

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Doç.Dr.Aslıhan KURNUÇ SEYHAN

Makine Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör

Doç.Dr. Aslıhan KURNUÇ SEYHAN

yaz
yayınları

2025

Makine Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör: Doç.Dr. Aslıhan KURNUÇ SEYHAN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-88-9

Ekim 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Physical and Chemical Testing Methods for Determining the Quality of Pellet Biofuels	1
<i>Bekir DOĞAN, Ünsal AYBEK</i>	
Bandırma İklim Koşullarında Güneş Enerjili Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Performans Analizi.....	26
<i>Erhan KIRTEPE, Ramazan YILMAZ</i>	
Eriyik Yığarak Modelleme (EYM) Tekniğine Genel Bir Bakış ve Üretim Sonrası İhtiyaç Duyulan Delik Delme İşlemlerinde Karşılaşılan Sorunlar.....	54
<i>Ender EMİR</i>	
Birincil ve İkincil Enerji Kaynaklarının Küresel ve Bölgesel Sürdürülebilir Stratejileri ve Karbon Emisyonları	73
<i>Neyfel Yunus COŞKUN</i>	
Polimer Kompozitlerin Ekstrüzyon ve Enjeksiyon Üretiminde Sıcaklığın Etkileri ve Polimer Kompozitlerin Degradasyonu	100
<i>Yasin DEMİRHAN</i>	
Numerical Investigation of the Effect of Fin Thickness on Heat Exchanger Performance.....	135
<i>Harun YAKA, Harun AKKUŞ, Mehmet BALTA</i>	
Kalite İyileştirme Sürecinde Hata Türü ve Etkileri Analizi: Talaşlı İmalat Sektöründe Bir Uygulama.....	146
<i>Funda KAHRAMAN, İsmail ÇAKMAKÇI, Mehmet KÜÇÜK</i>	

Soluk Borusunun 3D Organ Basımı Yöntemiyle Üretilmesi	164
<i>Mehmet ÖZER</i>	

4D Printing Technology and Some Application Examples	193
<i>Mehmet ÖZER</i>	

Alaşım Elementlerinin Akma Gerilmesi ve Sertlik Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi	214
<i>Can GÖNENLİ, İbrahim AYDIN, Ali İhsan BAHÇEPINAR</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

PHYSICAL AND CHEMICAL TESTING METHODS FOR DETERMINING THE QUALITY OF PELLET BIOFUELS

Bekir DOĞAN¹

Ünsal AYBEK²

1. INTRODUCTION

Biomass is a potentially renewable energy source that is abundant worldwide, not only in terms of quantity but also in terms of species diversity (Ellabban et al., 2014; Babu et al., 2022). The limited reserves of fossil fuels, their environmental impacts, and their adverse role in climate change have increased interest in renewable and sustainable energy sources. In this context, biomass resources such as agricultural residues, forest products, and industrial by-products possess significant potential for environmentally friendly energy production with a low carbon footprint (He et al., 2022; Arias et al., 2008). Pellet biofuels are produced by mechanically compressing and drying various biomass feedstocks into a homogeneous and standardized solid fuel form with high energy density (Demirbaş, 2001; Kaliyan and Morey, 2009).

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, bekir.dogan@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8986-7174.

² Doktor Öğretim Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, unsal.aybek@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3573-9385.

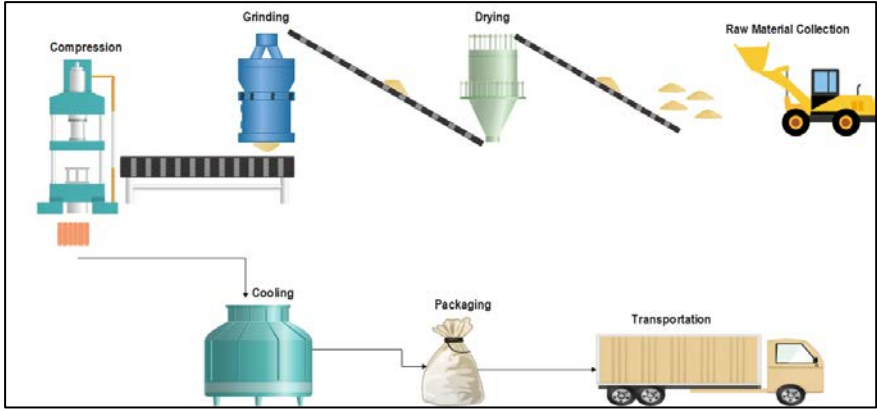


Figure 1. Schematic representation of the pellet biofuel production process

Source: Created by the author

Utilizing solid biofuels in pellet form offers significant advantages in terms of both logistics and combustion efficiency. The commercial value and utilization potential of pellet biofuels are largely determined by their level of compliance with relevant quality standards (Kamperidou, 2022). These quality parameters directly influence performance indicators such as combustion efficiency, emission profile, and durability during storage and transportation. Therefore, testing the physical, chemical, and mechanical properties of pellets in accordance with national (TS) and international (EN, ISO) standards is of critical importance for both producers and end-users. The information on pellet standards available in the literature is presented in Table 1.

Table 1. Pellet parameters and standards

Class Feature Analysis Method	Units	A1	A2	B
Source and origin, ISO 17225-1		1- Wood straw 2- Chemically untreated wood waste	1- Whole trees without roots 2- Wood stalks 3- Lumbering waste 4- Tree bark (from industrial processes) 5- Chemically untreated wood waste	1- Forests, plant cultivation, and other pure wood 2- Wood processing industry waste and by-products 3- Used wood
Diameter (D), length (L)	(mm)	D06, 6 ± 1 ; $3.15 \leq L \leq 40$ D08, 8 ± 1 ; $3.15 \leq L \leq 40$	D06, 6 ± 1 ; $3.15 \leq L \leq 40$ D08, 8 ± 1 ; $3.15 \leq L \leq 40$	D06, 6 ± 1 ; $3.15 \leq L \leq 40$ D08, 8 ± 1 ; $3.15 \leq L \leq 40$
Moisture content M _w	(w-%)	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
Ash content A _w	(w-%) kuru	A0.7 $\leq 0,7$	A1.5 $\leq 1,5$	A3.0 $\leq 3,0$
Mechanical durability	(w-%)	DU97.5 ≥ 97.5	DU97.5 ≥ 97.5	DU96.5 ≥ 96.5
Calorific value Q _w	Mj/kg kWh/kg	Q16.5, $16.5 \leq Q \leq 19$ Q4.6, $4.6 \leq Q \leq 5.3$	Q16.3, $16.3 \leq Q \leq 19$ Q4.5, $4.5 \leq Q \leq 5.3$	Q16.0, $16.0 \leq Q \leq 19$ Q4.4, $4.4 \leq Q \leq 5.3$
Bulk density	(kg/ m ³)	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600

Source: García-Maraver et al. 2011

The determination of quality parameters affects not only the product's performance but also its environmental impact, compatibility with boiler systems, and suitability for international trade. Therefore, the physical and chemical properties of pellets must be analyzed using accurate, reliable, and reproducible methods (Serrano et al., 2011). Physical tests determine fundamental characteristics such as density, moisture content, and ash content, providing insights into the fuel's energy density and storage behavior. Chemical tests, particularly the measurement of higher heating value as well as carbon, hydrogen, nitrogen, and sulfur contents, reveal the fuel's combustion characteristics and emission potential. Mechanical tests, on the other hand, assess the pellet's ability to maintain its integrity during transportation,

storage, and feeding into combustion systems (Shankar et al., 2011).

In this context, the quality assessment of pellet biofuels is an indispensable step for detecting potential errors in the production process, ensuring product standardization, and enhancing end-user satisfaction. This chapter will provide a detailed examination of the physical, chemical, and mechanical testing methods used to determine the quality of pellet biofuels.

2. DETERMINATION OF PHYSICAL PROPERTIES

2.1. Determination of Moisture Content

The moisture content of pellet biofuels is a critical quality parameter affecting both combustion efficiency and storage stability. High moisture levels result in a significant portion of the combustion energy being consumed for water vaporization, thereby reducing the net energy yield (Samuelsson et al., 2012). Furthermore, elevated moisture promotes microbial degradation, mold formation, and chemical deterioration, leading to quality loss during long-term storage. Therefore, determining the moisture content is a primary step in pellet quality control processes (Ungureanu et al., 2018).

The moisture content determination is commonly performed using the oven-drying method as defined in the TS EN ISO 18134-1 and ASTM E871-82 standards. In this method, a homogenized pellet sample is weighed precisely using an analytical balance and dried in an oven at 105 ± 2 °C until a constant weight is achieved. The drying process ensures the removal of both free and bound water within the pellet. Subsequently, the sample is weighed again, and the moisture

content is calculated based on the mass loss using the following formula:

$$\text{Moisture Content(\%)} = \frac{m_{\text{initial}} - m_{\text{dry}}}{m_{\text{initial}}} \times 100$$

(1)

In Equation 1, m_{initial} and m_{dry} represent the pellet weight before and after drying, respectively, measured in grams. As shown in Table 1, the European Pellet Council has established three different standards within the scope of pellet quality: ENplus-A1, ENplus-A2, and EN-B classes. According to all these standards, the moisture content of pellets should not exceed 10% (Bilgin et al., 2015). Exceeding this limit reduces the energy density of the pellet and increases the risk of deterioration during transportation and storage. Literature reports indicate that pellets with low moisture content exhibit higher combustion efficiency and longer storage life.

2.2. Determination of Ash Content

Ash content refers to the percentage of inorganic mineral residues remaining after the combustion of pellet biofuels. The ash level is critically important for fuel cleanliness, boiler maintenance frequency, and environmental emissions. High ash content increases slag formation in combustion systems and leads to deposition and clogging on heat transfer surfaces. Therefore, low ash content is considered a key quality indicator, particularly for pellets intended for residential heating purposes.

Ash content determination is based on the combustion of a specified mass of biofuel sample at 550 ± 10 °C until a constant weight is achieved, as defined in the TS EN ISO 18122 standard. The percentage of the remaining mineral residue after combustion is calculated as the ash content. As shown in Table 1, according to pellet standards, the ash content limits are specified as $\leq 0.7\%$

for ENplus-A1, $\leq 1.5\%$ for ENplus-A2, and $\leq 2.0\%$ for EN-B classes.

2.3. Density Measurements

The density of pellet biofuels is a critical parameter in terms of the fuel's energy density, storage capacity, and transportation costs. Higher density allows for greater energy storage and transport efficiency, while also enabling a consistent fuel feed in combustion systems (Demirbaş, 2007). Density measurements are generally classified into two main categories: particle density and bulk density.

2.3.1. Particle Density

Particle density is defined as the ratio of the mass of a single pellet to its volume and is used to evaluate the pellet's compression quality and raw material characteristics. A single pellet is weighed using a precision balance. The pellet's diameter and length are measured with a caliper to calculate its cylindrical volume. The particle density is then calculated by dividing the pellet's mass by its volume, expressed in kg/m^3 , using the following equations (Adapa et al., 2006; McMullen et al., 2004).

$$V_u = \frac{\pi d^2 l}{4} \quad (2)$$

$$\rho_u = m_u / V_u \quad (3)$$

In the equation:

V_u : Volume of a single pellet (m^3);

d : Pellet diameter (m);

l : Pellet length (m);

ρ_u : Particle density of the pellet (kg/m^3)

m_u : Mass of a single pellet (kg)

A high particle density indicates that the pellet has strong mechanical durability and that the pressing process was effectively performed. Conversely, low density increases the risk of brittleness and crumbling.

2.3.2. Bulk Density

Bulk density is defined as the ratio of the total mass of pellets contained within a specific volume to that volume, playing a crucial role in determining storage and transportation efficiency. Bulk density is measured by filling a 5 L container (153 mm diameter × 272 mm height) with pellets dropped from a height of approximately 200–300 mm to form a conical pile. The container is then freely dropped three times from a height of about 150 mm onto a hard surface. Subsequently, excess pellets above the container's rim are leveled using a flat, elongated wooden tool, and larger voids at the top are filled accordingly (Yıldız and Topkoç, 2023).

The bulk density of the pellets (kg/m^3) was calculated using the following equation.

$$\rho_{hy} = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (4)$$

In the equation:

ρ_{hy} : Bulk density of the pellets (kg/m^3);

m_1 : Weight of the empty container (kg);

m_2 : Weight of the container filled with pellets (kg);

V : Net volume of the container (m^3)



Figure 2. Procedure for Determining Pellet Bulk Density

Source: Created by the author

Lower bulk densities result in reduced energy efficiency during storage and transportation. As shown in Table 1, all pellet standards specify that the bulk density of pellets should be at least 600 kg/m³.

2.4. Dimensional and Shape Controls

Appropriate pellet dimensions and a smooth surface structure indicate that the pressing parameters during the production process have been correctly applied and that the pellet quality is high. Pellets with non-standard dimensions or surface defects may cause performance losses, mechanical problems, and feeding system blockages in combustion systems (Nussbaumer, 2003). Therefore, dimensional and shape controls are among the fundamental tests for determining the quality of pellet biofuels.

As shown in Table 1, pellet dimension standards are typically based on diameters of 6 mm or 8 mm, with pellet lengths varying between 3.15 mm and 40 mm. Pellets produced within these limits provide optimal performance in terms of mechanical durability and combustion efficiency.

2.5. Moisture Uptake Resistance Test

The hygroscopic properties of pellet biofuels, namely their capacity to absorb ambient moisture, are critically important for the fuel's durability during storage and usage. In this context,

moisture uptake resistance, equilibrium moisture content, and water resistance tests are conducted to assess the risk of deterioration, particularly under humid or open storage conditions.

The moisture uptake resistance test is conducted by exposing pellets to controlled humidity environments for a specified duration (Liu et al., 2013). For this purpose, the moisture absorption behavior of pellets is examined using a climate chamber. In the test, pellet samples each weighing 300 g are conditioned within the chamber at three different temperature levels (15°C, 25°C, and $40 \pm 2^\circ\text{C}$) and three different relative humidity levels (45%, 60%, and $80 \pm 5\%$). During the conditioning period, pellet samples are removed from the chamber hourly, weighed, and their mass changes recorded. The test continues until the hourly mass variation falls below 0.01 grams. This method allows for the determination of the pellets' moisture retention capacity and equilibrium time under specified environmental conditions (Fasina, 2008).

3. DETERMINATION OF CHEMICAL PROPERTIES

3.1. Determination of Higher Heating Value (HHV)

The Higher Heating Value (HHV) represents the total amount of energy released per unit mass of biofuel upon complete combustion. Since HHV includes the latent heat of condensation of water vapor produced during combustion, it is considered a comprehensive indicator of the fuel's energy potential. This parameter serves as a fundamental criterion for comparing different types of biomass and assessing energy efficiency.

Equipment such as the calorimeter devices illustrated in Figure 3 are used to determine the heating values of pellets. These

devices measure both the Lower Heating Value (LHV) and Higher Heating Value (HHV) of solid and liquid fuels. Consequently, they provide critical data regarding the energy content and combustion performance of pellets. As an example, Figure 3 presents a bomb calorimeter device obtained from the official website of the Central Research Laboratory (ÇANKAM) of Çankırı Karatekin University.



Figure 3. Calorimeter Device

Source: Çankırı Karatekin University, Central Research Laboratory (ÇANKAM) website, <https://cankam.karatekin.edu.tr/tr/bomba-kalorimetre-22780-sayfasi.karatekin> (Accessed: 11 August 2025).

The most commonly used method for determining HHV involves first grinding the sample to a uniform particle size. The homogenized sample is then weighed precisely and placed into a high-pressure resistant bomb calorimeter capsule. After the capsule is pressurized with oxygen and sealed, it is inserted into the calorimeter system. The increase in temperature of the purified water surrounding the calorimeter indirectly indicates the heat released during the complete combustion of the sample. This heat value is then normalized by the sample mass to calculate the HHV in MJ/kg (Yıldız and Topkoç, 2023). As shown in Table 1, heating value criteria are also included within pellet quality standards.

- For ENplus-A1 class pellets, the heating value range is specified as $16.5 \text{ MJ/kg} \leq Q \leq 19 \text{ MJ/kg}$.
- For ENplus-A2 class pellets, the range is $16.3 \text{ MJ/kg} \leq Q \leq 19 \text{ MJ/kg}$.
- For EN-B class pellets, the heating value is specified as $16 \text{ MJ/kg} \leq Q \leq 19 \text{ MJ/kg}$.

3.2. Combustion Gas Analysis

The composition of gases released during the combustion of pellet biofuels plays a critical role in evaluating both energy efficiency and environmental impacts. Specifically, the measurement of SO_2 , CO, CO_2 , O_2 , and NO_x emissions provides direct insights into fuel quality and combustion conditions (Arranz et al., 2015).

Combustion gas analysis is conducted by measuring the flue gases of pellets burned under standard conditions using portable or stationary flue gas analyzers. During combustion in laboratory-scale furnaces, stoves, or boilers, flue gas samples are collected with the device, and the following parameters are determined:

- SO_2 (Sulfur Dioxide): Related to the sulfur content in the pellet raw material and may increase particularly in pellets derived from agricultural residues. It is generally low in wood-based pellets.
- CO (Carbon Monoxide): An important indicator of combustion efficiency. High CO levels indicate incomplete combustion and insufficient air supply. Maintaining low CO emissions ($\leq 300 \text{ mg/Nm}^3$) is desirable.

- CO₂ (Carbon Dioxide): Indicates complete combustion and is directly proportional to the carbon content of the fuel. Typically expected to be between 12% and 16%.
- O₂ (Oxygen): Used for adjusting and controlling combustion air.
- NO_x (Nitrogen Oxides): Increase with high combustion temperatures and the nitrogen content of the pellet; these are environmentally critical emissions that require monitoring (Arranz et al., 2015).

Measurement results are typically reported in parts per million (ppm) or volumetric percentage (%). Combustion gas analyses are utilized not only for monitoring compliance with environmental regulations but also for optimizing combustion efficiency and improving fuel quality.

3.3. Elemental Analysis (C, H, N, O, S)

Elemental analysis of pellet biofuels, conducted to determine their fundamental chemical composition, quantifies the proportions of carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N), oxygen (O), and sulfur (S). This analysis plays a critical role in predicting fuel combustion behavior, heating value, and environmental impacts. It provides essential data for estimating potential emission levels of gases such as CO₂, NO_x, and SO₂.

Elemental analysis is typically performed using a CHNS-O analyzer (Brewer et al., 2009). In this device, the sample is first ground to a specific particle size and homogenized. It is then combusted completely in an oxygen-rich atmosphere at approximately 900–1000 °C. The gases released during combustion (CO₂, H₂O, NO_x, SO₂) are carried by a carrier gas to detectors, and the elemental proportions are determined using gas chromatography or infrared detectors. The oxygen content is generally calculated by the difference method as follows:

$$O\% = 100 - (C\% + H\% + N\% + S\% + kül\%) \quad (5)$$

The general evaluation of elemental analysis results is as follows:

- Carbon (C): Directly correlated with energy content; typically ranges between 45% and 50% in wood-based pellets.
- Hydrogen (H): Contributes to water vapor formation during combustion; levels between 5% and 6% are considered normal.
- Nitrogen (N): High nitrogen content increases NO_x emissions; usually found between 0.1% and 0.5% in wood pellets.
- Sulfur (S): Influences SO₂ emissions; generally below 0.05% in wood-based pellets but can be higher in agricultural residues.
- Oxygen (O): Plays an oxidation role during combustion; typically detected within the range of 38% to 45% (Brewer et al., 2009).

Elemental analysis data are also utilized for estimating the fuel's energy potential through empirical formulas, such as the Dulong formula, during higher heating value calculations.

3.4. Total Nitrogen and Protein Calculation

The determination of total nitrogen content in the chemical analysis of pellet biofuels is of significant importance for evaluating the fuel's combustion behavior and environmental impacts. Nitrogen compounds are critical parameters to control in reducing environmental pollution, as they are the primary sources of NO_x (nitrogen oxides) emissions formed during combustion. Accordingly, the total nitrogen content in pellets is determined in accordance with the TS EN ISO 16948 standard, titled "Solid

biofuels — Determination of total carbon, hydrogen, and nitrogen.”

Total nitrogen content is essential not only for assessing the environmental performance of the fuel but also for optimizing combustion efficiency. Elevated nitrogen levels increase NO_x emissions during combustion, adversely affecting air quality and potentially causing exceedances of regulatory limits (Aktaş, 2022). Therefore, careful monitoring of nitrogen content is necessary throughout the selection of raw materials, processing, and quality control stages in pellet production. Additionally, in plant-based biomass, total nitrogen content can be used to estimate protein levels. Determining protein content aids in predicting potential nitrogen oxide gas emissions during combustion, thereby facilitating the development of strategies to minimize environmental impacts.

3.4.1. Methods for Determination of Total Nitrogen

The two most commonly used methods for determining the total nitrogen content in pellet biofuels are the Kjeldahl and Dumas (combustion) methods. Both techniques are based on different principles and exhibit distinct advantages and disadvantages.

Kjeldahl Method: This method is based on the digestion of organic nitrogen compounds in concentrated sulfuric acid (H₂SO₄) in the presence of suitable catalysts (e.g., Se, Hg, or Cu) at high temperatures. As a result of the digestion, nitrogen is converted and collected in solution as ammonium sulfate. Subsequently, ammonia (NH₃) is released under alkaline conditions and absorbed in a boric acid solution. The amount of ammonia produced is determined by titration with a standard acid solution. The Kjeldahl method provides high accuracy and reliable results, especially for organic materials; however, it has

disadvantages such as a lengthy analysis time and the generation of chemical waste (Patel et al., 2012).

Dumas (Combustion) Method: The Dumas method is based on the combustion of the sample at approximately 900–1000 °C in an oxygen-rich atmosphere. During combustion, nitrogen oxides are reduced to molecular nitrogen (N₂), which is then measured using a thermal conductivity detector (TCD) (Patel et al., 2012). This method offers advantages such as rapid analysis time and no requirement for chemical reagents; however, the high cost of equipment can be a drawback. Both methods are widely used in industry and academic research for the reliable determination of total nitrogen content in pellets.

3.4.2. Protein Calculation

The total nitrogen content determined in plant-based biofuel feedstocks can also be used to estimate protein content. The protein percentage is calculated by multiplying the total nitrogen percentage by an appropriate conversion factor (F):

$$\text{Protein(\%)} = \text{Total Nitrogen(\%)} \times F$$

(6)

In food and feed analyses, a conversion factor of F=6,25 is generally accepted. However, in the biofuel sector, this value may vary depending on the type of raw material used. For example:

- For cereal and straw-based biomass: 6.25
- For legumes: 5.70
- For certain oilseeds: 5.30

Although protein content does not directly affect the energy value of the fuel, it serves as an important indicator for predicting the amount of nitrogen oxides (NO_x) that may be released during combustion. Therefore, protein estimation in

biofuels assists in controlling nitrogen-related emissions during environmental performance assessments (Mariotti et al., 2008).

4. DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical properties of pellet biofuels are critically important to ensure that the fuel does not suffer quality degradation during post-production handling, storage, and feeding into combustion systems. Pellets with low mechanical durability tend to break apart during transportation and storage, leading to dust formation. This not only reduces combustion efficiency but also increases dust emissions, causing adverse environmental and health effects.

The most commonly used parameters for determining mechanical properties are mechanical durability, hardness, and fracture resistance tests. These tests are conducted according to methods defined in TS EN ISO standards.

