.
35. Arslan, G.; Kara, F.; Turan, S.; Kalemtaş, A.(Bor karbür – Alüminyum kompozitlerin balistik performansı.
36. Kılıçaslan, A. Modification of surface properties of B4C particles to improve wettability for Al-B4C composites. Yıldız Teknik üniversitesi, 2009, 2009.
37. TAŞCI, U.; Gökmeşe, H.; Bostan, B.(2013) AA 2014 Al Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mikro Yapı ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 1, 161-168.
38. Lahiri, D.; Singh, V.; Benaduce, A.P.; Seal, S.; Kos, L.; Agarwal, A.(2011) Boron nitride nanotube reinforced hydroxyapatite composite: mechanical and tribological performance and in-vitro biocompatibility to osteoblasts. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 4, 44-56.
39. Zou, C.; Zhang, C.; Li, B.; Wang, S.; Xie, Z.; Song, Y.(2015) Ablation behavior of boron nitride based ceramic composites reinforced by continuous silicon oxynitride fiber. Ceramics International 41, 4768-4774.
40. Özorak, C. Bor atığı katkılı polimer kompozitlerin aşınma ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ..., 2014.
41. Lahiri, D.; Hadjikhani, A.; Zhang, C.; Xing, T.; Li, L.H.; Chen, Y.; Agarwal, A.(2013) Boron nitride nanotubes reinforced aluminum composites prepared by spark plasma sintering: Microstructure, mechanical properties and deformation behavior. Materials Science and Engineering: A 574, 149-156.
42. Luo, X.-T.; Li, C.-J.; Yang, G.-J.(2013) Correlations between milling conditions and iron contamination, microstructure and hardness of mechanically alloyed cubic BN particle reinforced NiCrAl matrix composite powders. Journal of alloys and compounds 548, 180-187.
43. Durmuş, K. Doğal taş kesici takımlarda kübik bor nitrürün (cBN) alternatif aşındırıcı olarak kullanılmasının araştırılması. Fırat Üniversitesi, 2012, 2012.
44. Gorshenkov, M.; Kaloshkin, S.; Tcherdyntsev, V.; Danilov, V.; Gulbin, V.(2012) Dry sliding friction of Al-based composites reinforced with va-

- rious boron-containing particles. *Journal of alloys and compounds* 536, S126-S129.
45. Wang, Y.; Zhang, Z.; Wang, H.; Ma, B.; Jiang, Q.(2006) Effect of Fe content in Fe–Ti–B system on fabricating TiB₂ particulate locally reinforced steel matrix composites. *Materials Science and Engineering: A* 422, 339-345.
 46. Li, D.; Zhang, C.; Li, B.; Cao, F.; Wang, S.; Li, J.(2012) Mechanical properties of unidirectional SiBN fiber reinforced boron nitride matrix composites. *Materials Letters* 68, 222-224.
 47. Yue, C.; Liu, W.; Zhang, L.; Zhang, T.; Chen, Y.(2013) Fracture toughness and toughening mechanisms in a (ZrB₂–SiC) composite reinforced with boron nitride nanotubes and boron nitride nanoplatelets. *Scripta Materialia* 68, 579-582.
 48. Lee, K.; Sim, H.; Heo, S.; Yoo, H.; Cho, S.; Kwon, H.(2002) Tensile properties and microstructures of Al composite reinforced with BN particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33, 709-715.
 49. Li, D.; Zhang, C.; Li, B.; Cao, F.; Wang, S.; Li, J.(2011) Preparation and properties of unidirectional boron nitride fibre reinforced boron nitride matrix composites via precursor infiltration and pyrolysis route. *Materials Science and Engineering: A* 528, 8169-8173.
 50. Mizuuchi, K.; Inoue, K.; Sugioka, M.; Itami, M.; Kawahara, M.; Yamauchi, I.(2006) Microstructure and mechanical properties of boron-fiber-reinforced titanium-matrix composites produced by pulsed current hot pressing (PCHP). *Materials Science and Engineering: A* 428, 175-179.
 51. Shakoor R.A., Kahraman R., Waware U., Wang Y., Gao W., (2014) Properties of electrodeposited Ni–B–Al₂O₃ composite coatings, *Material and Desing* 64, 127-135.
 52. Shahri, Z.; Allahkaram, S.; Zarebidaki, A.(2013) Electrodeposition and characterization of Co–BN (h) nanocomposite coatings. *Applied surface science* 276, 174-181.
 53. Xiaozhen, L.; Yifan, L.; Lingling, S.; Xiaowen, S.(2010) Preparation and performance of electrodeposited Ni-TiB₂-Sm₂O₃ composite coatings. *Journal of Rare Earths* 28, 97-101.
 54. Huang, Y.-C.; Lo, T.-Y.; Chao, C.-G.; Whang, W.-T.(2014) Anti-corrosion characteristics of polyimide/h-boron nitride composite films with different polymer configurations. *Surface and Coatings Technology* 260, 113-117.
 55. Yu, L.; Zhao, H.; Xu, J.(2014) Mechanical, tribological and corrosion performance of WBN composite films deposited by reactive magnetron sputtering. *Applied surface science* 315, 380-386.

Makina Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Yeni Nesil Mühendislik Çalışmaları

Editör:

Doç. Dr. Yusuf FEDAI