4.1. Mechanical Durability

Mechanical durability is defined as the resistance of pellets to mechanical stresses such as impact, friction, and vibration encountered during transportation, storage, and use. This property is a key indicator of pellet quality and directly influences the efficiency of fuel utilization.

The mechanical durability test is conducted in accordance with the TS EN ISO 17831-1 standard, titled “Solid Biofuels – Determination of Mechanical Durability – Part 1: Pellets.” In this test, a specified mass of pellets is placed inside a steel drum, which is rotated at a predetermined speed. During rotation, the pellets collide with each other and the drum surface, causing mechanical abrasion and fragmentation. At the end of the test, the

mass of intact pellets remaining is measured to calculate the mechanical durability ratio.

The durability resistance of pellets is calculated as a percentage (%) using the following equation (Wilson, 2010).

$$D_d = \frac{m_A}{m_E} \times 100 \quad (7)$$

In the equation:

D_d : Pellet durability resistance (%);

m_E : Weight of pellets sieved before the test (g);

m_A : Weight of pellets sieved after the test (g)



Figure 4. Mechanical durability testing apparatus and cage dimensions

Source: Kamperidou, 2022; TS EN ISO 17831-1

The standards specify the required durability resistance for pellets, with ENplus-A1 and ENplus-A2 class pellets requiring a minimum durability of 97.5%, and EN-B class pellets requiring at least 96.5%, as presented in Table 1.

4.2. Hardness

Hardness is defined as the resistance of a single pellet to breakage under a specified compressive force. Pellet hardness is a critical mechanical property that influences the durability of the fuel during transportation, storage, and feeding processes

(Kaliyan and Morey, 2009). In hardness measurement, a gradually increasing and controlled force is applied to the pellet surface, and the force (measured in Newtons) at the moment of pellet fracture is recorded. This provides a quantitative measure of the pellet's mechanical strength.

Pellets with high hardness values exhibit greater resistance to breakage during transportation and storage. However, excessively hard pellets may cause blockages or irregular fuel flow in feeding systems. Therefore, maintaining hardness within an optimal range is essential for ensuring pellet performance.

4.3. Impact Resistance

Impact resistance refers to the ability of pellets to withstand fragmentation caused by mechanical shocks such as free fall or sudden impact. This property is important for minimizing the risk of mechanical damage during transportation and storage. The impact resistance test is typically performed by dropping a pellet sample from a specified height (commonly 2–3 meters) onto a hard surface. The percentage of pellets remaining intact after the drop is measured to calculate the impact resistance. This method reflects the practical durability performance of the pellets during handling (Wilson, 2010).

4.4. Importance of Mechanical Properties

Low mechanical properties of pellet biofuels lead to various adverse consequences during both production and usage stages. Particularly, pellets with weak mechanical durability tend to generate increased amounts of dust during transportation and storage. This elevated dust content not only reduces combustion efficiency but also poses serious safety hazards such as dust explosions. Moreover, pellets with poor mechanical characteristics negatively impact user satisfaction by causing breakage during handling, volume loss in storage, and blockages

in fuel feeding systems. Therefore, tests for mechanical durability, hardness, and impact resistance are considered indispensable components of quality control in pellet production. Mechanical testing conducted post-production ensures compliance with standards, thereby enhancing fuel performance and safety. Consequently, these measures contribute to sustainability and efficiency within the biofuel industry.

5. STANDARDS AND COMPLIANCE

The production, quality control, and utilization of pellet biofuels are rigorously regulated within the framework of both national and international standards. These standards establish limit values for the physical, chemical, and mechanical properties of pellets, ensuring consistent and reliable product quality. Consequently, consumer safety, fuel efficiency, and environmental compliance are guaranteed. The most fundamental and comprehensive reference document for pellet biofuels in Turkey is the TS EN ISO 17225 series. This set of standards defines in detail the quality classes, test methods, and acceptance criteria for pellets produced from various biomass sources. TS EN ISO 17225 includes separate sections for wood and agricultural residue pellets and classifies pellets based on parameters such as energy content, ash content, moisture level, and mechanical durability.

At the international level, standards established by organizations such as ISO, ASTM, and EN are widely employed in the production and evaluation of pellets. These standards facilitate global market acceptance of products and promote the sustainable use of biofuels. Consequently, compliance with standards in the pellet biofuel sector is of critical importance for enhancing product quality, reducing environmental impacts, and gaining a competitive advantage in the marketplace.

6. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

To ensure the quality and efficient use of pellet biofuels, it is essential to conduct physical, chemical, and mechanical tests during and after the production process. Producing high-quality pellets is particularly achievable through the control of the following critical parameters:

- **Moisture Content:** Directly affects storage stability and combustion efficiency; a moisture level below 10% is recommended.
- **Ash and Mineral Content:** Should be kept low to protect combustion systems and minimize environmental impact.
- **Mechanical Durability and Hardness:** High mechanical strength is essential to maintain pellet integrity during transportation, storage, and feeding processes.
- **Heating Value:** Higher and lower heating values are key indicators of the fuel's energy potential and overall quality.
- **Chemical Composition:** Elements such as nitrogen, sulfur, and chlorine must be controlled within specified limits to ensure environmental compliance and combustion efficiency.

Regular monitoring and analysis of test results obtained during the production process constitute a fundamental component of quality control. Through this approach, raw material selection, pressing conditions, and storage methods can be optimized, enabling continuous improvement of product quality.

Recommendations:

- Pellet producers should adopt the TS EN ISO 17225 series standards as a guiding framework.

- Production and quality control laboratories must be equipped with accredited and up-to-date instruments.
- Storage conditions should be properly managed, ensuring effective moisture and temperature control.
- The appropriate pellet class should be selected for combustion systems, and quality tests must be conducted prior to use.
- Research and development activities should be intensified to investigate the effects of new raw material combinations and binders.

In conclusion, the production and use of high-quality pellets contribute to sustainable energy goals, offer economic benefits, and reduce environmental burdens.

KAYNAKLAR

- Adapa, P. K., Singh, A. K., Schoenau, G. J., & Tabil, L. G. (2006). Pellet hardness-pelleting characteristics of fractionated alfalfa grinds: Hardness models. *Powder Handling and Processing*, 18(5), 294-299.
- Aktaş, T. (2022). Türkiye’de imal edilen odun pelet örneklerinin kalite özelliklerinin ve standartlara uygunluğunun belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 18(1), 25-40.
- Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M. G., Rubiera, F., & Pis, J. J. (2008). Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel processing technology*, 89(2), 169-175.
- Arranz, J. I., Miranda, M. T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., & Rojas, C. V. (2015). Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe. *Fuel*, 142, 199-207.
- Babu, S., Rathore, S. S., Singh, R., Kumar, S., Singh, V. K., Yadav, S. K., ... & Wani, O. A. (2022). Exploring agricultural waste biomass for energy, food and feed production and pollution mitigation: A review. *Bioresource Technology*, 360, 127566.
- Bilgin, S., Yılmaz, H., Koçer, A., Acar, M., & Dok, M. (2015). Fındık zırufunun peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11(3), 265-273.
- Brewer, C. E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J. A., & Brown, R. C. (2009). Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental progress & sustainable energy: an Official Publication of the*

American Institute of Chemical Engineers, 28(3), 386-396.

Çankırı Karatekin University, Central Research Laboratory (ÇANKAM) website, <https://cankam.karatekin.edu.tr/tr/bomba-kalorimetre-22780-sayfasi.karatekin> (Accessed: 11 August 2025).

Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy conversion and Management*, 42(11), 1357-1378.

Demirbas, A. (2007). Progress and recent trends in biofuels. *Progress in energy and combustion science*, 33(1), 1-18.

Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 748-764.

Fasina, O. O. (2008). Physical properties of peanut hull pellets. *Bioresource technology*, 99(5), 1259-1266.

García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537-3540.

He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., & Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. *Biomass and Bioenergy*, 186, 107271.

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass. *Biosystems engineering*, 104(1), 47-63.

- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 337-359.
- Kamperidou, V. (2022). Quality analysis of commercially available wood pellets and correlations between pellets characteristics. *Energies*, 15(8), 2865.
- Liu, X., Liu, Z., Fei, B., Cai, Z., Jiang, Z., & Liu, X. E. (2013). Comparative properties of bamboo and rice straw pellets. *BioResources, Volume 8, Number 1, 2013; pp. 638-647.*, 8(1), 638-647.
- Mariotti, F., Tomé, D., & Mirand, P. P. (2008). Converting nitrogen into protein—beyond 6.25 and Jones' factors. *Critical reviews in food science and nutrition*, 48(2), 177-184.
- McMullen, J., Fasina, O., Wood, W., Feng, Y., & Mills, G. (2004). Physical characteristics of pellets from poultry litter. In *2004 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & fuels*, 17(6), 1510-1521.
- Samuelsson, R., Larsson, S. H., Thyrel, M., & Lestander, T. A. (2012). Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied energy*, 99, 109-115.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., & Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel processing technology*, 92(3), 699-706.

- Shankar Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 7(5), 384-401.
- Ungureanu, N., Vladut, V., Voicu, G., Dinca, M. N., & Zabava, B. S. (2018). Influence of biomass moisture content on pellet properties–review. *Eng. Rural Dev*, 17, 1876-1883.
- Wilson, T. O. (2010). Factors affecting wood pellet durability.
- Yıldız, Z., & Topkoç, E. (2023). Tarımsal atıklardan elde edilen biyopeletlerin bazı yakıt özelliklerinin uluslararası pelet standartları ile karşılaştırılması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 24(2), 1-9.

BANDIRMA İKLİM KOŞULLARINDA GÜNEŞ ENERJİLİ ABSORPSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ¹

Erhan KIRTEPE²

Ramazan YILMAZ³

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, küresel ısınma ve fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi, enerji sektöründe yenilenebilir kaynaklara yönelimi zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, çevre dostu, sürdürülebilir ve yerel erişilebilirliği yüksek bir kaynak olan güneş enerjisi, özellikle soğutma uygulamalarında fosil yakıt bağımlılığını azaltma ve sıfır emisyon hedeflerine katkı sağlama potansiyeli ile ön plana çıkmaktadır. Türkiye'nin enerji tüketiminde soğutma ihtiyacının önemli bir paya sahip olması, bu alandaki güneş enerjili sistem çalışmalarını stratejik açıdan daha da önemli hale getirmektedir.

Güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemleri (GEASS), farklı iklim koşulları, kolektör tipleri ve akışkan çiftleri ile yapılan çalışmalarda yüksek verimlilik ve çevresel avantajlar sunmaktadır (Mazloumi, Naghashzadegan & Javaherdeh, 2008; Bellos, Tzivanidis, Pavlovic & Stefanovic,

¹ Bu çalışma, Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: BAP-24-1004-001

² Dr. Öğr. Üyesi, Şirnak Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, erhan.kirtepe@sirnak.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1824-2599.

³ Öğr. Gör. Dr., Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, ryilmaz@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6275-7197.

2017; Asadi, Amani, Amani, Kasaeian & Bahiraei, 2018). Literatürde, LiBr-H₂O ve LiCl-H₂O gibi yaygın akışkan çiftlerinin karşılaştırıldığı (Bellos & Tzivanidis, 2017; Bellos & Tzivanidis, 2018a; Bellos, Tzivanidis & Antonopoulos, 2016; Bellos, Tzivanidis, Symeou & Antonopoulos, 2017; Bellos & Tzivanidis, 2018b), NH₃-H₂O kullanılan sistemlerde kolektör tipine bağlı ekonomik optimizasyonların yapıldığı (Asadi & ark., 2018; Gogoi & Saikia, 2019) ve nanoakışkan katkılarının performans artışı sağladığı (Bellos & Tzivanidis, 2018b; Kırtepe, 2024) bulgularına ulaşılmıştır. Ayrıca, tek ve çift kademeli sistemlerin karşılaştırmalı performans değerlendirmeleri (Ma ve ark., 2022; De & Ganguly, 2020; Zheng ve ark., 2019; Li ve ark., 2022) ve finansal analizleri (Bellos ve ark., 2017; Lubis ve ark., 2016) de yapılmıştır. Ancak, literatürde Bandırma gibi yerel iklim koşullarına özgü detaylı bir termodinamik analiz çalışmasına rastlanmamaktadır.

Bu kitap bölümünde, Bandırma iklim koşullarında tek kademeli bir GEASS'ın performans analizi yapılmaktadır. Çalışmada seçilen kolektör tipleri ve akışkan çiftleri kullanılarak sistemin termodinamik parametreleri hesaplanmış; güneş ışınlı ve sıcaklık verileri esas alınarak saatlik performans katsayısı (COP) değerleri belirlenmiştir. Böylece, bölgesel verilerle desteklenen hesaplamalar sayesinde GEASS'ın tasarım, performans ve uygulanabilirliği ortaya konmuştur.

Güneş ışınlı, açık gökyüzü modeli kullanılarak saatlik bazda hesaplanmış; sıcaklık, bağıl nem ve rüzgâr hızı verileri ise Bandırma Meteoroloji İstasyonu'ndan temin edilmiştir (Anonim, 2025a). Bu veriler ile kolektörlerden gün boyunca elde edilen ısı enerjisi miktarı belirlenmiştir.

Sistemin tüm ana bileşenleri (generatör, yoğunlaştırıcı, buharlaştırıcı, absorber, çözelti pompası, çözelti ısı değiştiricisi ve kısılma vanaları) için enerji ve kütle denklemleri

uygulanmıştır. Analizler, yaz aylarını temsil eden seçili günlerde, 09:00–16:00 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir.

Tüm hesaplamalar Engineering Equation Solver (EES) yazılımı ile yapılmıştır. Ayrıca, sistem parametrelerinin COP üzerindeki etkileri, robust ANOVA yöntemi ile Jamovi yazılımında istatistiksel olarak analiz edilmiştir (The jamovi project, 2024).

2. GÜNEŞ ENERJİLİ ABSORPSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMİNİN (GEASS) TEORİK MODELİ

Güneş Enerjili Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi (GEASS) Şekil 1’de görüldüğü üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar güneşten gelen ısı enerjisinin elde edilmesi için kullanılan kolektör, elde edilen ısı enerjisinin aktarılması için ısıl enerji depolama tankı ve mekânın soğutulması için kullanılan absorpsiyonlu soğutma sistemi (ASS). Aşağıda GEASS teorik modelin ayrıntıları açıklanmıştır. Çalışma kapsamında 4 farklı kolektör tipi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

2.1. Kolektörler

Düz plakalı kolektör (FPC) ısıl verimi Eşitlik 1, vakum tüplü kolektör (ETC) ısıl verimi Eşitlik 2, bileşik parabolik kolektör (CPC) ısıl verimi Eşitlik 3, parabolik oluk tipi kolektör (PTC) ısıl verimi Eşitlik 4 ile hesaplanmıştır (Asadi ve ark., 2018; Kalogirou, 2004).

$$\eta_{isl,FPC} = 0,75 - 5 \cdot \left(\frac{T_{f,i} - T_{amb}}{I_{FPC}} \right) \quad (1)$$

$$\eta_{isl,ETC} = 0,82 - 2,19 \cdot \left(\frac{T_{f,i} - T_{amb}}{I_{ETC}} \right) \quad (2)$$

$$\eta_{isl,CPC} = 0,70 - 3,4 \cdot \left(\frac{T_{f,i} - T_{amb}}{I_{CPC}} \right) \quad (3)$$

$$\eta_{isl,PTC} = 0,762 - 0,2125 \cdot \left(\frac{T_{f,i} - T_{amb}}{I_{PTC}} \right) - 0,001672 \left(\frac{(T_{f,i} - T_{amb})^2}{I_{PTC}} \right) \quad (4)$$

2.2. Isıl Enerji Depolama Tankı

Kolektörde elde edilen yararlı ısı, ısıl enerji depolama tankına aktarılmaktadır. Kolektörde ve ısıl enerji depolama tankında ısı transfer akışkanı olarak Syltherm 800 kullanılmıştır. Bu tankta depolanan enerji ASS'yi çalıştırmak için kullanılmıştır. Isıl enerji depolama tankı için oluşturulan enerji dengesi Eşitlik 5 ile gösterilmektedir. (Bellos & Tzivanidis, 2018b; Bellos & Tzivanidis, 2017). Kolektör ile elde edilen yararlı ısının tankta bulunan akışkana karışmadan tümüyle aktarıldığını dikkate almak, sürekli koşullarda yapılan analizler için uygundur (Bellos & Tzivanidis, 2018b; Bellos & Tzivanidis, 2017). Sürekli koşullarda yapılan analizler için tankta depolanan ısıl enerji ($\dot{Q}_{depolanan}$) sifıra eşit olur ve bu durum göz önüne alınırsa Eşitlik 6 elde edilir. Bu eşitlikte gösterilen $(UA)_{k-t}$ değeri 10 kW/K olarak alınmıştır (Bellos & Tzivanidis, 2018b; Bellos & Tzivanidis, 2017). Tanktan olan ısı kaybı Eşitlik 7 ile hesaplanmıştır (Bellos & Tzivanidis, 2018b; Bellos & Tzivanidis, 2017). Bu eşitlikte gösterilen U_t değeri 0,5 W/m²K olarak alınmıştır (Bellos & Tzivanidis, 2018b; Bellos & Tzivanidis, 2017). Tankın yüzey alanı Eşitlik 8 ile bulunabilir.

$$\dot{Q}_{depolanan} = \dot{Q}_u - \dot{Q}_{t,kayıp} - \dot{m}_{gen} c_p (T_{gen,g} - T_{gen,\varsigma}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_u = (UA)_{k-t} \cdot \frac{(T_{k,\varsigma} - T_{k,g})}{\ln \left[\frac{T_{k,\varsigma} - T_t}{T_{k,g} - T_t} \right]} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{t,kayıp} = U_t A_t (T_t - T_a) \quad (7)$$

Tablo 1. Kütle ve enerji eşitlikleri.

Bileşen	Kütle Dengesi	Eş. No	Enerji Dengesi	Eş. No
Absorber	$\dot{m}_5$			
	$= \dot{m}_4 + \dot{m}_{10}$	(9)	$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_4h_4$	(20)
	$X_5\dot{m}_5$	(10)	$- \dot{m}_5h_5$	
Isı Değiştirici	$= X_{10}\dot{m}_{10}$			
	$\dot{m}_7 = \dot{m}_6$	(11)	$\eta_{ld} = \frac{h_8 - h_9}{h_8 - h_6}$	(21)
	$\dot{m}_9 = \dot{m}_8$	(12)		
Generatör	$\dot{m}_7$	(13)	$\dot{Q}_{gen} = \dot{m}_1h_1 + \dot{m}_8h_8$	(22)
	$= \dot{m}_8 + \dot{m}_1$	(14)	$- \dot{m}_7h_7$	
	$X_7\dot{m}_7 = X_8\dot{m}_8$			
Yoğusturucu	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$	(15)	$\dot{Q}_{yoğ} = \dot{m}_1(h_1 - h_2)$	(23)
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_4 = \dot{m}_3$	(16)	$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$	(24)
Genleşme	$\dot{m}_3 = \dot{m}_2$	(17)	$h_3 = h_2$	(25)
valfleri	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_9$	(18)	$h_{10} = h_9$	(26)
Çözültü Pompası	$\dot{m}_6 = \dot{m}_5$	(19)	$h_6 = h_5 + \dot{W}_p \approx h_5$	(27)

2.4. Verim Hesaplamaları

ASS'nin etkinlik katsayısı ve GEASS'nin etkinlik katsayısı sırasıyla Eşitlik 28 ve 29 ile hesaplanmıştır (Bellos ve ark., 2017; Bellos & Tzivanidis, 2018a; Bellos & Tzivanidis, 2018b; Bellos, Tzivanidis & Antonopoulos, 2016).

$$COP_{ASS} = \frac{\dot{Q}_{buh}}{\dot{Q}_{gen} + \dot{W}_{pompa}} \approx \frac{\dot{Q}_{buh}}{\dot{Q}_{gen}} \quad (9)$$

$$COP_{GEASS} = \frac{\dot{Q}_{buh}}{G_b A_a} \quad (10)$$

ASS'nin ve GEASS'nin ekserji verimi sırasıyla Eşitlik 30 ve 31 ile verilmiştir (Bellos ve ark., 2017; Asadi ve ark., 2018; Bellos & Tzivanidis, 2018a; Bellos, Tzivanidis & Antonopoulos, 2016).

$$\eta_{eks,ASS} = \frac{\dot{Q}_{buh} \left(\frac{T_a}{T_{buh}} - 1 \right)}{\dot{Q}_{gen} \left(1 - \frac{T_a}{T_{gen}} \right)} \quad (11)$$

$$\eta_{eks,GEASS} = \frac{\dot{Q}_{buh} \left(\frac{T_a}{T_{buh}} - 1 \right)}{A_{kol} G_b \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{gün}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{gün}} \right)^4 \right]} \quad (12)$$

3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Veri analizleri, Jamovi yazılımı (sürüm 2.6) (The jamovi project, 2024) kullanılarak, istatistiksel motor olarak R dili ve ortamı temel alınarak gerçekleştirilmiştir (R Core Team, 2024). Analiz sürecinde varyans analizleri, post-hoc testler, Levene testi ile varyans homojenliği ve Shapiro–Wilk testi ile normallik varsayımı incelenmiştir. Normallik varsayımı tüm gruplarda sağlanmadığından (Shapiro–Wilk $p < 0,05$), klasik ANOVA yerine trimmed means ($\alpha = 0,2$) esaslı *robust ANOVA* uygulanmıştır. Bu analiz Walrus modülü aracılığıyla yürütülmüş; etki büyüklükleri ve etkileşim etkileri değerlendirilmiştir. İkili karşılaştırmalarda post-hoc testler ve *car* paketinden (Fox & Weisberg, 2023) elde edilen araçlar kullanılmış, istatistiksel anlamlılık düzeyi 0,05 olarak kabul edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bandırma ilçesinin son 10 yıla ait (2014–2024) iklim verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Balıkesir ili Bandırma istasyonu (kod 17114) ölçümlerinden elde edilmiş, tasnif edilerek analiz sürecine hazırlanmıştır. İnceleme sonucunda 2017–2022 yılları arasında veri kaybı olmadığı belirlenmiştir. Ayı temsil eden günler için saatlik verilerin aritmetik ortalaması alınmış; güneş ışıınım verilerindeki yüksek veri kaybı nedeniyle, açık gökyüzü modeli (Hottel, 1976; Duffie, Beckman, & Blair, 2020; Liu & Jordan, 1960; Kırtepe & Güngör, 2019; Yılmaz,

Kırtepe, & Özbalta, 2018) Bandırma koşullarına uyarlanarak tahminler yapılmıştır. İstasyon konumu 40,331519°K enlem, 27,996458°D boylam ve 63 m rakımdadır (Anonim, 2025a; Anonim, 2025b).

GEASS'nin matematiksel modeli, EES programında Haziran (11. gün), Temmuz (17. gün) ve Ağustos (16. gün) aylarını temsil eden günler için, 09:00–16:00 saat aralığında çalıştırılmıştır (Duffie, Beckman & Blair, 2020). Simülasyon, kolektör alanı 30 m², kolektöre giren akışkan sıcaklığı 80 °C, ısııl enerji depolama tank hacmi 3,5 m³, yoğunlaştırıcı ve absorber sıcaklığı dış ortam sıcaklığının 5 °C fazlası, çözelti ısı değiştirici verimi 0,60 ve buharlaştırıcı sıcaklığı 4 °C kabulleri altında gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen veri setine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 2'de sunulmaktadır. Bu tablo; ortam koşulları (sıcaklık, güneş ışıınımı), enerji ve ekserji temelli sistem çıktıları ile verimlilik göstergelerinin ortalama, standart sapma ve minimum–maksimum değerlerini içermektedir.

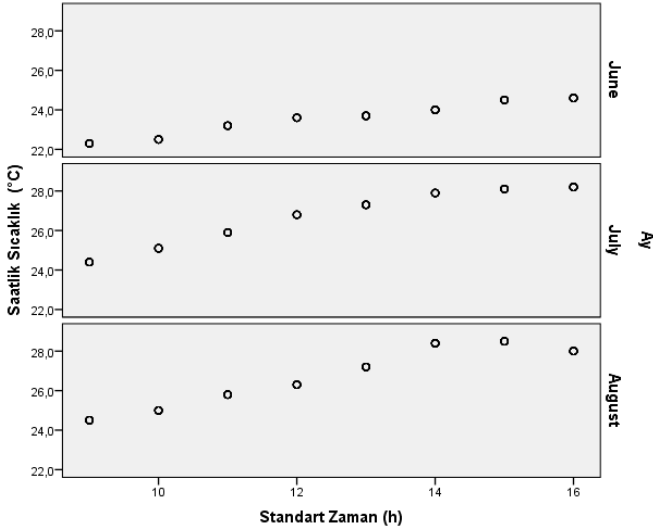
Tablo 2. Parametrelere ilişkin betimleyici istatistikler

Descriptives	N	Missing	Mean	SD	Minimum	Maximum
T_{amb} (°C)	288	0	25.66	1.94	22.30	28.50
G (W/m ²)	288	0	733.08	132.46	426.03	901.68
$\dot{Q}_u$ (kW)	288	0	12.54	4.48	1.76	19.30
$\dot{Q}_{buh}$ (kW)	288	0	8.45	3.79	0.53	15.98
$\eta_{ısııl}$	288	0	0.55	0.17	0.14	0.74
COP_{ASS}	288	0	0.69	0.16	0.31	0.87
COP_{GEASS}	288	0	0.37	0.15	0.04	0.63
$\eta_{eks,ASS}$	288	0	0.42	0.097	0.23	0.54
$\eta_{eks,GEASS}$	288	0	0.03	0.012	0.0039	0.0523

4.1. Ortalama Dış Sıcaklık Değerlerine Ait Bulgular

Şekil 2'de Bandırma iklim koşullarında dış ortam sıcaklıklarının aya ve standart zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Günün saatleri ve aylar arasında sıcaklık değerlerinde belirgin farklılıklar vardır. Standart zaman

değişkeninin dış sıcaklık üzerinde anlamlı etkisi bulunmuştur [$F(7, 71.7) = 11.1, p < .001$, etki büyüklüğü = 0.505]. Ay değişkeni ise çok güçlü ve anlamlı bir etki göstermiştir [$F(2, 106) = 136, p < .001$, etki büyüklüğü = 0.720]. Haziran, Temmuz ve Ağustos'a göre anlamlı derecede daha düşük sıcaklıklara sahiptir ($p < .001$); Temmuz ile Ağustos arasında ise fark saptanmamıştır ($p = .728$).

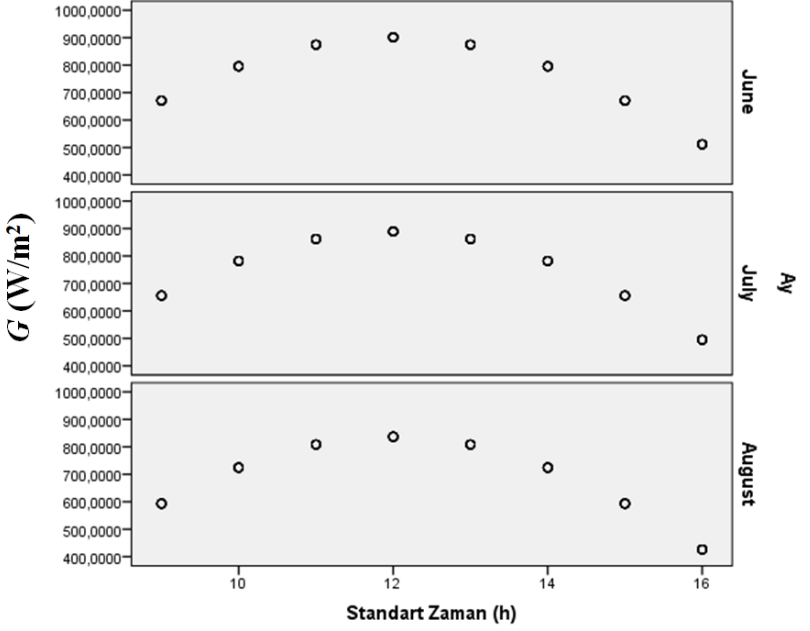


Şekil 2. Ortalama dış ortam sıcaklık değişimi

4.2. Yataya Gelen Toplam Işınıma Ait Bulgular

Şekil 3'de, Bandırma iklim koşullarında açık gökyüzü modeliyle elde edilen anlık yataya gelen toplam güneş ışınlamının standart zaman dilimlerine ve aylara göre değişimi sunulmaktadır. Işınlam değerleri sabah saatlerinden itibaren artmakta, öğle saatlerinde zirveye ulaşmakta ve akşam saatlerine doğru azalmaktadır. Standart zaman değişkeninin toplam ışınlam üzerinde anlamlı etkisi vardır [$F(7, 72.0) = 206, p < .001$, etki büyüklüğü = 0.860]. Ay değişkeni de anlamlı etkiye sahiptir [$F(2, 114) = 5.85, p = .004$, etki büyüklüğü = 0.239]. Haziran, Temmuz ve Ağustos için ortalama saatlik ışınlam değerleri

sırasıyla 762, 748 ve 689 W/m² olup, en yüksek değer Haziran ayında elde edilmiş ve bu sonuçlar önceki çalışmalarla (Yılmaz, Kırtepe & Özbalta, 2018) uyumludur.

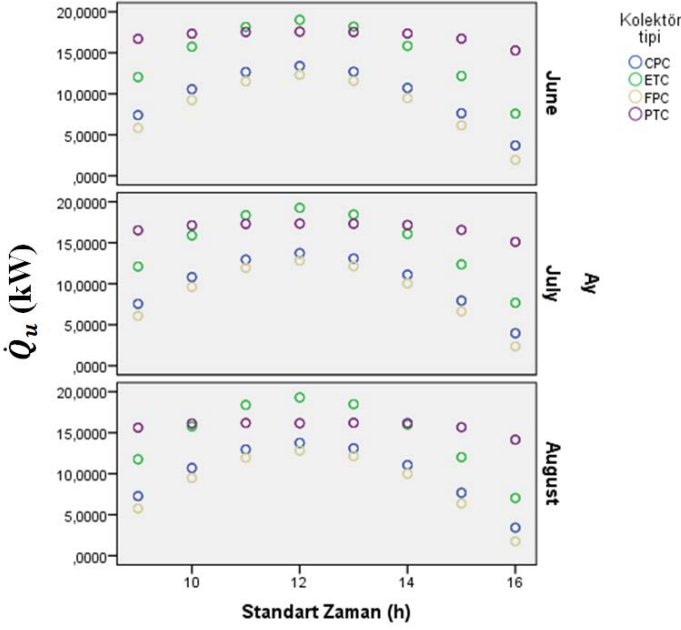


Şekil 3. Anlık yataya gelen toplam ışınlam değişimi.

4.3. Faydalı Isı Geçiş Miktarına Ait Bulgular

Şekil 4'te, kolektör tipi, aylar ve standart zamana göre faydalı ısı geçiş miktarındaki değişim gösterilmektedir. Günün erken saatlerinden öğleye doğru faydalı ısı artmakta, öğleden sonra ise azalmaktadır; bu durum kolektör tipi kadar güneş ışınlamındaki günlük değişimle de ilişkilidir. Robust ANOVA sonuçlarına göre kolektör tipi ($Q = 31146$, $p = .001$), standart zaman ($Q = 11117$, $p = .001$) ve kolektör tipi * standart zaman etkileşimi ($Q = 1211$, $p = .001$) anlamlı bulunmuştur. Ay ve standart zaman birlikte değerlendirildiğinde yalnızca standart zamanın etkisi anlamlıdır ($Q = 65.7148$, $p = .001$), ay ($p = .890$) ve standart zaman * ay etkileşimi ($p = .999$) anlamlı değildir.

Bu sonuçlar, faydalı ısı geçişinin kolektör tipi ve günün saatine bağlı olarak değiştiğini, ancak ay değişkeninin belirleyici olmadığını göstermektedir.

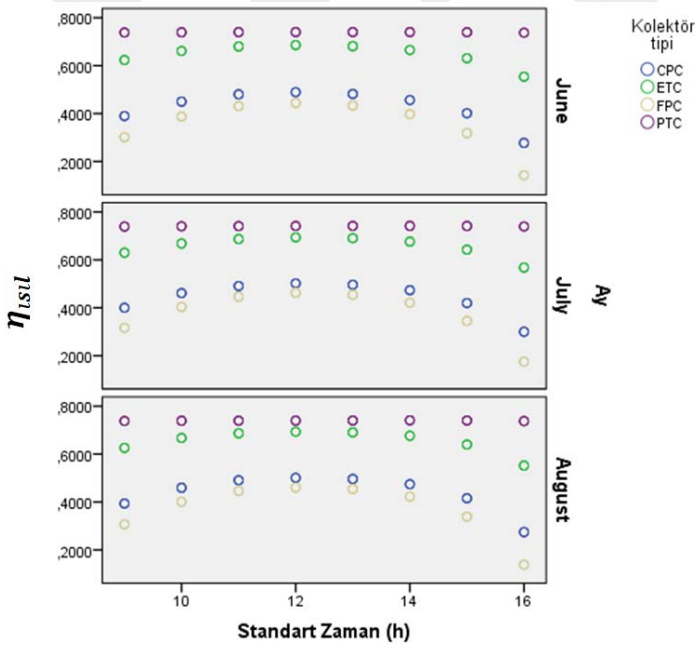


Şekil 4. Faydalı ısı geçiş miktarı değişimi

4.4. Kolektör Isıl Verimine Ait Bulgular

Şekil 5'te, kolektör tipi, aylar ve standart zamana göre kolektör ısı verimindeki değişim gösterilmektedir. Tüm kolektörlerde sabah saatlerinden öğleye doğru verim artmakta, öğleden sonra ise azalmaktadır. Bu durum, güneş ışınımının gün içindeki dağılımıyla ilişkilidir. PTC kolektörler erken saatlerden itibaren yüksek verimle çalışırken, diğer kolektörler gün ortasında en yüksek verim değerlerine ulaşmaktadır. Robust ANOVA sonuçlarına göre kolektör tipi ($Q = 129508$, $p = .001$), standart zaman ($Q = 7509$, $p = .001$) ve kolektör tipi * standart zaman etkileşimi ($Q = 7702$, $p = .001$) anlamlıdır. Ay ve standart zaman analizinde ise ay ($Q = 0.1062$, $p = .949$), standart

zaman ($Q = 8.9287$, $p = .309$) ve ay * standart zaman etkileşimi ($Q = 0.0250$, $p = .999$) anlamlı bulunmamıştır. Bu sonuçlar, ısı verimin esas olarak kolektör tipine ve günün saatine bağlı olduğunu, aylar arasında belirgin bir fark olmadığını göstermektedir. Çalışmamızda FPC, CPC, ETC ve PTC kolektörlerin ortalama ısı verimleri sırasıyla 0.37, 0.44, 0.65 ve 0.74 bulunmuş; literatürde raporlanan yaklaşık değerlerle (Asadi, Amani, Amani, Kasaeian & Bahiraei, 2018; Bellos, Tzivanidis & Antonopoulos, 2016) uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

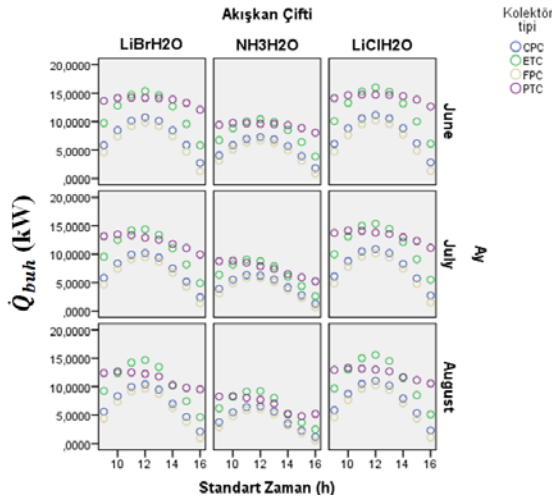


Şekil 5. Kolektör ısı verim değişimi.

4.5. Buharlaşma Isı Geçiş Miktarına Ait Bulgular

Şekil 6'da, kolektör tipi, akışkan çifti, aylar ve standart zamana göre buharlaşma ısı geçiş miktarındaki (soğutma kapasitesi) değişim gösterilmektedir. Farklı kolektör tipleri ve akışkan çiftleri soğutma kapasitesi üzerinde belirgin etkilere sahiptir; $\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$ çifti diğerlerine kıyasla daha düşük kapasite

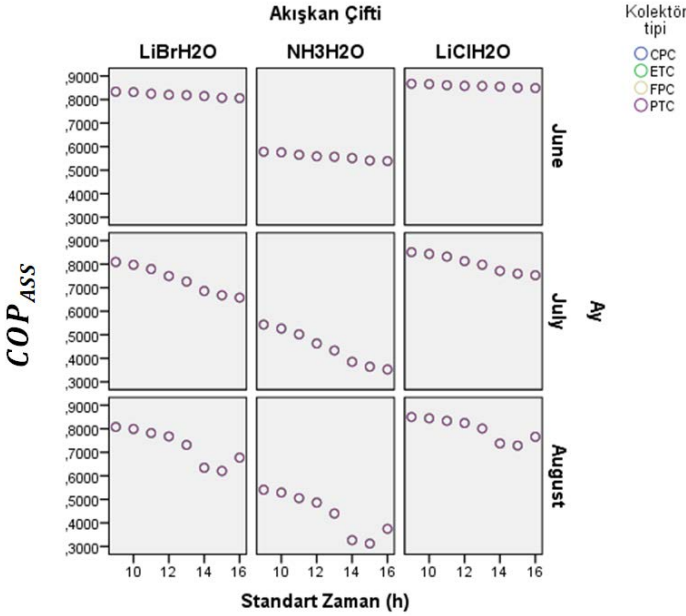
sağlamaktadır. Robust ANOVA sonuçlarına göre kolektör tipi ($Q = 249.3$, $p = .001$) ve akışkan çifti ($Q = 150.3$, $p = .001$) anlamlı bulunmuş, kolektör tipi * akışkan çifti etkileşimi ise anlamlı değildir ($Q = 11.1$, $p = .117$). CPC ve FPC kolektörler, ETC ($p < .001$) ve PTC'ye ($p < .001$) göre anlamlı düzeyde daha düşük soğutma kapasitesi vermiştir; CPC–FPC ve ETC–PTC farkları anlamsızdır. $\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$ çifti, $\text{LiBr--H}_2\text{O}$ ($p < .001$) ve $\text{LiCl--H}_2\text{O}$ 'ya ($p < .001$) kıyasla daha düşük kapasite sağlamış, $\text{LiBr--H}_2\text{O}$ ile $\text{LiCl--H}_2\text{O}$ farkı anlamsız bulunmuştur ($p = .170$). İkili karşılaştırmalarda genel olarak etkileşim etkileri sınırlı olmakla birlikte, FPC– $\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$ ile FPC– $\text{LiCl--H}_2\text{O}$ arasında anlamlı fark vardır ($p = .036$). Standart zaman değişkeni anlamlıdır ($Q = 139.54$, $p = .001$), ay ($p = .103$) ve standart zaman * ay etkileşimi ($p = .999$) anlamlı değildir. Çalışmada en yüksek ortalama soğutma kapasitesi PTC + $\text{LiCl--H}_2\text{O}$ ile 13.26 kW, en düşük ise FPC + $\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$ ile 4.10 kW olarak elde edilmiş; sonuçlar literatürdeki değerlerle (Asadi, Amani, Amani, Kasaeian, & Bahiraei, 2018; Kırtepe & Güngör, 2023; Aman, Ting, & Henshaw, 2014; Said ve ark., 2016) uyumludur.



Şekil 6. Buharlaşma ısı geçiş miktarı (soğutma kapasitesi) değişimi

4.6. ASS COP Değerlerine Ait Bulgular

Şekil 7’de kolektör tipi, akışkan çifti, aylar ve standart zamana bağlı olarak ASS COP değerlerindeki değişim sunulmaktadır. COP değerleri kolektör tipinden bağımsız olarak sabit kalmakta, ancak akışkan çiftleri arasında belirgin farklar görülmektedir. $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ çifti diğer çiftlere kıyasla anlamlı düzeyde daha düşük COP sağlamaktadır ($Q = 690$, $p = .001$). Buna karşın kolektör tipi ($Q = 1.19\text{e-}6$, $p = .999$) ve kolektör tipi * akışkan çifti etkileşimi ($Q = 4.54\text{e-}6$, $p = .999$) anlamlı bulunmamıştır. İkili karşılaştırmalarda $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, hem $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ($p < .001$) hem de $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ ’ya ($p < .001$) göre düşük COP’a sahiptir; $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ile $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ arasındaki fark ise daha küçük etki büyüklüğüne sahiptir (-0.220 , $p < .001$). Kolektör tipi * akışkan çifti kombinasyonları arasında anlamlı fark yoktur (tüm $p \geq .999$). Zaman değişkenleri açısından yalnızca ay etkisi anlamlıdır ($Q = 9.65$, $p = .011$); standart zaman ($Q = 9.29$, $p = .284$) ve standart zaman * ay etkileşimi ($Q = 3.55$, $p = .999$) anlamlı değildir. Temmuz ve Ağustos aylarında günün ilerleyen saatlerinde COP’un azaldığı görülse de robust ANOVA sonuçları bu eğilimi doğrulamamaktadır. Ortalama COP, gün içinde hafif düşüş göstermekte (09:00’da 0.742, 15:00’te 0.628) ancak standart sapmalar artmakta ve 16:00’daki küçük artış trendin sürekliliğini bozmaktadır. Bu nedenle standart zamanın istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamıştır.



Şekil 7. Absorpsiyonlu soğutma sistemi (ASS) COP değişimi

4.7. GEASS COP Değerlerine Ait Bulgular

Şekil 8’de, kolektör tipi, akışkan çifti, aylar ve standart zaman değişkenlerine bağlı olarak güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemi (GEASS) COP değerlerindeki değişim grafiksel olarak sunulmuştur. Görsel inceleme, hem kolektör tipi hem de akışkan çiftinin COP üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. Bu etkinin daha net görülmesi amacıyla Şekil 9 hazırlanmış olup, özellikle CPC ve FPC kolektörleri ile NH₃-H₂O akışkan çiftinin kullanıldığı sistemlerde COP değerlerinin düşük olduğu dikkat çekmektedir.

Robust ANOVA sonuçları, kolektör tipi ($Q = 713.4$, $p = .001$), akışkan çifti ($Q = 427.4$, $p = .001$) ve kolektör tipi * akışkan çifti etkileşimi ($Q = 27.4$, $p = .001$) değişkenlerinin COP üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, COP değerlerinin yalnızca tekil

değişkenlerden değil, bu değişkenlerin etkileşiminden de etkilendiğini göstermektedir.

Post-hoc analizlere göre, kolektör tipleri arasında PTC en yüksek COP değerini sağlamış; özellikle CPC ($p < .001$) ve FPC ($p < .001$) ile arasındaki fark anlamlı bulunmuştur. Akışkan çiftleri karşılaştırıldığında ise $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ve $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ 'ya kıyasla anlamlı düzeyde daha düşük COP değerleri üretmiştir ($p < .001$). Ayrıca $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ile $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ arasında da anlamlı bir fark tespit edilmiştir ($p = .004$).

Kolektör tipi * akışkan çifti etkileşimleri incelendiğinde, bazı kombinasyonların performans açısından öne çıktığı görülmüştür. Örneğin, $\text{FPC-LiCl-H}_2\text{O}$ kombinasyonu, $\text{FPC-NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 'ya göre anlamlı düzeyde daha yüksek COP üretmiştir ($p = .004$). Benzer şekilde, $\text{PTC-NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ kombinasyonu, $\text{PTC-LiBr-H}_2\text{O}$ 'ya kıyasla anlamlı fark göstermiştir ($p = .002$). Bu bulgular, GEASS performansının yalnızca kolektör tipi veya akışkan çiftinden değil, bu iki faktörün uyumundan da etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Zaman ve ay değişkenlerinin etkilerinin değerlendirildiği analizde, yalnızca standart zaman değişkeni anlamlı bulunmuştur ($Q = 25.64$, $p = .003$). Ay değişkeni ($p = .258$) ve standart zaman * ay etkileşimi ($p = .999$) istatistiksel olarak anlamlı değildir. Bu sonuç, COP değerlerinin gün içindeki saatlere duyarlı olduğunu, ancak seçilen aylar arasında belirgin fark olmadığını göstermektedir.

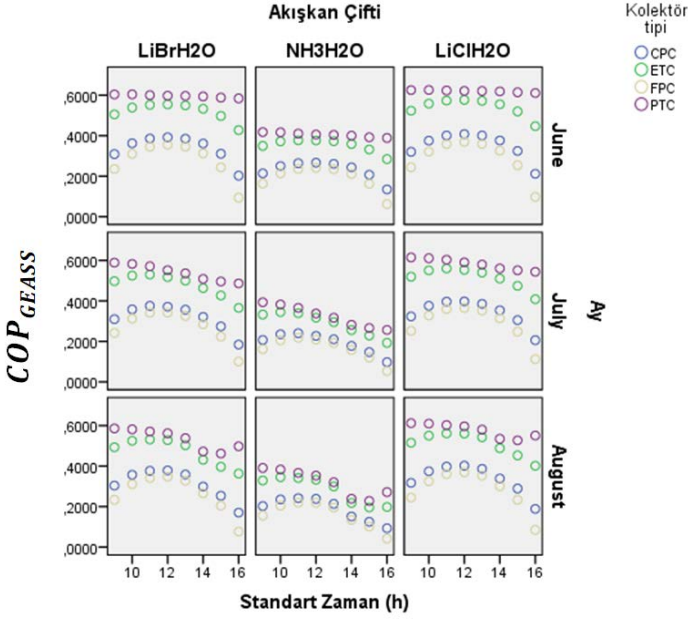
Q değerlerinin büyüklükleri dikkate alındığında, COP üzerindeki en yüksek etkinin kolektör tipinden (%61) kaynaklandığı; akışkan çiftinin etkisinin %37, kolektör tipi * akışkan çifti etkileşiminin ise %2 seviyesinde kaldığı hesaplanmıştır. Bu durum, kolektör tipinin seçiminde yapılacak tercihin sistem performansı açısından en kritik faktör olduğunu göstermektedir.

Post-hoc sonuçlar, PTC–LiCl–H₂O kombinasyonunun istatistiksel olarak anlamlı şekilde en yüksek COP değerlerine ulaştığını, FPC–NH₃–H₂O kombinasyonunun ise en düşük değerlere sahip olduğunu ortaya koymuştur ($p < .001$).

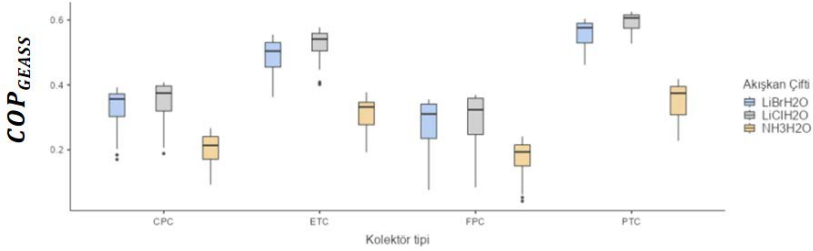
Literatürdeki bulgular da bu sonuçları desteklemektedir. Örneğin, PTC ile çalışan sistemlerde COP'un 0.55–0.61 aralığında olduğu, kolektör sıcaklığının artırılmasının COP'ta %23.13'e varan artış sağladığı bildirilmiştir (Kırtepe & Güngör, 2023). Çalışmamızda PTC–LiCl–H₂O kombinasyonu ile elde edilen en yüksek COP değeri ($M = 0.593$), bu bulgularla uyumludur. Ayrıca, LiCl–H₂O'nun LiBr–H₂O'ya kıyasla daha yüksek soğutma performansı sağladığı rapor edilmiştir (Bellos, Tzivanidis, Symeou, & Antonopoulos, 2017; Özkan, 2013); çalışmamızda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Düzlemsel kolektörlerin 90 °C üzerindeki sıcaklıklarda verim kaybı yaşadığı (Daşkın, 2013) ve PTC'lerin yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans sergilediği (Yılmazoğlu, 2006) bilgileri, FPC–NH₃–H₂O kombinasyonunun düşük ve PTC'nin yüksek COP performansını açıklamaktadır.

Sonuç olarak, çalışma bulguları literatürle uyumlu olup, GEASS tasarımında kolektör tipinin öncelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini, ancak akışkan çiftinin de sistem verimliliğini artıracak şekilde seçilmesinin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. Güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemi (GEASS) COP değişimi

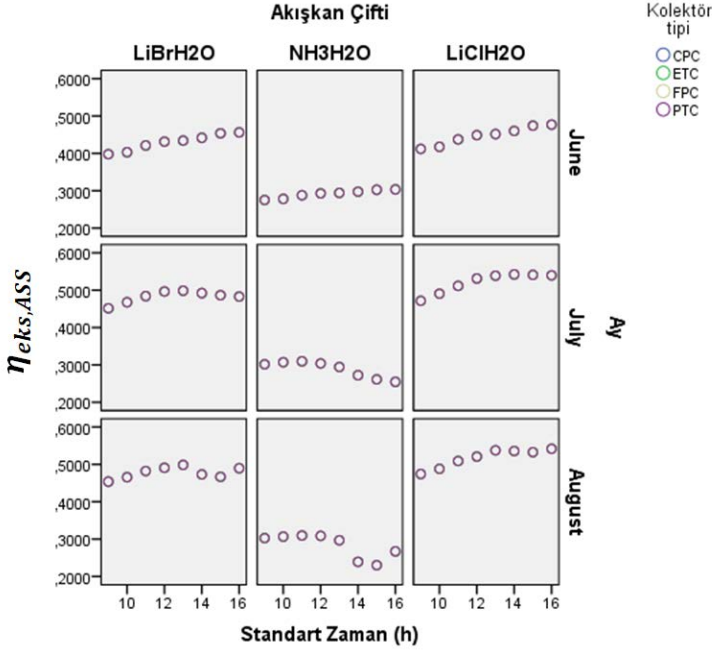


Şekil 9. Kolektör tipi ve akışkan çiftinin etkileşimine göre (GEASS) COP ortalama değerleri

4.8. ASS Ekserji Verimine Ait Bulgular

Şekil 10’da kolektör tipi, akışkan çifti, aylar ve standart zamana bağlı olarak ASS ekserji verimindeki değişim sunulmaktadır. Kolektör tipi ekserji verimi üzerinde belirgin bir

fark yaratmazken, akışkan çiftleri arasında anlamlı farklılıklar gözlenmektedir.



Şekil 10. Absorpsiyonlu soğutma sistemi (ASS) ekserji verimi değişimi

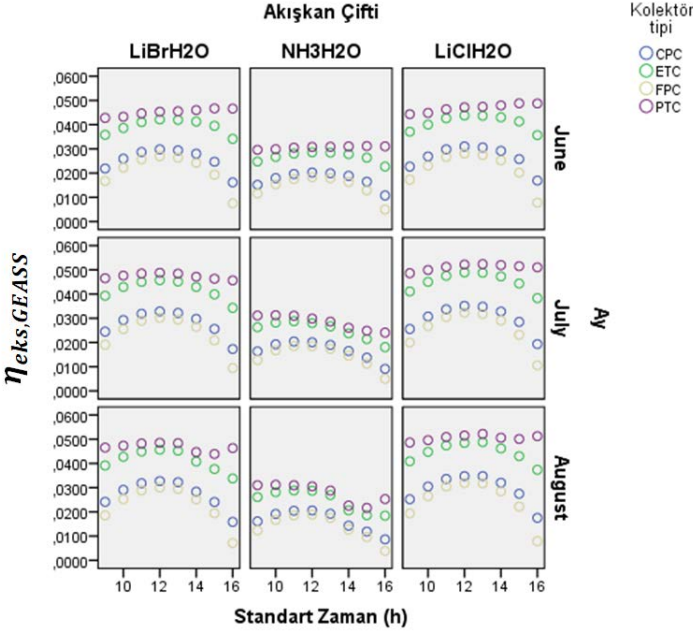
NH₃-H₂O çifti, diğer çiftlere kıyasla daha düşük ekserji verimi sağlamaktadır ($Q = 2392$, $p = .001$). Buna karşın kolektör tipi ($Q = 2.34e-5$, $p = .999$) ve kolektör tipi * akışkan çifti etkileşimi ($Q = 6.61e-5$, $p = .999$) anlamlı bulunmamıştır. Post-hoc analizlerde NH₃-H₂O, hem LiBr-H₂O ($p < .001$) hem de LiCl-H₂O'ya ($p < .001$) göre düşük ekserji verimine sahip olup, LiBr-H₂O ile LiCl-H₂O arasındaki fark da anlamlıdır ($p < .001$). Zaman değişkenleri açısından yalnızca ay etkisi anlamlıdır ($Q = 6.285$, $p = .049$); standart zaman ($Q = 2.402$, $p = .941$) ve standart zaman * ay etkileşimi ($Q = 0.977$, $p = .999$) anlamlı değildir. Bu bulgular, ekserji veriminin akışkan çiftine ve kısmen aya bağlı değiştiğini, kolektör tipinin ve gün içi zaman değişiminin ise düşük düzeyde etkili olduğunu göstermektedir.

4.9. GEASS Ekserji Verimine Ait Bulgular

Şekil 11’de kolektör tipi, akışkan çifti, aylar ve standart zamana bağlı olarak GEASS ekserji verimindeki değişim sunulmaktadır. Hem kolektör tipi hem de akışkan çiftleri ekserji verimi üzerinde belirgin farklılıklar yaratmakta; $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ çifti daha düşük, FPC kolektör tipi ise diğer kolektörlere kıyasla daha zayıf performans göstermektedir. Analiz sonuçları, kolektör tipi ($Q = 1186.1$, $p = .001$), akışkan çifti ($Q = 674.3$, $p = .001$) ve kolektör tipi * akışkan çifti etkileşiminin ($Q = 51.9$, $p = .001$) tamamının istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Post-hoc karşılaştırmalarda CPC ve FPC kolektörleri, ETC ve özellikle PTC’ye göre anlamlı derecede daha düşük ekserji verimi sağlamıştır. Akışkan çiftleri açısından $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, hem $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ($p < .001$) hem de $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ ’ya ($p < .001$) göre daha düşük verim üretmiş; $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ile $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ arasındaki fark da anlamlı bulunmuştur ($p = .0001$). Kolektör tipi * akışkan çifti etkileşiminde bazı kombinasyonlar arasında anlamlı farklar saptanmış; örneğin $\text{FPC-LiCl-H}_2\text{O}$, $\text{FPC-NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ’ya göre ($p < .001$) ve $\text{PTC-LiCl-H}_2\text{O}$, $\text{PTC-NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ’ya göre daha yüksek ekserji verimi sağlamıştır.

Zaman ve ay etkilerinin incelendiği analizde yalnızca standart zaman anlamlı bulunmuştur ($Q = 19.464$, $p = .018$); ay ($p = .659$) ve standart zaman * ay etkileşimi ($p = .999$) anlamlı değildir. Bu bulgular, ekserji veriminin günün saatlerine bağlı olarak değiştiğini, ancak aylara göre anlamlı farklılık göstermediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 11. Güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemi (GEASS) ekserji verimi değişimi

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, Bandırma iklim koşullarında çalışacak güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin (GEASS) performansı teorik ve istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir. Dört kolektör tipi (FPC, CPC, ETC, PTC), üç akışkan çifti ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBr-H}_2\text{O}$, $\text{LiCl-H}_2\text{O}$) ve ASS'nin tek kademeli sistem konfigürasyonu dikkate alınarak, ayı temsil eden gün için saatlik bazda soğutma kapasitesi, COP ve ekserji verimi analiz edilmiştir.

Analizler, kolektör tipi ve akışkan çiftinin performans üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler yarattığını göstermiştir. PTC– $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ kombinasyonu, hem COP hem de soğutma kapasitesinde en yüksek ortalamalara ulaşarak en

verimli seçenek olurken, FPC–NH₃–H₂O kombinasyonu en düşük performansı göstermiştir. Robust ANOVA sonuçlarında, COP’a etki eden en güçlü faktör kolektör tipi, ikinci sırada akışkan çifti olarak belirlenmiş; kolektör tipi * akışkan çifti etkileşimi de anlamlı bulunmuştur.

Saatlik bazda COP sabah saatlerinde daha yüksek, öğleden sonra daha düşük seyretmiş; bu durum güneş ışıınımı ve ortam sıcaklığı değişimleriyle ilişkilendirilmiştir. Ancak robust ANOVA, zaman değişkeninin COP üzerindeki etkisini sınırlı düzeyde göstermiştir. Aylar arasında Haziran, gerek ışıınım gerek COP açısından en yüksek değerlere sahip olmuş; Temmuz ve Ağustos arasında anlamlı fark bulunmamıştır.

Sonuçlar, GEASS performansının iklim koşulları, kolektör tipi ve akışkan çiftine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle tasarım sürecinde her iki parametrenin bütüncül olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bulgular, Bandırma iklimine uygun sistem seçimi ve optimizasyonu için referans niteliğinde olup, benzer iklimlerdeki tasarımlar için yol göstericidir. Geliştirilen teorik model ve elde edilen veriler, Türkiye’de güneş enerjili soğutma sistemlerinin yaygınlaştırılması ve yerli teknolojinin geliştirilmesine katkı sağlayacak; gelecekte yapılacak deneysel çalışmalarla desteklendiğinde bu sistemlerin ticarileştirilmesi ve enerji verimliliği politikalarına entegrasyonu mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Alirahmi, S. M., Dabbagh, S. R., Ahmadi, P., & Wongwises, S. (2020). Multi-objective design optimization of a multi-generation energy system based on geothermal and solar energy. *Energy Conversion and Management*, 205, Article 112426. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112426>
- Aman, J., Ting, D. S.-K., & Henshaw, P. (2014). Residential solar air conditioning: Energy and exergy analyses of an ammonia–water absorption cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 62, 424–432. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.006>
- Anonim. (2025a). Bandırma istasyon 17114. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/tahmin/il-ve-ilceler.aspx?il=Bal%C4%B1kesir&ilce=Band%C4%B1rma> (Erişim Tarihi: 01-Şub-2025)
- Anonim. (2025b). 40°19'53.5"N 27°59'47.3"E. Google Maps. <https://www.google.com/maps/place/40%C2%B019'53.5%22N+27%C2%B059'47.3%22E/@40.331519,27.996458,17z/> (Erişim Tarihi: 01-Şub-2025)
- Asadi, J., Amani, P., Amani, M., Kasaeian, A., & Bahiraei, M. (2018). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of absorption cooling system driven by various solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 173, 715–727. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.013>
- Bamisile, O., Huang, Q., Hu, W., Dagbasi, M., & Kemena, A. D. (2020). Performance analysis of a novel solar PTC integrated system for multi-generation with hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.234>

- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2017). Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors. *Renewable Energy*, 114, 1376–1393. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.055>
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018a). Parametric analysis and optimization of a cooling system with ejector-absorption chiller powered by solar parabolic trough collectors. *Energy Conversion and Management*, 168, 329–342. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.024>
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018b). Performance analysis and optimization of an absorption chiller driven by nanofluid based solar flat plate collector. *Journal of Cleaner Production*, 174, 256–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.313>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., & Antonopoulos, K. A. (2016). Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types. *Applied Thermal Engineering*, 102, 749–759. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.032>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Pavlovic, S., & Stefanovic, V. (2017). Thermodynamic investigation of LiCl–H₂O working pair in a double effect absorption chiller driven by parabolic trough collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*, 3, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.005>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Symeou, C., & Antonopoulos, K. A. (2017). Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller – A dynamic approach. *Energy Conversion and Management*, 137, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.041>

- Daşkın, M. (2013). İklimlendirme amaçlı güneş enerjisi destekli bir absorpsiyonlu soğutma sisteminin modellenmesi ve analizi (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye.
- De, R. K., & Ganguly, A. (2020). Performance comparison of solar-driven single and double-effect LiBr-water vapor absorption system based cold storage. *Thermal Science and Engineering Progress*, 17, Article 100488. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100488>
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind* (5th ed.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2023). *car: Companion to Applied Regression* [R package]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=car>
- Gogoi, T. K., & Saikia, S. (2019). Performance analysis of a solar heat driven organic Rankine cycle and absorption cooling system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 13, Article 100372. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100372>
- Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, 18, 129–134. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90045-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90045-1)
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>
- Kırtepe, E. (2024). Güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminde kolektörde nanoakışkan kullanılmasının sistem performansına etkisinin termodinamik analizi.

- DEÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi, 26(76), 69–81.
<https://doi.org/10.21205/deufmd.2024267609>
- Kırtepe, E., & Güngör, A. (2019). İzmir koşullarında açık gökyüzü ışınlımı için fotovoltaik/termal (PV/T) kolektörün teorik modellenmesi. In *14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi* (pp. 1876–1891). İzmir, Türkiye.
- Kırtepe, E., & Güngör, A. (2023). Güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin Şırnak ili iklim koşullarındaki davranışının teorik incelemesi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, (198), 23–33.
- Li, H., Huang, S., Wang, X., Zhao, Y., Bu, X., & Wang, L. (2022). Analysis of H₂O/EMISE absorption chiller driven by stationary solar collectors in hot-humid climate. *Thermal Science and Engineering Progress*, 27, Article 101155.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101155>
- Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, 1–19.
[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- Lubis, A., Jeong, J., Saito, K., Giannetti, N., Yabase, H., Alhamid, M. I., & Nasruddin. (2016). Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates. *Renewable Energy*, 99, 825–835.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.055>
- Ma, H., Li, Q., Wang, D., Song, Q., Zhou, S., Wang, X., & Li, Y. (2022). Operating performance and economic analysis of solar single/double-effect compound absorption refrigeration system. *Solar Energy*, 247, 73–85.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.005>

- Özkan, G. (2013). Absorpsiyonlu soğutma sistemleri uygulamalarının enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi: Örnek bir uygulama (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (Version 4.4) [Computer software]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://cran.r-project.org> (R packages retrieved from CRAN snapshot 2024-08-07)
- Said, S. A. M., Spindler, K., El-Shaarawi, M. A., Siddiqui, M. U., Schmid, F., Bierling, B., ve ark. (2016). Design, construction and operation of a solar powered ammonia–water absorption refrigeration system in Saudi Arabia. *International Journal of Refrigeration*, 62, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.10.026>
- The jamovi project. (2024). *jamovi* (Version 2.6) [Computer software]. Sydney, Australia: The jamovi project. <https://www.jamovi.org>
- Valles, M., Bourouis, M., & Boer, D. (2020). Solar-driven absorption cycle for space heating and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 168, Article 114836. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114836>
- Yılmaz, R., Kırtepe, E., & Özbalta, N. (2018). Bandırma ve Gönen için açık gökyüzü ışımasının tahminlenmesi. In *Uluslararası Bandırma ve Çevresi Sempozyumu (UBS'18) Tam Metin Bildiriler Kitabı III* (pp. 458–468). Bandırma, Balıkesir, Türkiye.
- Yılmazoğlu, M. Z. (2006). Bir tekstil fabrikasında güneş destekli çift etkili bir absorpsiyonlu soğutma sisteminin uygulamasının teknik ve ekonomik analizi (Yüksek

lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Zheng, X., Shi, R., Wang, Y., You, S., Zhang, H., Xia, J., & Wei, S. (2019). Mathematical modeling and performance analysis of an integrated solar heating and cooling system driven by parabolic trough collector and double-effect absorption chiller. *Energy and Buildings*, 202, Article 109400.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109400>

ERİYİK YIĞARAK MODELLEME (EYM) TEKNİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ VE ÜRETİM SONRASI İHTİYAÇ DUYULAN DELİK DELME İŞLEMLERİNDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR

Ender EMİR¹

1. GİRİŞ

Eklemeli İmalat (Eİ) malzemenin katmanlar halinde inşa edilmesine dayanan 3 boyutlu (3B) karmaşık yapıların üretiminde kullanılan yenilikçi bir üretim yöntemidir (Mohanavel et al. 2021). Özellikle geleneksel üretim yöntemlerine nazaran daha hızlı gerçekleşmesi ve daha az atık malzeme oluşumu ile öne çıkmaktadır (Srivastava and Rathee 2022). Bir diğer belirgin avantajı, enerji tüketimini azaltarak verimliliği artırması ve karbon ayak izini minimize etmeye uygun bir sistem olmasıdır. (Nyamuchiwa et al. 2023). Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında 3B nesneler tasarlayarak üretilen G kodlarına göre üretim gerçekleştirilmesi de Eİ yönteminin üstünlüğü olarak görülebilmektedir (Nyamuchiwa et al. 2023).

Günümüzde farklı çalışma prensiplerine dayanan çok sayıda Eİ tekniği bulunmaktadır (Srivastava and Rathee 2022). Şekil 1'de gösterildiği üzere, Eİ tekniği, kendi içinde 7 ana kategori ve alt kategorilere ayrılmakta olup, kullanılan malzeme ve üretim prensiplerine göre çeşitli yöntemler içermektedir. Üretim prensiplerine göre; foto polimerizasyonu, toz yatak füzyonu, malzeme ekstrüzyonu, malzeme püskürtme, bağlayıcı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Elbistan MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü Otomotiv Teknolojisi Programı, ender.emir@istiklal.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4972-5064.

püskürtme, levha laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemlerini içerir (Srivastava and Rathee 2022). Malzeme olarak katı bazlı sistem, toz bazlı sistem ve sıvı bazlı sistem olarak sınıflandırılır (Nirish and Rajendra 2020).

Şekil 1. Eklemeli imalat yöntemleri

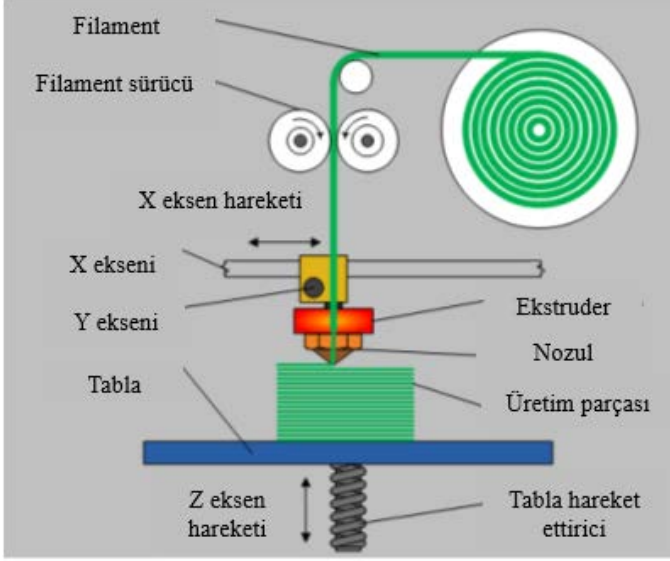


1.1. Eriyik Yığarak Modelleme (EYM)

EYM, Eİ yönteminde belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış (yaklaşık 190-210 °C) ekstrudurdan geçen filament çapı düşürülerek, birden fazla eksenle hareket sağlayan tablanın üzerine katmanlar halinde inşa etme üzerine çalışan bir üretim yöntemidir. CAD ortamında tasarlanan parça STL dosyası halinde EYM prensibine göre çalışan cihazlar için uygun olan dilimleme programlarına aktarılarak G kodları elde edilir. G kodlarına göre hareket eden ekstrüder kafası sürekli olarak bir katman inşa edip belirli bir mesafe yukarı çıkarak diğer katmanları oluşturur. Kullanılan cihaz özelliklerine bağlı olarak

Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polietilen Tereftalat Glikol (PET-G) gibi polimer bazlı filamentler kullanılarak üretimler gerçekleştirilebilmektedir. Şekil.2’de EYM üretim tekniğinin şematik olarak gösterimi verilmiştir.

Şekil 2. EYM tekniği (Adel et al. 2018)



1.2. EYM Tekniğinde Kullanılan Üretim Malzemeleri

EYM tekniğinin getirdiği esnek üretim sayesinde birden fazla hammadde kullanılmaktadır. Bunlardan yaygın olarak kullanılanları Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polietilen Tereftalat Glikol (PETG), Nylon (PA), Termoplastik Poliüretan / Elastomer (TPU/TPE)’dir. Bu üretim tekniğinde kullanılan hammaddeler, mekanik, termal, işlenebilirlik ve kullanım alanı açısından birbirinden farklılıklar göstermektedir.

1.2.1. PLA

PLA, çeşitli uygulama alanlarında geliştirilen en yenilikçi malzemelerden biridir (Kristiawan et al. 2021). PLA EYM

teknğinde en yaygın kullanılan hammaddelerden biridir. Düşük sıcaklıkta çalışabilme, kolay baskı yapabilme, diğer hammaddelere göre daha ucuz olması ile ön plana çıkmaktadır. Ayrıca mısır nişastası, şeker kamışı gibi bitkisel kaynaklı maddelerden üretilmektedir. Bu da PLA'nın hem çevreci hem de biyobozunur olmasını sağlamaktadır. Diğer yandan düşük sıcaklıklarda dayanımının düşmesinden dolayı kırılgan bir davranış göstermektedir. Kullanım alanlarında PLA, metabolik olarak zararlı olmayan biyoyumluluğu sayesinde tıbbi uygulamalarda geliştirilebilir (Antoniac et al. 2019; Kristiawan et al. 2021; Pitjamit et al. 2020).

1.2.2. ABS

ABS, çeşitli akrilonitril karışımlarını ve kopolimerlerini, bütadien içeren polimerleri ve stireni tanımlamak için kullanılan genel bir terimdir (Kristiawan et al. 2021). PLA'ya göre ısı dayanımı ve darbe direnci daha yüksek olan bir hammaddedir. Baskı işlemleri PLA'ya göre daha zordur ancak mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir.

1.2.3. PETG

Esnek, darbe dayanımı yüksek ve en önemlisi gıda ile temas edebilir bir yapıdadır. Polietilen türevli malzemelerin modifiye edilmiş halleridir. Bu sayede daha az kırılganlık ve daha iyi darbe dayanımı sağlamaktadır. Isı dayanımı PLA'ya göre daha iyi, ABS'ye göre daha zayıftır. Gıda ile temasın uygun olmasından dolayı neme karşı diğer hammaddelere göre daha dirençlidir.

1.2.4. Naylon

Naylon yüksek dayanım, aşınma direnci, sürtünme direnci ve esneklik sağlayan bir mühendislik termoplastik polimerdir. PETG malzemesinin aksine kolay nem çekebilmektedir. . Ayrıca,

baskı süreçleri karmaşık olup, üretim sırasında deformasyona maruz kalma olasılığı yüksektir.

1.2.5. TPU/TPE

Esnek filament olarak yaygın kullanılan hammaddelerdir. Kauçuk gibi bükülebilir ve esnek yapıdadırlar. Yüksek darbe ve aşındırma direncine sahiptirler. Kimyasallara karşı dayanım gösterirler. Ancak yüksek esneklikleri nedeni ile baskı işlemleri zordur. Özellikle düşük yazdırma hızlarında verimli bir üretim sağlayabilmektedir. Ancak nozulda filamentin sıkışma riski fazla ve üretim sonrası yüzey kaliteleri PLA ve ABS'ye göre daha düşüktür.

1.3. EYM Tekniği ile Üretimde Kullanılan Temel Üretim Parametreleri

EYM tekniğinde kontrol edilebilir üretim parametreleri sayesinde üretilen parçaya farklı özellikler kazandırılabilir. Bu parametrelerden en temelleri nozul sıcaklığı, baskı tabla sıcaklığı, katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı hızı, soğutma hızı, destek yapısı kullanımıdır. Özellikle bu parametrelerin doğru seçimi üretilecek olan parçanın geometrik toleransını, boyut toleransını, yüzey kalitesini ve katmanlar arası yapışmadan kaynaklı olarak mekanik özellikleri etkilemektedir. Tablo.1'de üretim parametreleri ve bu parametrelerin Eİ ile üretim sonrası talaşlı imalatla karşılaşılacak problemler verilmiştir.

Tablo 1. EYM tekniğinde kullanılan üretim parametreleri ve bu parametrelerin ortaya çıkardığı olumsuzluklar

Parametre	Değerlendirme
Nozul sıcaklığı	- Bu parametre katmanlar arası yapışmanın sağlanmasındaki temel parametredir. - Yüksek nozul sıcaklığı hem parçanın boyut ve geometrik toleransını bozmakta hem de talaşlı imalat esnasında kesici takıma yapışma riskini arttırmaktadır. - Düşük nozul sıcaklığında katmanlar arası bağlanma daha zayıf olmakta ve talaşlı imalat sırasında katmanlar arası ayrılma ve çatlama riski yüksektir.
Tabla sıcaklığı	Özellikle bu parametre üretim esnasında ilk katmanın bir sonraki katman ile zayıf bağlantı sağlamasına sebep olmakta ve talaşlı imalat esnasında katman deformasyonu ortaya çıkmaktadır.
Katman kalınlığı	- İnce katman kalınlığında daha homojen bir yapı ve yüzey elde edilmektedir. - Katman kalınlığı artırıldığında ise daha pürüzlü yüzeyler ortaya çıkmaktadır.
Doluluk oranı	- Düşük doluluk oranına sahip parçaların talaşlı imalatında boşluk fazla olmasından kaynaklı titreşim fazla meydana gelmekte ve bu da imalat hassasiyetini olumsuz etkilemektedir. - Yüksek doluluk oranında ise düşük doluluk oranın göre daha stabil bir işleme sağlanır ancak takım aşınmasında artışa sebep olmaktadır.
Baskı hızı	Yüksek hızlı baskılarda katmanlar arası yapışma zayıflamakta ve talaşlı imalat katman ayrılmasına ve çatlamasına sebep olmaktadır.
Soğutma hızı	Yüksek soğutma hızı katmanlar arası ayrılma ve yapının daha gevrek olmasına sebep olmaktadır. Bu da talaşlı imalat sürecini olumsuz etkilemektedir.

2. EKLEMELİ İMALAT SONRASI TALAŞLI İMALAT İŞLEMLERİ

Eİ işlemlerinde kullanılan destek yapıları başta olmak üzere kullanım alanlarına uygun olarak talaşlı imalat işlemlerinden geçmesi gerekmektedir. Bu işlemler eklemeli

imalat süreçlerinin tamamlayıcı bir parçası olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle destek yapılarının temizlenmesi, kullanım alanına göre montaj işlemlerinde kanal açma, delik delme vb. birkaç talaşlı imalat prosesine tabi tutulmaktadır. Bu sayede Eİ ile üretilen farklı parçaların bir araya getirilmesi ve üretilen parçaları işlevselliğinin arttırılabilmesi için arzu edilen tolerans aralıklarında talaşlı imalat işlemleri uygulanabilmektedir. Diğer yandan Eİ üretim yöntemlerinde talaşlı imalatla olduğu gibi farklı üretim parametreleri kullanılmaktadır. Malzeme ekstrüzyonu tekniğinde ise yazdırma hızı, tabla sıcaklığı, ekstrüzyon sıcaklığı, katman yüksekliği gibi parametreler önemlidir. Genel olarak bu parametrelerin uygun olarak kullanılamaması ısıl hasarlara yol açabilmekte ve arzu edilen nihai geometrinin boyutsal özelliklerini ve yüzey kalitelerini değiştirmektedir. Bu nedenle literatürde eklemeli imalat ile üretilen geometrilerin üretim parametrelerine bağlı olarak boyut hassasiyetinde ve yüzey kalitesinde meydana gelen sapmalar ve bozulmaların tespiti için çalışmalar yapılmaktadır. Tezel (2019) EYM tekniği PET-G malzemesi kullanılarak üretimde üretim sıcaklığı ve hızının boyut hassasiyeti üzerindeki etkilerini incelemiştir (Tezel et al. 2019). Kıran et al. (2022) 3 boyutlu yazıcı ile ABS malzemesinden imal edilen parçaların boyut hassasiyetlerini incelemiştir (Kıran et al. 2022). Bahçe et al. (2022) üçlü periyodik minimal yüzey (ÜPMY) tabanlı kafes yapılarının üretiminde boyut hassasiyetini incelemiştir (Bahçe, Emir, and Güler 2022). Bahçe et al. (2022) eklemeli imalatla üretim yönünün parça boyut hassasiyetine etkisini araştırmışlardır (Bahçe, Boyacı, and Güler 2022). Bayraklılar (2024) ABS malzemesi kullanılarak eklemeli imalat ile üretilen parçaların boyut hassasiyet değişimlerini incelemiştir (Bayraklılar 2024).

Literatürde yapılan boyut hassasiyeti çalışmalarında üretim parametrelerinin boyutsal hassasiyet üzerinde etkileri olduğu gözlemlenmektedir Bu boyutsal ve yüzeysel bozulmalar

montaj işlemlerinde belirgin hatalara neden olmaktadır. Bu nedenle Eİ ile üretim sonrası talaşlı imalat işlemlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu talaşlı imalat işlemleri parçaların birbirileri ile uyum halinde çalışabilmesi ve gerekli montaj bağlantılarının yapılabilmesi için tercih edilmektedir. Özellikle Eİ sonrası talaşlı imalat işlemleri için farklı ilerleme hızı, devir sayısı gibi işleme parametreleri kullanılmaktadır. Ayrıca EYM tekniğinde kullanılan serim açısı, yazdırma sıcaklığı, katman kalınlığı gibi parametreler de ele alınmaktadır. Ancak bu parametrelerin delik kalitesine etkisinin araştırılması gerekmektedir. Uygun olmayan işleme parametreleri nedeni ile delik delinmesi sırasında delaminasyon (Baraheni et al. 2024; Sakthi Balan et al. 2023), çapak oluşumu (Emir 2025; Emir et al. 2024), delik yüzey kalitesinde bozulmalar (Mehtedi et al. 2023) gibi sorunlar meydana gelmektedir. Tablo.2’de Eİ sonrası uygulanan talaşlı imalat işlemleri ve karşılaşılan sorunlar verilmiştir.

Tablo 2. EYM tekniği ile üretilen parçalara üretim sonrası uygulanan talaşlı imalat ile ilgili çalışmalar

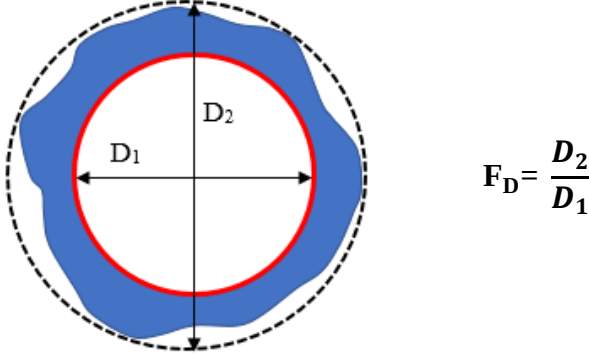
Eİ	Talaşlı imalat	Kusurlar	Kaynak
EYM	Delme	Delaminasyon Yüzey pürüzlülüğü	(Sakthi Balan et al. 2023)
EYM	Delme	Delaminasyon Dairesellikten sapma Toleranstan sapma Yüzey pürüzlülüğü	(Baraheni et al. 2024)
EYM	Delme	Delaminasyon Çapak oluşumu Dairesellikten sapma	(Emir et al. 2024)
EYM	Delme	Çapak oluşumu Dairesellikten sapma	(Emir 2025)
EYM	Frezeleme	Yüzey pürüzlülüğü Çapak oluşumu	(Mehtedi et al. 2023)
EYM	Frezeleme	Yüzey pürüzlülüğü	(El Mehtedi, Buonadonna, El Mohtadi, Aymerich, et al. 2024)
EYM	Frezeleme	Yüzey pürüzlülüğü Çapak oluşumu	(El Mehtedi, Buonadonna, El Mohtadi, Loi, et al. 2024)

2.1. Delaminasyon

Delaminasyon delik delme işlemi esnasında karşılaşılan en yaygın problemlerden biridir. Delme kaynaklı delaminasyon genellikle delik çevresinde olmak üzere giriş ve çıkışında meydana gelir (Geng et al. 2019). Delik delme işlemi sonrası delaminasyona uğrayan en geniş dairenin çapının orijinal delik çapına oranı ile delaminasyon faktörü hesaplanabilmektedir (Şekil.3). Delaminasyon oluşumunda talaşlı imalat işlemlerinde etkin parametreler ilerleme hızı ve devir sayısıdır. Bu parametrelerin değişimi delaminasyon oluşumunda etkin rolü olan itme kuvvetini arttırıp azaltmaktadır. İlerleme hızının artışı daha fazla itme kuvveti oluşmasına neden olur ve delaminasyonu arttırmaktadır (Lotfi, Li, and Dao 2020). İlerleme hızının kontrolü ile birlikte daha düşük itme kuvveti ve daha düşük malzeme katmanları arası deformasyonlar meydana gelir. EYM tekniği ile üretimlerde katman kalınlığı ve yazdırma sıcaklığına bağlı olarak katmanlar arası bağlanma değişkenlik gösterebilmektedir. Delik delme işlemi esnasında işleme parametrelerine bağlı olarak bu katmanlar hasar görmekte ve delaminasyon oluşumunu tetiklemektedir. Ayrıca EYM tekniği ile üretimlerde kullanılan PLA, ABS gibi hammaddeler düşük erime sıcaklığı ve deformasyon sıcaklığına sahiptir. Ayrıca bu hammaddelerin düşük ısı iletkenliğinden dolayı delik delme işleminde hızlı meydana gelen ısı malzemenin kolayca erimesine ve deformasyona sebep olmaktadır (Boy 2022). Özellikle PLA'nın delinmesinde ilerleme hızına bağlı olarak delik girişinde ani ısı oluşumu ile birlikte erime yığılması meydana gelmektedir (Emir 2025). İlerleme hızının artması meydana gelen ısıyı da arttırmakta ve erime yığılma büyüklüğünü de arttırmaktadır. Sonuç olarak delaminasyon oluşumunu arttırmaktadır. Delik çıkışında ise delaminasyon delik kenarlarında yırtılma şeklinde gerçekleşmektedir (Emir 2025). Delik çıkışına doğru kesici takımın talaş kanallarının tıkanması ve optimum kesme

kabiliyetinin azalması nedeni ile kesme işlemi yerine iterek ilerleme şeklinde hareket etmektedir (Emir 2025). Bu durum sonucunda delik çıkışına doğru katmanlar arası ayrılmalardan kaynaklı olarak yırtılmalar gözlemlenmektedir.

Şekil 3. Delaminasyon ölçümü

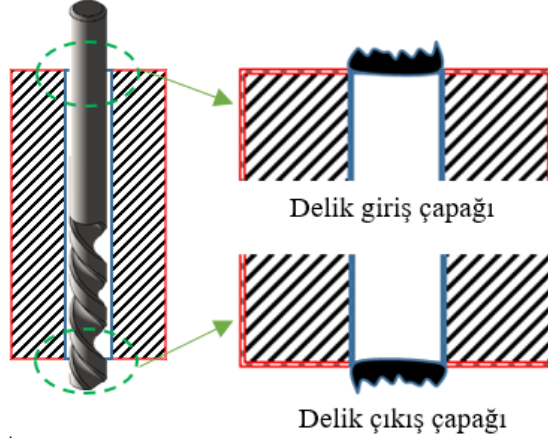


2.2. Çapak Oluşumu

Delik delme işlemlerinde delaminasyon ile bağlantılı şekilde oluşan bir diğer kusur ise çapak oluşumdur. Delaminasyonda olduğu gibi bu kusur delik delme parametrelerine göre değişkenlik göstermektedir ve hem delik girişinde hem de delik çıkışında meydana gelmektedir (Şekil.4). En önemli parametre ilerleme hızının değişimidir. İlerleme hızının artışı ile hem delik girişinde hem de delik çıkışında çapak oluşumu artmakta ve buna bağlı olarak yüksekliği artmaktadır (Emir 2025). Bu durum ilerleme hızının artışı kesici takımın iş parçası üzerinden yeterli oranda talaş kaldırmasına engel olmakta ve kesme işlemi yerine deliği iterek açmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır (Ficici 2021; Yenigun and Kilickap 2021). Ayrıca EYM tekniğinin önemli parametrelerinden biri olan yazdırma sıcaklığı da doğrudan katmanlar arası bağlanmayı etkilediği için çapak oluşumunda kilit rol oynamaktadır. Düşük yazdırma sıcaklığı yeterli oranda katmanlar arası bağlanma

sağlayamazken daha yüksek yazdırma sıcaklıkları katmanlar arası bağlanmada daha etkilidir. Bu nedenle yazdırma sıcaklığının yüksek olması delik delme işleminde meydana gelen çapak oluşumunu ve yüksekliğini azaltmaktadır.

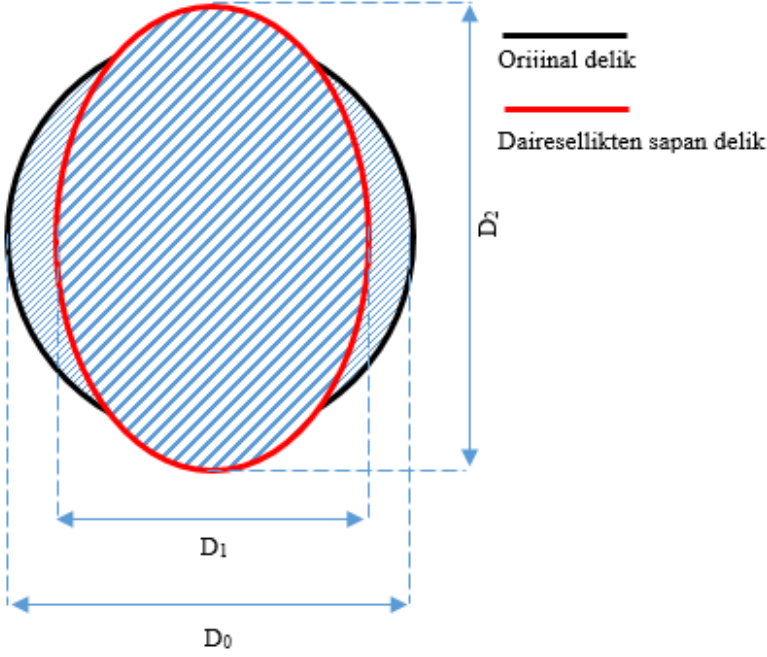
Şekil 4. Delik giriş ve çıkışında çapak oluşumu



2.3. Dairesellikten Sapma

Delik delme işleminde işleme parametrelerine bağlı olarak ortaya çıkan ısı değişkenlik göstermektedir. İlerleme hızının artması dairesellikten sapmayı arttırmaktadır (Baraheni et al. 2024). Özellikle ilerleme hızı birim zamanda kaldırılacak olan talaş miktarını arttırmakta ve optimum kesmenin yapılmasına engel olmaktadır (Karimi et al. 2018). Ayrıca ilerleme hızının artması ile kesme bölgesinde meydana gelen kuvvet ve ısı artmaktadır. Bu artış ile birlikte kesilen talaşlar matkap talaş kanallarından tahliye olmak yerine kesici takıma yapışmaktadır (Emir 2025). Bu durum sonucunda delik orijinal çapı (D_0) delme işlemi sırasında değişkenlik göstererek dairesellikten saparak kısa yarıçapı D_1 ve uzun yarıçapı D_2 olacak biçimde Şekil.5’de gösterildiği gibi elips formuna dönüşmektedir.

Şekil 5. Dairesellikten sapmanın şematik gösterimi



2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

PLA ve ABS gibi polimer esaslı malzemelerin talaşlı imalatında yüzey kalitesi işleme parametrelerine bağlı olarak etkilenen bir diğer özelliktir. Yüzey kalitesinin belirlenmesinde ölçüt alınan esas parametre ise yüzey pürüzlülüğüdür. Bu özellikteki malzemesinin delinmesinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen bazı faktörler vardır. Bunlar ilerleme hızına bağlı olarak değişkenlik gösteren itme kuvveti ve sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak artmaktadır (Madhan Kumar and Jayakumar 2022). Nitekim ilerleme hızının artışı itme kuvvetini arttırmakta hem de birim zamanda kaldırılacak talaş miktarını değiştirerek düzgün bir kesme işleminin oluşmasını engellemektedir (Ni et al. 2022). Ayrıca yüksek ilerleme hızı talaş kaldırmada sıcaklığı da arttırmaktadır (Shard, Gupta, and Garg 2024). Polimer esaslı malzemeler termal özellik bakımından iletkenliği düşüktür (Xu et al. 2020). Bu nedenle delik delme esansında ortaya çıkan ısının

düzgün bir şekilde iş parçası, kesici takım ve çevre arasındaki dağılımı sağlanamamaktadır. Böylece iş parçası üzerinde büyük oranda hapsolan ısı termal hasarlara sebep olur ve talaş kaldırılırken yüzey kalitesini doğrudan etkiler (Boy 2022).

3. GENEL SONUÇLAR

Sonuç olarak yenilikçi bir üretim teknolojisine sahip Eİ yöntemleri kullanıcılar için karmaşık geometrilerin üretiminde oldukça kolaylık sağlamaktadır. Atık madde miktarının daha çevreci olması, hammadde temininin kolay olması gibi artıları bu üretim yöntemini ön plana çıkarmaktadır. Ancak üretim sonrası gerek duyulan talaşlı imalat işlemlerinde karşılaşılan sorunlar yüzey kalitesini ve üretim hassasiyetini bozmaktadır. Özellikle delaminasyon, çapak oluşumu, dairesellikten sapma, yüzey pürüzlülüğünde artış bu problemlerin en başında sıralanabilmektedir. Ortaya çıkan tüm bu problemlerin temelinde ise talaş kaldırma parametrelerinin ve buna bağlı olarak üretim malzemesinde meydana gelen termal hasarların sebep olduğu ortaya konulmuştur. Kusurların daha detaylı irdelenebilmesi açısından EYM tekniği ile üretimlerde doluluk oranı, katman kalınlığı, serim açısı, yazdırma sıcaklığı gibi birçok parametrenin de talaş kaldırmaya etkisinin incelenmesi önemli olarak görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Adel, Mohamed, Osama Abdelaal, Abdelrasoul Gad, Abu Bakr Nasr, and Aboel Makaram Khalil. 2018. "Polishing of Fused Deposition Modeling Products by Hot Air Jet: Evaluation of Surface Roughness." *Journal of Materials Processing Technology* 251:73–82. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.019.
- Antoniac, Iulian, Diana Popescu, Aurelian Zapciu, Aurora Antoniac, Florin Miculescu, and Horatiu Moldovan. 2019. "Magnesium Filled Polylactic Acid (PLA) Material for Filament Based 3D Printing." *Materials* 12(5):719. doi: 10.3390/ma12050719.
- Bahçe, Erkan, Sarkis Boyacı, and Mehmet Sami Güler. 2022. "Eklemeli İmalatta Üretim Yönünün Parça Üretimine Etkileri." *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 12(1):193–203. doi: 10.31466/kfbd.1011338.
- Bahçe, Erkan, Ender Emir, and Mehmet Sami Güler. 2022. "ÜPMY Tabanlı Kafes Yapılarının SLE Yöntemi ile Üretiminde Boyut Hassasiyetinin İncelenmesi Investigation of Dimensional Accuracy in the Production of TPMS-Based Lattice Structures by SLM Method." *Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci* 11(2):372–78. doi: 10.28948/ngmuh.1027480.
- Baraheni, Mohammad, Mohammad Reza Shabgard, Saeid Amini, and Farid Gholipour. 2024. "Experimental Evaluation and Optimization of Parameters Affecting Delamination, Geometrical Tolerance and Surface Roughness in Ultrasonic Drilling of 3D-Printed PLA Thermoplastic." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 0(0):1–30. doi: 10.1177/08927057241264803.

- Bayraklılar, Mehmet Said. 2024. “Dimensional Accuracy of Acrylonitrile Butadiene Styrene Material Produced by Additive Manufacturing Method.” *Journal of Materials Engineering and Performance* 33(5):2531–51. doi: 10.1007/s11665-023-08205-9.
- Boy, Mehmet. 2022. “PEEK-CF30 Termoplastik Malzemenin Delinmesinde Delme Parametrelerinin Etkileri: İtme Kuvveti, Yüzey Pürüzlülüğü ve Delaminasyon.” *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 27(3):570–80. doi: 10.53433/yyufbed.1104700.
- Emir, Ender. 2025. “Investigation of Burr Formation and Circularity Error in Drilling of PLA Produced at Different Printing Temperatures with Machine Learning-Based Prediction.” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 16(2):421–29. doi: 10.24012/dumf.1656898.
- Emir, Ender, Burak Özdemir, Erkan Bahçe, and Gözde Erener. 2024. “Investigation of Delamination in the Drilling of PLA Specimens with Different Lattice Structures.” *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 29(2):708–19. doi: 10.53433/yyufbed.1401574.
- Ficici, Ferit. 2021. “Investigation of Thrust Force in Drilling Polyphthalamide (PPA) Composites.” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 182(June):109505. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109505.
- Geng, Daxi, Yihang Liu, Zhenyu Shao, Zhenghui Lu, Jun Cai, Xun Li, Xinggang Jiang, and Deyuan Zhang. 2019. “Delamination Formation, Evaluation and Suppression during Drilling of Composite Laminates: A Review.” *Composite Structures* 216(February):168–86. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.02.099.

- Karimi, Zarif, H. Heidary, J. Yousefi, S. Sadeghi, and G. Minak. 2018. "Experimental Investigation on Delamination in Nanocomposite Drilling." *FME Transaction* 46(1):62–69. doi: 10.5937/fmet1801062Z.
- Kiran, Kadir, Bahri Şekerci, Kemal Burak Urganci, Yunus Emre Delikanli, and Baki Gezgen. 2022. "Investigation of Dimensional Form Errors of Parts Manufactured with an Industrial 3-Dimensional Printer Using ABS Material." *Gumushane Universitesi Fen Bilimleri Dergisi* 12(4):1046–57. doi: 10.17714/gumusfenbil.1055034.
- Kristiawan, Ruben Bayu, Fitriani Imaduddin, Dody Ariawan, Ubaidillah, and Zainal Arifin. 2021. "A Review on the Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing: Filament Processing, Materials, and Printing Parameters." *Open Engineering* 11(1):639–49. doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- Lotfi, Amirhossein, Huaizhong Li, and Dzung Viet Dao. 2020. "Analytical and Experimental Investigation of the Parameters in Drilling Flax/Poly(Lactic Acid) Bio-Composite Laminates." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 109(1–2):503–21. doi: 10.1007/s00170-020-05668-1.
- Madhan Kumar, A., and K. Jayakumar. 2022. "Mechanical and Drilling Characterization of Biodegradable PLA Particulate Green Composites." *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A* 45(5):437–52. doi: 10.1080/02533839.2022.2061602.
- Mehtedi, Mohamad El, Pasquale Buonadonna, Mauro Carta, Rayane El Mohtadi, Gianluca Marongiu, Gabriela Loi, and Francesco Aymerich. 2023. "Effects of Milling Parameters on Roughness and Burr Formation in 3D-

- Printed PLA Components.” *Procedia Computer Science* 217:1560–69. doi: 10.1016/j.procs.2022.12.356.
- El Mehtedi, Mohamad, Pasquale Buonadonna, Rayane El Mohtadi, Francesco Aymerich, and Mauro Carta. 2024. “Surface Quality Related to Machining Parameters in 3D-Printed PETG Components.” *Procedia Computer Science* 232(2023):1212–21. doi: 10.1016/j.procs.2024.01.119.
- El Mehtedi, Mohamad, Pasquale Buonadonna, Rayane El Mohtadi, Gabriela Loi, Francesco Aymerich, and Mauro Carta. 2024. “Optimizing Milling Parameters for Enhanced Machinability of 3D-Printed Materials: An Analysis of PLA, PETG, and Carbon-Fiber-Reinforced PETG.” *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 8(4). doi: 10.3390/jmmp8040131.
- Mohanavel, V., K. S. Ashraff Ali, K. Ranganathan, J. Allen Jeffrey, M. M. Ravikumar, and S. Rajkumar. 2021. “The Roles and Applications of Additive Manufacturing in the Aerospace and Automobile Sector.” *Materials Today: Proceedings* 47:405–9. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.596.
- Ni, Jing, Xiaotian Zeng, M. S. H. Al-Furjan, Huijun Zhao, Liming Guan, Zhi Cui, and Lidong Han. 2022. “Effect of Drilling Parameters on Machining Performance in Drilling Polytetrafluoroethylene.” *Materials* 15(19). doi: 10.3390/ma15196922.
- Nirish, Mudda, and R. Rajendra. 2020. “Suitability of Metal Additive Manufacturing Processes for Part Topology Optimization – A Comparative Study.” *Materials Today: Proceedings* 27(May):1601–7. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.275.
- Nyamuchiwa, Kudakwashe, Robert Palad, Joan Panlican, Yuan Tian, and Clodualdo Aranas. 2023. “Recent Progress in

- Hybrid Additive Manufacturing of Metallic Materials.” Applied Sciences (Switzerland) 13(14). doi: 10.3390/app13148383.
- Pitjarnit, Siwasit, Kittiya Thunsiri, Wasawat Nakkiew, Tunchanok Wongwichai, Peraphan Pothacharoen, and Wassanai Wattanutchariya. 2020. “The Possibility of Interlocking Nail Fabrication from FFF 3D Printing PLA/PCL/HA Composites Coated by Local Silk Fibroin for Canine Bone Fracture Treatment.” Materials 13(7):1564. doi: 10.3390/ma13071564.
- Sakthi Balan, G., S. Aravind Raj, M. Sridharan, and R. N. Adithya. 2023. “A Study of the Effect of Printing Process Parameters on the Delamination and Surface Finish Properties of Aluminium-Infused PLA Printed via Material Extrusion.” Australian Journal of Mechanical Engineering. doi: 10.1080/14484846.2023.2231131.
- Shard, Abhinav, Vishal Gupta, and Mohinder Pal Garg. 2024. “Rotary Ultrasonic Drilling of Polyetherimide Composite to Enhance the Surface Roughness and MRR: Experimental Investigations and Statistical Approach.” Journal of Thermoplastic Composite Materials. doi: 10.1177/08927057241275637.
- Srivastava, Manu, and Sandeep Rathee. 2022. “Additive Manufacturing: Recent Trends, Applications and Future Outlooks.” Progress in Additive Manufacturing 7(2):261–87. doi: 10.1007/s40964-021-00229-8.
- Tezel, Tuğçe, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, and Türkiye Antalya. 2019. “FDM ile Üretilen PET-G Malzemenin Üretim Sıcaklığı ve Hızının Boyutsal Doğruluğa Etkisi.” International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies 3(2):82–85.

- Xu, Jinyang, Xianghui Huang, J. Paulo Davim, Min Ji, and Ming Chen. 2020. “On the Machining Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polyimide and PEEK Thermoplastic Composites.” *Polymer Composites* 41(9):3649–63. doi: 10.1002/pc.25663.
- Yenigun, Burak, and Erol Kilickap. 2021. “Influence of Hole Quality on Fatigue Life of Drilled CFRP with the Different Ply Orientation Angle.” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 43(1):1–14. doi: 10.1007/s40430-020-02719-2.

BİRİNCİL VE İKİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ KÜRESEL VE BÖLGESEL SÜRDÜRÜLEBİLİR STRATEJİLERİ VE KARBON EMİSYONLARI

Nevfel Yunus COŞKUN¹

1. GİRİŞ

Birincil enerji kaynakları, doğrudan doğadan elde edilen ve işlenmemiş enerji formlarını (kömür, petrol, doğal gaz, nükleer enerji, yenilenebilir kaynaklar vb.) kapsarken; ikincil enerji kaynakları, birincil kaynakların dönüştürülmesiyle elde edilen elektrik, benzin veya hidrojen gibi enerji taşıyıcılarıdır. Literatürde, birincil kaynakların sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri üzerine yapılan (Zhang vd., 2025; Zhang ve Zahoor, 2025; Yang vd., 2025) çalışmalar, fosil yakıtların küresel enerji arzındaki hakimiyetinin iklim değişikliğini tetiklediğini vurgulamaktadır. Öte yandan, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA, 2025) verilerine göre, yenilenebilir enerji kaynaklarının 2023 yılında küresel elektrik üretimindeki payı %30'a ulaşmıştır. Ancak yenilenebilir üretimin kesintili yapısı, şebeke entegrasyonu sırasında ortaya çıkan dengesizlikler ve enerji depolama kapasitesindeki sınırlılıklar, ikincil enerji dönüşüm süreçlerinde önemli verimlilik kayıplarına neden olmaktadır. Enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği, yalnızca birincil kaynakların çeşitlendirilmesine değil, aynı zamanda ikincil enerji teknolojilerinin (akıllı şebekeler, yeşil hidrojen ve enerji

¹ Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, nevfelyunus.coskun@yobu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0464-3818.

depolama çözümleri) entegrasyonuna da bağlıdır. Bu entegrasyon, enerji arz güvenliğini güçlendirmenin yanı sıra düşük karbonlu bir dönüşüm sürecinin gerçekleştirilmesinde de temel bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Jacobson vd., 2019; Abbas vd., 2025).

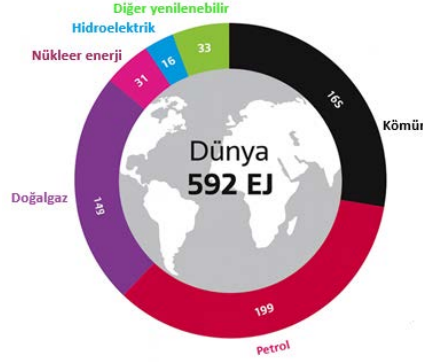
Birincil enerji kaynaklarından kaynaklanan emisyonlar, küresel sera gazı salımlarının büyük bir bölümünü oluşturmakta olup, özellikle fosil yakıtların (kömür, petrol, doğal gaz) yakılması, enerji sektöründeki karbon yoğunluğunun temel nedenidir (IPCC, 2022). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA, 2024) verilerine göre, elektrik ve ısı üretimi, küresel karbondioksit (CO₂) emisyonlarının %40'ından sorumludur ve bu emisyonların büyük kısmı, birincil kaynakların doğrudan yakımından kaynaklanmaktadır. İkincil enerji kaynakları ise dönüşüm süreçlerinde verimlilik kayıpları ve enerji yoğunluğu nedeniyle dolaylı emisyonlara yol açmaktadır; örneğin, elektrik üretiminde kömürden elde edilen enerjinin kWh başına emisyon değeri, rüzgar veya güneş enerjisine kıyasla 10-15 kat daha yüksektir (Eygü ve Kılınç, 2021). Akademik çalışmalar, karbonsuzlaştırma için birincil kaynaklarda yenilenebilir enerji payının artırılması ve ikincil enerji sistemlerinde elektrifikasyon ile karbon yakalama teknolojilerinin yaygınlaştırılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır (Davis vd., 2018).

2. KITASAL DÜZEYDE ENERJİ KAYNAKLARI

Kıtasal düzeyde enerji kaynaklarının dağılımı, coğrafi zenginlikler, teknolojik gelişmişlik ve politik tercihler nedeniyle önemli farklılıklar göstermektedir. Avrupa, sınırlı fosil yakıt rezervleri nedeniyle enerjide büyük ölçüde ithalata bağımlıdır; kıtanın enerji tüketiminde fosil yakıtların payı giderek azalmakta ve 2023'te ilk kez %70'in altına inmiştir. Bu eğilimi desteklemek üzere Avrupa ülkeleri yenilenebilir enerjiye yatırımlarını

artırarak dışa bağımlılığı azaltmaya çalışmaktadır. Kuzey Amerika ise zengin petrol ve gaz kaynakları sayesinde son yıllarda net enerji ihracatçısı haline gelmiş, bol ve ucuz enerji arzıyla ekonomisine rekabet avantajı sağlamıştır. Asya-Pasifik bölgesi (özellikle Çin ve Hindistan), hızla artan enerji talebini büyük ölçüde kömür ve petrole dayalı olarak karşılamakta ve dünya enerji tüketiminin neredeyse yarısını tek başına gerçekleştirmektedir. Nitekim Çin, dünya kömür tüketiminin geri kalanının toplamından daha fazla kömür yakarken Hindistan'ın kömür kullanımı da artık Avrupa ve Kuzey Amerika'nın toplamını aşmıştır. Bu yoğun fosil yakıt kullanımı Asya ekonomilerine hızlı büyüme getirirken çevresel maliyetleri de artırmaktadır (García-Riazuelo vd., 2025;).

Orta Doğu, devasa petrol ve doğal gaz rezervleri sayesinde küresel enerji arzında kritik bir rol oynamakta ve bölge ekonomileri büyük ölçüde petrol ihracat gelirlerine dayanmaktadır. Afrika kıtası ise düşük kişi başı enerji tüketimi ve kısıtlı modern enerji erişimi ile karakterize olup, çok zengin güneş ve rüzgâr potansiyeline rağmen bu kaynakları yeterince kullanamamaktadır. Latin Amerika (Güney ve Orta Amerika) bölgesi, elektrik üretiminde hidroelektrik gibi yenilenebilir enerjilerin yüksek payı (%70'in üzerinde) sayesinde temiz bir enerji profiline sahiptir; ancak bazı ülkelerin ekonomileri hâlâ petrol ve gaz ihracatıyla önemli gelir elde etmektedir. Her kıtanın baskın enerji kaynakları ve bunların ekonomiyle ilişkisi, o bölgenin coğrafi kaynak zenginliği, teknoloji düzeyi ve politik tercihleriyle doğrudan bağlantılıdır ve enerji sektörü kıtasal ekonomilerin yapısını ile büyümesini şekillendiren temel bir faktördür (IEA, 2023; BP Statistical Review, 2022).

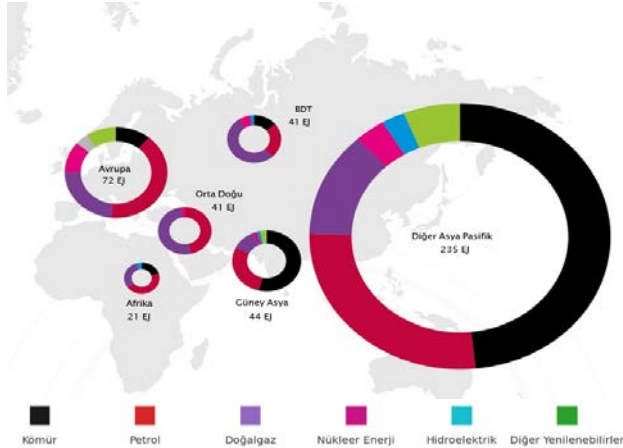


Şekil 1. Küresel ölçekte enerji türlerinin karşılaştırması (Energy Institute, 2025)

Şekil 1’de küresel ölçekte farklı kaynakların sahip olduğu paylar verilmiştir. Şekil 1’e göre, fosil yakıtlar hâlâ dünya enerji tüketiminin baskın bileşeni olup, toplam talebin yaklaşık %80’ini karşılamaktadır. Bu kaynaklar arasında petrol birincil enerji kaynağı konumunu korurken, kömür ve doğal gaz küresel talebin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır (Zhang ve Zahoor, 2025). Buna karşın, son yıllarda hızlı bir artış kaydeden rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar, elektrik üretimindeki paylarını önemli ölçüde artırarak enerji dönüşümünün ivmelendiğini göstermektedir (Kim vd., 2025). Nükleer enerji ise daha sınırlı bir paya sahip olmasına rağmen, düşük karbon yoğunluğu nedeniyle enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik stratejilerinde tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Bu tablo, fosil yakıtların hâkimiyetinin devam etmesine rağmen, yenilenebilir kaynakların küresel enerji dengesi içerisindeki yerinin giderek güçlendiğini ve uzun vadede karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynayacağını ortaya koymaktadır (Energy Institute, 2025; Nighoskar vd., 2025).

2.1. Avrupa, Asya, Afrika, Orta Doğu, Avustralya ve Asya-Pasifik Bölgesi

Antarktika dışında, her kıtanın enerji karması, ekonomik ve çevresel önceliklerine göre şekillenmektedir. Avustralya ve Okyanusya, kömür ve doğal gaz ihracatına bağımlı olmakla birlikte, özellikle Avustralya’da güneş enerjisi kapasitesi hızla genişlemektedir. Orta Doğu, dünyanın en büyük petrol ve doğal gaz rezervlerine sahip olması nedeniyle enerji üretiminde fosil yakıtların payı %90’ın üzerindedir, ancak Suudi Arabistan ve Birleşik Arap Emirlikleri gibi ülkeler güneş enerjisine yönelik iddialı projeler başlatmıştır. Rusya’nın hakim olduğu Avrasya bölgesi ise doğal gaz ve nükleer enerji açısından stratejik bir konumdadır. Küresel ölçekte, enerji geçiş sürecinin kıtalar arasında asimetrik ilerlediği görülmekte; gelişmiş ekonomiler temiz enerjiye yönelirken, gelişmekte olan ülkeler enerji güvenliği ve ekonomik büyüme arasında denge kurmak zorunda kalmaktadır (IRENA, 2023; Enerdata, 2022). Bu farklılıklar, küresel emisyon azaltım hedeflerine ulaşmada koordineli politikaların önemini ortaya koymaktadır (García-Riazuelo vd., 2025).



Şekil 2. Enerji Türlerine göre Avrupa, Asya, Afrika, Orta Doğu, Avustralya ve Asya-Pasifik Bölgesi (Energy Institute, 2025)

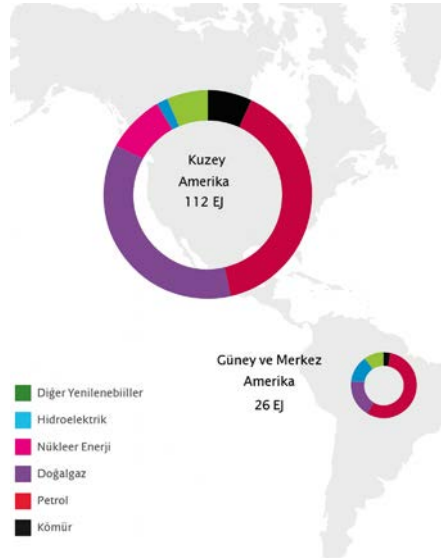
Şekil 2, Avrupa, Asya, Afrika, Orta Doğu, Avustralya ve Asya-Pasifik bölgelerinin enerji karmasındaki kaynak türlerinin dağılımını renk kodları aracılığıyla karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktadır. Avrupa’da enerji tüketiminde en yüksek payı doğal gaz ve nükleer enerjiye aitken, kömür ve petrol tüketimi daha düşük seviyede kalmıştır. Asya’da kömür temel enerji kaynağı olarak öne çıkarken, nükleer ve yenilenebilir enerjinin oranı oldukça sınırlı kalmıştır. Afrika’da petrol tüketimi baskın konumda bulunurken, nükleer enerji ve doğal gaz kullanımının en düşük seviyelerde olduğu görülmektedir (Energy Institute, 2025; Yang vd., 2025). Orta Doğu’da petrol ve doğal gaz mutlak üstünlüğe sahipken, yenilenebilir enerji ve nükleer payı yok denecek kadar azdır. Asya-Pasifik bölgesinde ise kömür ve doğal gaz ön plana çıkmakta, nükleer ve hidroelektrik kaynakların ise en düşük paya sahip olduğu görülmektedir (Yang vd., 2025).

2.2. Kuzey ve Güney Amerika

Amerika kıtası, zengin ve çeşitli enerji kaynaklarıyla küresel enerji sisteminde stratejik bir konumdadır. Kuzey Amerika, Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Kanada ve Meksika’dan oluşmaktadır ve küresel enerji tüketiminin önemli bir kısmını karşılamaktadır. 2024 yılında bölgenin toplam enerji talebi 112 EJ olarak kaydedilmiştir. Bu talep, büyük ölçüde petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. ABD’nin kaya petrolü ve kaya gazı üretimi, bölgeyi enerji bağımsızlığı hedeflerine yaklaştırmıştır. 2024’te ABD, günde 20 milyon varili aşan bir petrol üretimiyle küresel liderliğini sürdürmüştür. Ancak bu yüksek fosil yakıt üretimi, çevresel riskleri ve karbon emisyonlarını da beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, Kuzey Amerika’da yenilenebilir enerjiye yönelik önemli yatırımlar da yapılmaktadır. Enerji Enstitüsü (Energy Institute, 2025) raporu incelendiğinde, bölgenin enerji portföyünde hidroelektrik ve diğer yenilenebilir kaynakların payının giderek arttığını göstermektedir. ABD’deki yenilenebilir enerji

tesislerinin kurulması, ülkenin enerji ihtiyacını büyük ölçüde kendi içinde karşılamasına olanak sağlamaktadır. Ancak, bölgenin enerji dönüşüm hızı, enerji politikasındaki kapitalist sınıf fraksiyonları arasındaki çatışmalar nedeniyle yavaşlayabilmektedir. Küresel emisyon hedefleri doğrultusunda, Kuzey Amerika'da enerji verimliliğini artırmak ve yenilenebilir enerjiye daha fazla yatırım yapmak kritik öneme sahiptir (Friedland vd., 2025).

Güney ve Orta Amerika coğrafi olarak Latin Amerika olarak da adlandırılır ve Karayipler çoğu zaman bu bölgeye dahil edilir. Orta Amerika ülkeleri Belize, Kosta Rika, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nikaragua ve Panama'dır. Güney Amerika ülkeleri ise Arjantin, Bolivya, Brezilya, Şili, Kolombiya, Ekvador, Guyana, Paraguay, Peru, Surinam, Uruguay ve Venezuela'dan oluşmaktadır. Güney ve Orta Amerika, Kuzey Amerika'ya kıyasla daha düşük bir enerji talebine sahiptir (26 EJ) (Movsessian vd., 2025).



Şekil 3. Enerji Türlerine göre Kuzey ve Güney Amerika Bölgesi (Energy Institute, 2025)

Şekil 3, Kuzey Amerika ile Orta ve Güney Amerika bölgelerinin enerji kaynaklarına göre dağılımını göstermektedir. Kuzey Amerika’da petrol ve doğal gazın toplamdaki payı oldukça yüksektir. Bu durum, ABD, Kanada ve Meksika’nın zengin fosil yakıt rezervleri ve üretim kapasiteleriyle doğrudan bağlantılıdır. Bölge aynı zamanda kömür ve nükleer enerjiyi de kayda değer oranlarda kullanmakta, bu kaynaklar sanayi üretimi ve enerji arzının sürekliliğinde rol oynamaktadır. Güney ve Orta Amerika’da ise hidroelektrik enerji belirgin bir baskınlığa sahiptir. Brezilya’nın geniş hidrolojik kapasitesi ve Paraguay gibi ülkelerin elektrik üretiminde yüksek oranda hidroelektriğe bağımlı olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Bölgenin enerji yapısında petrolün varlığı da belirgindir; özellikle Venezuela ve Kolombiya, yüksek rezervleri ve ihracat odaklı üretimleri nedeniyle bu kaynakta öne çıkmaktadır. Genel olarak Kuzey Amerika’da fosil yakıtların ağırlığı, Güney ve Orta Amerika’da ise yenilenebilir nitelikli hidroelektrik kullanımı kıtasal farklılaşmayı belirginleştirmektedir (Energy Institute, 2025; Adham vd., 2025).

3. ENERJİ TÜRLERİNE GÖRE KÜRESEL KARŞILAŞTIRMALAR

Küresel enerji talebinin yıllar içinde artış göstermesi ve enerji kaynaklarının dağılımındaki değişim, dünya enerji sisteminin yapısını belirleyen temel dinamikler arasında yer almaktadır. Enerji Enstitüsü (Energy Institute, 2025) raporuna göre 2024 yılında küresel toplam enerji talebi %2 artışla 592 EJ seviyesine ulaşmıştır. Petrol, %34’lük pay ile küresel enerji sisteminde en büyük birincil kaynak olmaya devam etmiştir. Günlük ortalama tüketim 101 milyon varil düzeyine çıkarak ilk kez bu seviyeyi aşmıştır. ABD küresel üretimin beşte birini karşılayarak dünyanın en büyük üreticisi konumunu sürdürmüş,

Suudi Arabistan ve Rusya'nın toplam üretimine eşit bir miktar üretim gerçekleştirmiştir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) dışı ülkelerde petrol talebi artmaya devam ederken OECD ülkelerinde talep sabit kalmıştır. Bu durum küresel petrol piyasasında talep merkezlerinin Asya ve Afrika'ya kaydığını göstermektedir (Bera vd., 2025; Wang vd., 2025).

Kömür tüketimi 165 EJ ile rekor seviyeye ulaşmış, bunun %83'ü Asya-Pasifik bölgesinde gerçekleşmiş ve tek başına Çin dünya kömür tüketiminin %67'sini oluşturmuştur. Avrupa'da ise kömür tüketimi %7 düşerek uzun dönemli azalma eğilimini sürdürmüştür. Buna karşın Hindistan'ın kömür talebi %4 artmış ve küresel ölçekte kömürün enerji arzındaki baskın rolünü sürdürdüğü görülmüştür (Bera vd., 2025; Wang vd., 2025).

Doğal gaz küresel enerji arzının yaklaşık dörtte birini karşılamış ve toplam payı %29 olmuştur. 2024 yılında gaz talebi %2,5 artışla 101 milyar metreküplük ek tüketim oluşturmuştur. Bu artış en çok Asya-Pasifik bölgesinde gözlenmiş, artışın üçte ikisi Çin'den kaynaklanmıştır. ABD, Rusya, İran ve Çin toplam üretimin %53'ünü karşılamış ve küresel doğal gaz üretimi 4.124 milyar metreküpe yükselmiştir. OECD ülkelerinde gaz talebi nispeten durağan seyrederken OECD dışı bölgelerde hızlı bir artış kaydedilmiştir (Bera vd., 2025; Wang vd., 2025).

Nükleer enerji 2024 yılında küresel talebin %5'inden biraz fazlasını karşılamış ve üretim %3 artış göstermiştir. Artışın büyük bir bölümü Fransa ve Japonya'daki santrallerin yeniden devreye alınmasından kaynaklanmıştır. Avrupa'da kömürün toplam enerji üretimindeki katkısı ilk kez nükleer enerjinin altına düşmüş, bu durum enerji dönüşümünde düşük karbonlu kaynakların önemini ortaya koymuştur (Bera vd., 2025; Wang vd., 2025).

Hidroelektrik santralleri 2024 yılında toplam küresel elektrik üretiminin %14'ünü karşılamıştır. Özellikle Kuzey

Amerika ve Avrupa’da üretim %2,2 ve %1,5 oranında artmış, küresel üretim 16.132 TWh seviyesine ulaşmıştır. Çin’in üç boğaz barajı gibi büyük kapasiteli santraller küresel artışta belirleyici olmuştur. Hidroelektrik, toplam yenilenebilir enerji üretiminde %45 pay ile en büyük kaynak olmayı sürdürmüştür (Bera vd., 2025; Wang vd., 2025).

Rüzgar ve güneş enerjisi son on yılda dört kat büyüyerek 2024 yılında toplam küresel elektrik üretiminin %15’ini karşılamıştır. Rüzgar üretimi toplamın %55’ini, güneş üretimi %45’ini oluşturmuştur. Kurulu güç bakımından güneş enerjisi 1.865 GW seviyesine ulaşarak rüzgarın 1.135 GW kapasitesini aşmıştır. Çin bu alanda küresel artışın %57’sini sağlamış ve dünya genelinde toplam kapasitenin %47’sine sahip olmuştur. Avrupa Birliği’nde elektrik üretiminin %28’i rüzgar ve güneşten sağlanmıştır. Güneş enerjisinin ilk kez kömürü geride bırakması enerji dönüşümünde önemli bir eşik olarak kaydedilmiştir (Bera vd., 2025; Wang vd., 2025).

Biyoyakıt talebi 2024 yılında %3 artarak günlük 2,2 milyon varile ulaşmış ve rekor kırmıştır. En büyük artış Asya-Pasifik bölgesinde yaşanmış, Kuzey Amerika ikinci sırada gelmiştir. ABD 899 bin varil/gün tüketim ile dünyanın en büyük biyoyakıt tüketicisi olmuş, Brezilya 432 bin varil/gün ile ikinci sırayı almıştır. Hindistan ve Endonezya bölgesel talebin %63’ünü karşılamış ve biyoyakıt tüketiminde öne çıkmıştır (Russo vd., 2025).

Enerjiyle ilişkili karbon emisyonları 2024 yılında %1 artışla 40,8 gigaton karbondioksit (GtCO₂) seviyesini aşarak rekor düzeye ulaşmıştır. Çin küresel emisyonların üçte birinden sorumlu olmuştur. Son on yılda yenilenebilir enerji ve nükleer enerji sayesinde 1.371 EJ fosil yakıt kullanımından ve 110 gigaton sera gazı salımından kaçınılmıştır. Bu veriler, düşük ve sıfır karbonlu enerji yatırımlarının küresel ölçekte çevresel

faydalar sağladığını ortaya koymaktadır. Küresel enerji sisteminin yapısı, farklı bölgelerin kaynak zenginliği, teknolojik kapasitesi ve politik tercihlerine bağlı olarak çeşitlenmektedir. Fosil yakıtlar halen sistemin temelini oluşturmakla birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları ve düşük karbonlu teknolojilerin payı hızla artmaktadır (Bera vd., 2025; Wang vd., 2025).

4. KÜRESEL ÖLÇEKTE ALTERNATİF ENERJİ ÜRETİMİ VE TÜKETİMİ

Alternatif enerji üretimi küresel enerji sisteminin düşük karbonlu dönüşümünde giderek daha kritik bir rol üstlenmektedir. Enerji Enstitüsünün (Energy Institute, 2025) 2025 verilerine göre 1990 yılında küresel enerji arzının yalnızca %3'ünü oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarının payı günümüzde %30'un üzerine çıkmıştır. Bu artış, özellikle rüzgar ve güneş enerjisindeki hızlı kurulu güç genişlemesinden kaynaklanmaktadır. 2024 yılında toplam kurulu güneş kapasitesi %32 artarak 1.865 GW seviyesine ulaşırken rüzgar kapasitesi %11 artışla 1.135 GW olmuştur. Bu iki kaynağın oluşturduğu toplam artış 585 GW ile küresel ölçekte rekor düzeye ulaşmıştır. Bu kapasite genişlemesi, küresel elektrik üretiminin yaklaşık %15'inin rüzgar ve güneşten sağlanmasını mümkün kılmıştır. Hidroelektrik dahil edildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimindeki payı %31'e ulaşmıştır (Pata vd., 2025).

Bölgesel olarak bakıldığında Asya-Pasifik bölgesi yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımların %60'ından fazlasını gerçekleştirerek bu dönüşümde öncü konuma gelmiştir. Çin tek başına 2024 yılında küresel yenilenebilir kapasite artışının %57'sini karşılamış ve toplam kapasitenin %47'sine sahip olmuştur. Avrupa'da rüzgar ve güneş kaynaklı elektrik üretiminin toplam elektrik üretimindeki payı %28'e yükselmiş, Kuzey Amerika'da ise hidroelektrik ve biyoyakıt destekli çeşitlilikle

yenilenebilir enerjinin payı artmaya devam etmiştir. Güney Amerika’da Brezilya biyoyakıt üretiminde öncü konumunu sürdürmüş, Paraguay elektrik ihtiyacının neredeyse tamamını hidroelektrikten karşılamıştır. Afrika’da ise güneş enerjisi potansiyeli yüksek olmasına rağmen altyapı eksiklikleri nedeniyle kapasite sınırlı kalmıştır (Hassan vd., 2025).

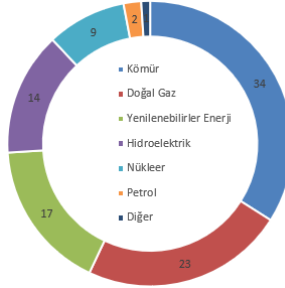
Yenilenebilir enerjiye geçişin küresel ölçekte önemli bir sonucu fosil yakıt kullanımından kaçınılmasıdır. 2010 yılından bu yana yenilenebilir ve nükleer enerji toplamda 1.371 EJ fosil yakıt tüketimini ve 110 GtCO₂ eşdeğer emisyonu önlemiştir. 2024 yılında sadece Çin’in katkısıyla kaçınılan fosil yakıt kullanımının küresel toplam içindeki payı %43’e ulaşmıştır. Avrupa %21 ve Kuzey Amerika %20 pay ile bu sürece önemli katkıları sağlamıştır. Bu gelişmeler, enerji dönüşümünün iklim değişikliğiyle mücadelede somut kazanımlar oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca düşük ve sıfır karbonlu enerji yatırımları, küresel enerji sistemini %7 oranında daha verimli hale getirmiştir (Jung vd., 2025).

Biyoyakıtlar da alternatif enerji kaynakları içinde öne çıkmaktadır. 2024 yılında küresel biyoyakıt üretimi %8’in üzerinde artmış, ABD toplam üretimin %37’sini karşılayarak en büyük üretici olmuştur. Brezilya ve Avrupa Birliği ülkeleriyle birlikte bu üç bölge toplam küresel biyoyakıt tüketiminin %75’ini gerçekleştirmiştir. Bu gelişme özellikle ulaşım sektöründe fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması açısından önemlidir (Chouksey vd., 2025).

Alternatif enerji kaynaklarının hızla yaygınlaşması enerji güvenliği üzerinde de etkili olmuştur. Rüzgar, güneş, hidro ve jeotermal gibi yerli kaynaklar ülkelerin fosil yakıt ithalatına olan bağımlılığını azaltmakta, enerji arzının sürekliliğini artırmakta ve enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı koruma sağlamaktadır. Bununla birlikte değişken yenilenebilir üretimin elektrik

şebekesine entegrasyonu frekans kontrolü, voltaj dengesi ve yedek kapasite gereklilikleri açısından yeni teknik çözümler talep etmektedir. Bu noktada enerji depolama teknolojileri, akıllı şebekeler ve talep yönetimi uygulamaları yenilenebilir entegrasyonunun temel tamamlayıcıları olarak öne çıkmaktadır (Han vd., 2025).

Sonuç olarak küresel ölçekte alternatif enerji üretimi ve tüketimi, yalnızca iklim değişikliği ile mücadelede değil aynı zamanda enerji güvenliği, ekonomik istikrar ve toplumsal refahın sürdürülebilirliğinde de merkezi bir rol oynamaktadır. Fosil yakıt bağımlılığının azaltılmasıyla emisyonların sınırlandırılması, yerli kaynakların kullanımının artmasıyla enerji bağımsızlığının güçlendirilmesi ve teknolojik yeniliklerle verimliliğin yükseltilmesi dünya toplumunun ortak yararına sahiptir. Bu nedenle alternatif enerji yatırımları hem ülkelerin uzun vadeli stratejilerinde hem de küresel enerji sisteminin geleceğinde vazgeçilmez bir öncelik olarak önemini korumaktadır (Jung vd., 2025).



Şekil 4. 2024 yılının küresel elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı (Energy Institute, 2025)

2024 yılında küresel elektrik üretiminin %40'ından fazlası düşük ve sıfır karbonlu kaynaklardan sağlanmıştır. Elektrik üretiminde kömür %34, doğal gaz %23, hidroelektrik %14, yenilenebilir enerji %17, nükleer %9 ve petrol %2 oranında pay almıştır. Bu dağılım, elektrik üretiminde karbonlu enerji

kaynakların hâlâ yüksek paya sahip olduğunu göstermektedir. Nükleer enerji üretimindeki %9'luk oran, özellikle Fransa ve Japonya'daki santrallerin yeniden devreye girmesiyle güçlenmiştir. Hidroelektrik toplam elektrik arzının %14'ünü karşılayarak en büyük yenilenebilir kaynak konumunu sürdürmüş, rüzgar ve güneşin kapasite artışlarıyla birlikte yenilenebilir enerji toplamda %17'ye ulaşmıştır. Bu gelişme, elektrik sektöründe dönüşümün hızlandığını ancak fosil yakıtların %59'luk toplam payla hâlen belirleyici konumda olduğunu ortaya koymaktadır. Küresel ölçekte elektrik üretiminde düşük karbonlu kaynakların artan payı, emisyonların azaltılması ve iklim hedeflerine yaklaşılması açısından önemli bir kazanımdır. Elektrik üretiminde karbonsuzlaşmanın ilerlemesi, enerji güvenliği ve ekonomik istikrarın sürdürülmesi bakımından stratejik önem taşımakta ve enerji politikalarının odağında yer almaktadır (Energy Institute, 2025; Su vd., 2025).

Tablo 1. 2024 yılı Küresel Enerji Büyüme Eğilimleri (EI,2025)

Toplam Enerji Talebi	592 EJ (Rekor)
Toplam Enerji Talebi Büyümesi	%2
Elektrik Talebi Büyümesi	%4
Yenilenebilir Kapasite Artışı	585 GW (Rekor)
Yenilenebilir Enerji Büyümesi	%16
Fosil Yakıt Tüketimi Büyümesi	>%1 (Rekor)
Elektrik Üretiminde Fosil Yakıt Payı	> %50

Tablo 1, metinde ele alınan ve enerji geçişinin karmaşık yapısını özetleyen temel verileri karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Bu tablo, yenilenebilir enerji kapasitesindeki rekor artışın (%16), hızla yükselen toplam enerji talebi (%2) ve elektrik talebi (%4) ile nasıl bir denge içinde olduğunu açıkça göstermektedir. Bu denge, fosil yakıt tüketiminin aynı dönemde rekor seviyelere ulaşmasının nedenlerini ortaya koyarak, enerji sisteminde yenilenebilir büyüme ile fosil yakıt artışının eşzamanlı gerçekleştiğini göstermektedir (EI,2025).

5. YENİLENEBİLİR ENERJİ VE KARBON EMİSYONLARI İLİŞKİSİ

Birincil enerji kaynaklarının çevresel etkilerini değerlendirirken yalnızca yakıtın yanmasıyla ortaya çıkan emisyonların değil, aynı zamanda tüm yaşam döngüsü boyunca salınan sera gazlarının dikkate alınması önem taşımaktadır. Karbon yoğunluğu kavramı, enerji kaynaklarının çevresel etkilerinin ölçülmesinde temel bir gösterge olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji teknolojilerinin fosil yakıtlara kıyasla yaşam döngüsü emisyonlarının çok daha düşük olduğu bilinmektedir. Hidroelektrik santrallerin yaşam döngüsü karbon eşdeğeri yoğunluğu ortalama 18,5 gCO₂-eq/kWh düzeyindeyken kömür santrallerinde bu değer 820 gCO₂-eq/kWh'ye ulaşmaktadır. Bu fark, yenilenebilir enerji kaynaklarının karbon emisyonlarını %95'in üzerinde azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Rai vd., 2025).

Tablo 2. Enerji Kaynaklarına Göre Yaşam Döngüsü Karbon Yoğunluğu (Hsu vd., 2012; Bruckner vd., 2014)

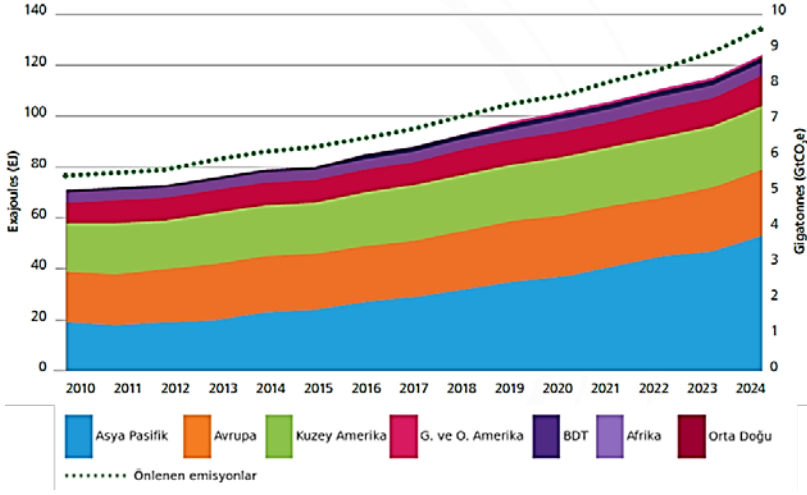
Enerji Kaynağı	Yaşam Döngüsü Karbon Yoğunluğu (gCO ₂ -eq/kWh)
Kömür	820
Doğal Gaz	500 (Yaklaşık)
Petrol	650 (Yaklaşık)
Hidroelektrik	18.5
Rüzgâr	< 18.5
Güneş (PV)	40-50 (Yaklaşık)

Tablo 2, farklı birincil enerji kaynaklarının birim enerji başına düşen yaşam döngüsü karbon yoğunluğunu karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Tablo incelendiğinde fosil yakıtlar arasında kömürün en yüksek karbon yoğunluğuna sahip olduğu, petrol ve doğal gazın ise daha düşük olmakla birlikte yüksek emisyon değerleriyle öne çıktığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde hidroelektrik ve rüzgar en düşük karbon yoğunluğu ile dikkat çekmekte, rüzgarın 18,5 gCO₂-eq/kWh'nin

de altında bir değere sahip olması onu en düşük yaşam döngüsü emisyonu üreten enerji türü konumuna getirmektedir. Güneş fotovoltaik sistemlerinin emisyon değerleri hidroelektrik ve rüzgarın üzerinde olmakla birlikte, fosil yakıtlara göre oldukça düşük kalmaktadır. Bu farklılıklar, enerji türleri arasında karbon yoğunluğunun değişkenlik gösterdiğini ve yenilenebilir kaynakların çevresel sürdürülebilirlik açısından belirgin bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır (Hsu vd., 2012; Bruckner vd., 2014).

EI (2025), verileri incelendiğinde, 2024 yılında küresel enerji talebi 592 EJ seviyesine ulaşmış ve bir önceki yıla göre %2 oranında artış göstermiştir. Aynı dönemde küresel karbon emisyonları %1 yükselerek 40,8 GtCO₂e seviyesine ulaşmış ve 2023 yılında kaydedilen rekor düzeyin üzerine çıkmıştır. Emisyonların %87'si fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanmış, geri kalan kısmı endüstriyel süreçler, metan salımı ve gaz yakma faaliyetlerinden oluşmuştur. Fosil yakıtların toplam enerji arzındaki baskın konumu, küresel emisyonlardaki artışın temel belirleyicisi olmuştur.

Bölgesel açıdan incelendiğinde Kuzey Amerika'nın 2024 yılında toplam 111,7 EJ enerji arzına karşılık 5,6 GtCO₂ emisyonuna sahip olduğu görülmektedir. ABD 91,8 EJ enerji arzı ile bölgenin en büyük enerji üreticisi ve tüketicisi olurken, emisyonlarını %0,7 azaltmayı başarmıştır. Avrupa'da toplam enerji arzı 71,6 EJ seviyesinde gerçekleşmiş, karbon emisyonları ise son on yılda %16 oranında azalma göstermiştir. Asya-Pasifik bölgesi 279 EJ ile küresel enerji arzının %47'sini oluşturmuş ve emisyonların en büyük payını üretmiştir. Çin tek başına 158,9 EJ enerji arzıyla küresel enerji sisteminin yaklaşık dörtte birini karşılamış, buna karşılık karbon yoğunluğu yüksek bir üretim yapısı nedeniyle emisyonların da en büyük kaynağı olmuştur (Zhang vd., 2025).



Şekil 5. 2010-2024 yılları için bölgelere göre kaçınılan emisyonlar ve fosil yakıt kullanımı (Energy Institute, 2025)

Şekil 5'te 2010–2024 döneminde bölgeler itibarıyla yenilenebilir enerji ve nükleer yatırımlar sayesinde kaçınılan emisyonlar ve fosil yakıt kullanımı gösterilmektedir. Grafik, küresel ölçekte 1.371 EJ fosil yakıt kullanımının önlendiğini ve 110 GtCO₂ eşdeğer emisyonun engellendiğini ortaya koymaktadır. Bölgesel olarak Asya-Pasifik en yüksek katkıyı sağlamış, 2024 yılı itibarıyla küresel toplamın %43'ünü oluşturmuştur. Avrupa %21 ve Kuzey Amerika %20 pay ile emisyon azaltımında ikinci ve üçüncü sırada yer almıştır. Güney ve Orta Amerika, hidroelektrik ağırlıklı üretim yapısıyla istikrarlı katkı sunarken, Orta Doğu ve Afrika'nın katkısı daha sınırlı kalmıştır. Bu dağılım, yenilenebilir enerji yatırımlarının bölgesel farklılıklar gösterdiğini ve düşük karbonlu enerjiye geçişin en çok Asya-Pasifik bölgesinde hız kazandığını göstermektedir. Grafik ayrıca, nükleer ve yenilenebilir yatırımların yalnızca elektrik üretiminde değil, aynı zamanda fosil yakıt talebinin ikame edilmesi yoluyla emisyonların azaltılmasında kritik bir işlev üstlendiğini vurgulamaktadır (Energy Institute, 2025; Kumari vd., 2025)

Yenilenebilir enerji yatırımlarının emisyon azaltımında sağladığı bu kazanımların kalıcı olabilmesi, söz konusu kaynakların şebeke sistemine güvenilir biçimde entegre edilmesine bağlıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu, özellikle değişken ve kesintili doğaları nedeniyle bazı teknik zorluklar yaratmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin mevsime, hava koşullarına ve günün saatine bağlı olarak dalgalanması, şebekenin istikrarını korumak için enerji depolama çözümlerini zorunlu hale getirmektedir. Bu sorunların çözümü için, batarya depolama sistemleri, yeşil hidrojen uygulamaları ve akıllı şebekeler gibi yeni nesil teknolojiler öne çıkmaktadır. Elektrik şebekelerine esneklik ve denge sağlayan bu teknolojiler, temiz enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda şebekenin güvenilirliğini de artırmaktadır. Merkezi invertör istasyonları gibi gelişmiş sistemler, yüksek verimlilik sunarken, enerji yönetim sistemleri ve uluslararası iş birlikleri, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını ve adaptasyonunu hızlandırmaktadır. Bu teknolojik ilerlemeler, yenilenebilir enerjinin yalnızca çevresel faydalar sunmakla kalmayıp, aynı zamanda modern enerji altyapılarının ayrılmaz bir parçası olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, şebeke entegrasyonuna yönelik bu teknik çözümler, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik tamamlayıcı stratejilerin hayata geçirilmesi açısından kritik bir köprü işlevi üstlenmektedir (Yılmaz ve Çavuş, 2017; Zhang vd., 2025).

Karbon emisyonlarının yönetilmesinde yalnızca enerji arzındaki dönüşüm değil aynı zamanda teknolojik çözümler de kritik rol oynamaktadır. Karbon yakalama, kullanma ve depolama (KYKD) teknolojileri bu bağlamda öne çıkmaktadır. KYKD sistemleri, fosil yakıtlı enerji santralleri ve endüstriyel tesislerden çıkan CO₂'yi yakalayıp ya yer altı formasyonlarında depolamakta ya da kimyasal ve endüstriyel süreçlerde yeniden kullanmaktadır. 2024 itibarıyla küresel ölçekte 40'tan fazla

büyük ölçekli KYKD tesisi işletmede olup yıllık yaklaşık 45 milyon ton karbondioksit (MtCO_2) yakalama kapasitesine ulaşmıştır (Energy Institute, 2025; Paraschiv vd., 2025).

Ülkelerin KYKD uygulamalarındaki etkinliği farklılık göstermektedir. ABD'nin Permian Havzası'ndaki projeler petrol üretimiyle entegre edilmiş Gelişmiş yağ geri kazanımı (Enhanced Oil Recovery) süreçlerinde karbon kullanımını mümkün kılmaktadır. Kanada, Alberta eyaletindeki KYKD tesisleri ile yılda yaklaşık 3 MtCO_2 depolamaktadır. Norveç, Kuzey Denizi'nde yürüttüğü uzun soluklu Sleipner ve Snøhvit projeleri ile Avrupa'nın en istikrarlı karbon depolama altyapısını sunmaktadır. Çin, kömür tüketiminin yüksek olduğu sanayi bölgelerinde kurduğu pilot tesisler aracılığıyla yıllık yaklaşık 2 MtCO_2 düzeyinde yakalama gerçekleştirmektedir. Bu gelişmeler, karbon emisyonlarını azaltmada teknolojik çözümlerin kritik rolünü pekiştirmektedir (Energy Institute, 2025; Paraschiv vd., 2025).

Küresel enerji arzındaki artış ve buna paralel olarak yükselen karbon emisyonları, enerji dönüşümünün karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının düşük karbon yoğunluğu sayesinde sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeli bulunmakta, ancak fosil yakıtların yüksek payı bu kazanımları sınırlamaktadır. KYKD teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve yenilenebilir yatırımların hızlandırılması, küresel iklim hedeflerine ulaşmada tamamlayıcı stratejiler olarak değerlendirilmektedir. Enerji arz güvenliği, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel koruma arasında denge kurmak, hem ülkeler hem de küresel toplum için önümüzdeki dönemin en kritik enerji politikaları arasında yer alacağı öngörülmektedir (Hanson vd., 2025).

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, küresel ve bölgesel ölçekte birincil ve ikincil enerji kaynaklarının mevcut durumunu, enerji arzındaki eğilimleri, yenilenebilir kaynakların gelişimini ve karbon emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. 2024 yılında küresel enerji talebi %2 artarak 592 EJ seviyesine ulaşmış, toplam talebin %80'inden fazlası fosil yakıtlardan karşılanmıştır. Kömür tüketimi 165 EJ ile rekor seviyeye çıkarken, petrol %34'lük payı ile en büyük birincil kaynak olmayı sürdürmüş, doğal gaz küresel arzın yaklaşık %29'unu oluşturmuştur (Bera vd., 2025). Buna karşın yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki payı %31'e yükselmiş, rüzgâr ve güneş toplamda %15 katkı sağlamıştır (Energy Institute, 2025; Zhang vd., 2025).

Bölgesel düzeyde enerji profillerinin coğrafi ve ekonomik farklılıklara göre şekillendiği görülmektedir. Asya-Pasifik 279 EJ enerji arzı ile küresel toplamın %47'sini karşılamış, Çin tek başına 158,9 EJ enerji arzıyla küresel sistemin dörtte birine yaklaşmıştır. Avrupa fosil yakıt payını azaltarak emisyonlarını %16 düşürmüş, Kuzey Amerika 112 EJ talep ile yüksek fosil yakıt ağırlığını sürdürmüş ancak yenilenebilir yatırımlarını artırmıştır (Energy Institute, 2025; Wang vd., 2025).

Yenilenebilir enerji yatırımları sayesinde 2010–2024 döneminde 1.371 EJ fosil yakıt kullanımından ve 110 GtCO₂ eşdeğer emisyon salımından kaçınılmıştır. Asya-Pasifik bu kazanımın %43'ünü, Avrupa %21'ini, Kuzey Amerika %20'sini sağlamıştır. Hidroelektrik ve rüzgâr en düşük karbon yoğunluğuna sahip enerji türleri olarak öne çıkmış, kömür ise 820 gCO₂-eq/kWh ile en yüksek yoğunluğu sergilemiştir (Jung vd., 2025). Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili yapısı nedeniyle şebeke entegrasyonunda teknik zorluklar ortaya çıkmakta, batarya depolama, yeşil hidrojen ve akıllı şebeke teknolojileri bu sorunları aşmasında kritik rol üstlenmektedir.

KYKD sistemleri fosil yakıt kullanımının devam ettiği alanlarda tamamlayıcı bir çözüm sunmaktadır. 2024 itibarıyla işletmedeki 40'tan fazla büyük ölçekli KYKD tesisi yıllık yaklaşık 45 MtCO₂ yakalama kapasitesine ulaşmıştır (Chouksey vd., 2025).

Sonuç olarak küresel enerji sistemi, fosil yakıtların yüksek payını korumasına rağmen yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla büyüdüğü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Çalışma, enerji arzı ve emisyonlar arasındaki eşzamanlı artışın yarattığı zorlukları ortaya koyarken, yenilenebilir yatırımların ve KYKD teknolojilerinin bu zorlukları hafifletmede temel araçlar olduğunu göstermektedir (Energy Institute, 2025; Paraschiv vd., 2025).

Çalışmanın özgün katkısı, küresel enerji eğilimlerini kıtasal farklılıklarla ilişkilendirerek enerji geçişinin çok boyutlu yapısını ortaya koymasındır. Literatüre katkısı ise enerji talebi, arz yapısı, yenilenebilir büyümesi ve emisyon verilerini bütüncül biçimde değerlendirerek, gelecekteki enerji politikalarının oluşturulmasına yönelik karşılaştırmalı bir çerçeve sunmasıdır.

KAYNAKÇA

- Abbas, S., Ghosh, S., Sucharita, S., Dogan, B., Değer, O., & Mariev, O. (2025). Going green: understanding the impacts of economic complexity, clean energy and natural resources on ecological footprint in complex economies. *Environment, development and sustainability*, 27(3), 6539-6565. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04154-4>
- Adham, M., Keene, S., & Bass, R. B. (2025). Distributed Energy Resources: A Systematic Literature Review. *Energy Reports*, 13, 1980-1999. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.026>
- Bera, M., Das, S., Garai, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Tripathi, S., & Chatterjee, G. (2025). Advancing energy efficiency: innovative technologies and strategic measures for achieving net zero emissions. *Carbon Footprints*, 4(1), N-A. <https://doi.org/10.20517/cf.2024.48>
- Bruckner, T., Bashmakov, I. A., Mulugetta, Y., Chum, H., De la Vega Navarro, A., Edmonds, J., ... & Zhang, X. (2014). Energy Url: <https://pure.iiasa.ac.at/11118>
- Chouksey, A., Shovon, M. S. S., Islam, M. R. I., Chowdhury, B. R., Ridoy, M. H., Rahman, M. A., & Amjad, M. H. H. (2025). Harnessing machine learning to analyze energy generation and capacity trends in the usa: A comprehensive study. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 6(1), 10-32. <https://doi.org/10.32996/jeas.2025.6.1.2>
- Energy systems. In O. Edenhofer et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the*

- IPCC (pp. 511–598). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416.013>
- Energy Institute (EI). (2025), Renewables soar , but fossil fuels continue to rise as global electricity demand hits record levels | Energy Institute, erişim tarihi Ağustos 23, 2025, <https://www.energyinst.org/exploring-energy/resources/news-centre/media-releases/renewables-soar,-but-fossil-fuels-continue-to-rise-as-global-electricity-demand-hits-record-levels>
- Enerdata. (2022). *Global Energy Statistical Yearbook 2022*.
<https://yearbook.enerdata.net/>
- Eygü, H., & Kılınç, A. (2021). Enerji Tüketiminin ve Karbondioksit Salınımının Ekonomik Büyümeye Etkisinin İncelenmesi: Panel Veri Analizi Yaklaşımı. Siirt Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 9(2), 268-280. <https://doi.org/10.53586/susbid.995759>
- Friedland, K. D., Boucher, J. M., Jones, A. W., Methratta, E. T., Morse, R. E., Foley, C., & Rago, P. J. (2025). The spatial correlation between trawl surveys and planned wind energy infrastructure on the US Northeast Continental Shelf. ICES Journal of Marine Science, 82(3), fsad167. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad167>
- García-Riazuelo, Á., Duarte, R., Sarasa, C., & Ortega-Argilés, R. (2025). Spatial distribution and drivers of renewable energies in European regions. Energy Economics, 144, 108340. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108340>
- Han, S., Peng, D., Guo, Y., Aslam, M. U., & Xu, R. (2025). Harnessing technological innovation and renewable energy and their impact on environmental pollution in G-20 countries. Scientific Reports, 15(1), 2236. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85182-0>

- Hanson, E., Nwakile, C., & Hammed, V. O. (2025). Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO₂ emissions. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100381>
- Hassan, M. U., Siddique, H. M. A., Sumaira, & Alvi, S. (2025). Impacts of industrialization, trade openness, renewable energy consumption, and urbanization on the environment in South Asia. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05846-1>
- Hsu, D. D., O'Donoghue, P., Fthenakis, V., Heath, G. A., Kim, H.-C., Sawyer, P., Choi, J.-K., & Turney, D. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation. *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), S122–S135. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024 Executive Summary*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/executive-summary>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.
- IRENA. (2023). *Renewable Energy Statistics 2023*. IRENA Yayınları.
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bazan, A. G., Bauer, Z. A. F., He, J., & al. (2019). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for 143 countries. *Joule*, 3(8), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.04.019>¹

- Jung, C., Sander, L., & Schindler, D. (2025). Global climate change impacts onshore wind resource complementarity and temporal variability. *Energy Conversion and Management*, 339, 119963. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119963>
- Kim, J., Jaumotte, F., Panton, A. J., & Schwerhoff, G. (2025). Energy security and the green transition. *Energy Policy*, 198, 114409. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114409>
- Kumari, D., Shashwat, S., Verma, P. K., & Giri, A. K. (2025). Examining the nexus between carbon dioxide emissions, economic growth, fossil fuel energy use, urbanization and renewable energy towards achieving environmental sustainability in India. *International Journal of Energy Sector Management*, 19(3), 731-746. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2024-0007>
- Movsessian, M. M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2025). Enabling Central America's energy transition through renewable energy, energy citizenship, and regional integration. *Applied Energy*, 377, 124493. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124493>
- Nighoskar, A., Chaurasia, P., & Singh, N. (2025). Advancing nuclear energy forecasting: Exploring regression modeling techniques for improved accuracy. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(1), 103144. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.08.013>
- Paraschiv, S., Paraschiv, L. S., & Serban, A. (2025). Global hydrogen production capacity for sustainable decarbonization and green transition in transport applications to mitigate climate change: a comprehensive overview. *Management of Environmental Quality: An*

International Journal. <https://doi.org/10.1108/MEQ-10-2024-0461>

- Pata, S. K., Pata, U. K., & Wang, Q. (2025). Ecological power of energy storage, clean fuel innovation, and energy-related research and development technologies. *Renewable Energy*, 241, 122377. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122377>
- Russo, C., Cirillo, V., Pollaro, N., Terribile, F., Chiodini, A., & Maggio, A. (2025). The global energy challenge: second-generation feedstocks on marginal lands for a sustainable biofuel production. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 12(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40538-025-00729-7>
- Rai, P., Gupta, P., Saini, N., & Tiwari, A. K. (2025). Assessing the impact of renewable energy and non-renewable energy use on carbon emissions: Evidence from select developing and developed countries. *Environment, Development and Sustainability*, 27(2), 3059-3080. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04001-6>
- Su, C. W., Song, X. Y., Dou, J., & Qin, M. (2025). Fossil fuels or renewable energy? The dilemma of climate policy choices. *Renewable Energy*, 238, 121950. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121950>
- Wang, Y., Wang, R., Tanaka, K., Ciais, P., Penuelas, J., Balkanski, Y., ... & Zhang, R. (2025). Global spatiotemporal optimization of photovoltaic and wind power to achieve the Paris Agreement targets. *Nature Communications*, 16(1), 2127. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57292-w>
- Yang, X., Feng, Y., & Hussain, N. (2025). Environmental policies and green technologies: Impacts on energy

- sustainability in the African continental free trade area. Renewable Energy, 238, 121876. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121876>
- Yılmaz, B. ve Çavuş, O. (2017). Akıllı Şebekelerde Enerji Depolama Uygulamalarının Önündeki Fırsatlar ve Karşılaşılan Zorluklar. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 1011-1025. <https://doi.org/10.17320/gazimmfd.316477> ¹⁶
- Zhang, Y., Radmehr, R., Ali, E. B., & Samour, A. (2025). Natural resources, financial globalization, renewable energy, and environmental quality: Novel findings from top natural resource abundant countries. *Gondwana Research*, 145, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.12.016>
- Zhang, Y., & Zahoor, Z. (2025). The role of energy subsidies, savings, and transitions in driving energy transformations toward net-zero emissions. *Energy*, 320, 135209. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135209>
- Zhang, X., Wang, M., & Zang, H. (2025). Renewable energy technology innovation, climate risk, and carbon emission reduction: A cross-country analysis. *Renewable Energy*, 240, 122136. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122136>

POLİMER KOMPOZİTLERİN EKSTRÜZYON VE ENJEKSİYON ÜRETİMİNDE SICAKLIĞIN ETKİLERİ VE POLİMER KOMPOZİTLERİN DEGRADASYONU

Yasin DEMİRHAN¹

1. GİRİŞ

Polimer kompozit malzemeler, düşük yoğunluk, yüksek mekanik dayanım, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi üstün özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık, ambalaj, elektrik-elektronik ve medikal gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür kompozitlerin üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerin başında **ekstrüzyon** ve **enjeksiyon kalıplama** teknikleri gelmektedir (Aydın & Altun, 2020). Her iki üretim yöntemi de, yüksek hacimli üretim kabiliyeti ve karmaşık geometrilerin elde edilebilmesi açısından avantaj sağlarken, aynı zamanda polimer matrislerin ve takviye edici fazların sıcaklığa karşı duyarlılığı nedeniyle **termo-mekanik bozunma (degradasyon)** riskini de beraberinde getirmektedir (Ceretti, 2023).

Ekstrüzyon ve enjeksiyon gibi termoplastik şekillendirme proseslerinde, sıcaklık; malzemenin ergimesi, akışkanlık ve kalıp dolumu gibi işlemsel parametreleri doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Ancak işlem sıcaklığının kontrolsüz bir şekilde artması, özellikle organik esaslı polimer matrislerin kimyasal yapısında geri dönüşümsüz bozunmalara yol açabilmektedir (Salehiyan & Bakhtiari, 2024). Polimer matrislerin temel

¹ Öğr. Gör. Dr., Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri, yasin.demirhan@usak.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7368-3971.

özelliklerini kaybetmeden, yapılarında bozunma meydana gelmeden ergime noktasının bir miktar üzerinde işlem yapılmalıdır. Aksi takdirde ergime noktasının çok üzerine çıkıldığında polimer malzemenin yapısında bozunmalar meydana gelmektedir. Ekstrüzyon ve enjeksiyon üretiminde polimer kompozitin bozunmaması için seçilen ergitme sıcaklığı cihazın her bölümünde belirlenen sıcaklık aralığında olması gerekmektedir. Ani bölgesel sıcaklığın belirlenen üretim sıcaklık aralığının üstüne çıkması polimerlerin yerel olarak bozunmasına sebebiyet verebilmektedir (Ceretti, 2023). Bu **termal degradasyon**, malzemenin moleküler zincir uzunluğunun azalması, uçucu yan ürünlerin oluşumu, renk değişimi ve mekanik özelliklerde zayıflama gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Takviye malzemesi olarak kullanılan cam, karbon ya da doğal lifler ile dolgu maddeleri de, belirli sıcaklık aralıklarının üzerine çıkıldığında fiziksel bütünlüklerini ve ara yüzey bağlarını kaybederek kompozit sisteminin bütün performansını olumsuz etkileyebilmektedir (Kaymakci & Ayrılmış 2016; Avcı, 2022).

Literatürde, sıcaklık artışının viskozite üzerinde olumlu etkiler sağladığı; bu sayede kalıplama işleminin daha verimli yürütülebildiği belirtilmektedir. Ancak bu avantaj, belirli bir eşik değerinin üzerine çıkıldığında **matriks bozunmaları, gaz çıkışı, kararma (discoloration) ve yanma reaksiyonları** gibi çeşitli bozunma mekanizmalarıyla gölgelenmektedir. Dolayısıyla polimer kompozitlerin üretiminde, sıcaklığın hem akış davranışlarını hem de uzun vadeli malzeme dayanımını etkileyen çift yönlü bir parametre olduğu görülmektedir (Slapnik, 2021).

Bu çalışma, polimer kompozitlerin ekstrüzyon ve enjeksiyon üretim süreçlerinde sıcaklık parametresinin işlevsel rolünü irdelemeyi ve üretim sırasında meydana gelebilecek termal degradasyon mekanizmalarını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, uygun sıcaklık kontrol stratejilerinin geliştirilmesiyle ürün kalitesinin ve proses

verimliliğinin nasıl artırılabilceği üzerine çözüm önerileri sunulacaktır.

2. EKSTRÜZYON VE POLİMER İŞLEME SÜRECİ

Ekstrüder, polimerlerin ve polimer kompozitlerin şekillendirilmesi, işlenmesi ve homojen bir karışım elde edilmesi için kullanılan **temel bir plastik işleme makinesidir**. Granül, toz veya pelet halindeki polimerlerin ısıtılarak **ergitilmesi**, **karıştırılması** ve **basınç altında kalıptan geçirilerek sürekli bir form haline getirilmesini** sağlar. Özellikle polimere ilave edilen toz veya granül formdaki katkı maddelerinin polimer matrisinde homojen bir şekilde karışımını sağlayarak polimer kompozitlerin elde edilmesini sağlar (Rosato & Rosato, 2012; Tadmor & Gogos, 2013) (Şekil 1).

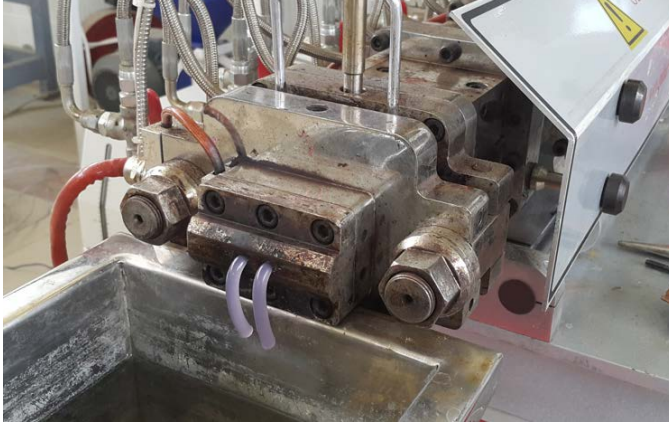
2.1. Ekstrüder Çeşitleri ve Çalışma Prensipleri

Ekstrüderler, kullanım amacına ve vida tasarımına bağlı olarak farklı türlere ayrılır (Crawford & Martin, 2020) (Tablo 1);

Tablo 1. Ekstrüder Çeşitleri ve Özellikleri

Ekstrüder Türü	Özellikleri	Kullanım Alanları
Tek Vidalı Ekstrüder	Basit yapı, düşük maliyet, temel plastik işleme	Boru, profil, film üretimi
Çift Vidalı Ekstrüder	Daha iyi karışım, yüksek verimlilik, katkı maddesi homojenliği	Kompozitler, masterbatch, granül üretimi
Ko-rotasyonlu Çift Vidalı Ekstrüder	Aynı yönde dönen vidalar, mükemmel dağılım	Polimer alaşımları, dolgu maddeleri, geri dönüşüm
Konik Vidalı Ekstrüder	Yüksek basınç oluşturur, farklı malzemeleri işleyebilir	PVC boru, pencere profili
Değişken Vidalı Ekstrüder	Ayarlanabilir kesme kuvveti ve viskozite kontrolü	Özel polimer karışımları

Şekil 1. Ekstrüderden Kompozit Malzeme Çıkışı



2.2. Ekstrüzyon Sürecinin Temel Aşamaları

Ekstrüzyon sürecinin temel aşamaları şu şekilde özetlenebilir (Strong, 2006; Rosato & Rosato, 2012);

- *Hammadde Besleme:* Polimer peletleri veya tozu hazneye eklenir.
- *Isıtma ve Ergitme:* Vida hareketi ile polimer, **ısıtıcılar yardımıyla ergitilir.**
- *Karıştırma ve Homojenizasyon:* Ek katkı maddeleri (dolgu, renk pigmentleri, stabilizatörler) polimerle karıştırılır.
- *Basınçlandırma:* Eritilmiş polimer vida tarafından ileri doğru itilerek basınç uygulanır.
- *Şekillendirme:* Eritilmiş malzeme, kalıptan geçerek istenen şekle gelir (boru, film, levha vb.).
- *Soğutma:* Kalıptan çıkan malzeme **su banyosu veya hava ile soğutulur.**
- *Kesme ve Sarma:* Üretilen malzeme **istenen uzunlukta kesilerek granül şekline getirilir veya sarılır.**

2.3. Ekstrüder İşleme Parametreleri

Ekstrüzyon süreci, polimerlerin sürekli olarak şekillendirildiği bir termoplastik işleme yöntemidir ve işlem parametreleri ürün kalitesi ile proses verimliliği açısından kritik öneme sahiptir (Olivares, 2013). Bu parametreler arasında vida hızı, besleme hızı, silindir sıcaklığı, basınç, vida geometrisi, residence time (malzemenin ekstrüder içinde kalış süresi) ve soğutma sistemi yer almaktadır (Altepeter, 2023). Vida hızı, polimerin işleme hızını ve dolayısıyla malzemenin ekstrüder içinde maruz kaldığı kesme ve ısı yükü belirler. Çok yüksek vida hızları, malzemenin aşırı ısınmasına ve termal bozunmaya yol açabilir (Capone et al., 2007). Silindir sıcaklıkları, polimerin ergimesi ve akışkanlık özelliklerini etkileyerek kalıp dolumunu kolaylaştırır. Ancak sıcaklık değerlerinin tavsiye edilen sınırların üzerinde olması, malzeme bozunmasına neden olabilir (Taubner et al., 2001). Besleme hızı ve residence time, malzemenin ekstrüder içinde kalma süresi ve homojen karışmasını etkiler. Uzun residence time, özellikle yüksek sıcaklıklarda polimer zincirlerinin kırılmasına neden olabilir (Nicholson, 2017). Vida geometrisi ise, polimerin ergitilmesi, karıştırılması ve ilerletilmesinde kritik rol oynar (Rosato & Rosato, 2012).

Son olarak, ekstrüzyon sonrası soğutma işlemi, ürünün mekanik ve boyutsal özelliklerinin stabilizasyonu için önemlidir. Uygun soğutma yapılmadığında, ürünlerde deformasyon ve iç gerilmeler oluşabilir (Strong, 2006). Ekstrüder işleme parametreleri tabloda özet şeklinde verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Ekstrüder İşleme Parametreleri

Parametre	Etkisi	Önerilen Optimum Aralık
Vida Hızı (rpm)	Yüksek hız, daha fazla üretim ama daha fazla kesme gerilimi	10-300 rpm
Isıtma Bölge Sıcaklığı (°C)	Düşük sıcaklıkta iyi karışmaz, yüksek sıcaklıkta degradasyon olabilir	150-350°C (polimere bağlı)
Kesme Kuvveti	Fazla olursa zincir kırılması olur, az olursa homojen karışım sağlanamaz	Orta seviye kesme kuvveti
Vida Uzunluğu / Çap Oranı (L/D)	Yüksek L/D oranı daha iyi karıştırma sağlar	20:1 - 40:1
Basınç (bar)	Malzemenin kalıptan düzgün çıkmasını sağlar	50-300 bar
Vakum Havalandırma	Gazları uzaklaştırarak hava kabarcıklarını önler	Düşük basınçta uygulanmalı

2.4. Polimer Kompozitlerde Ekstrüzyonun Önemi

Ekstrüderler, polimer kompozitlerin **daha homojen dağılımı** ve daha iyi mekanik özellikler kazanması için kritik rol oynar. Özellikle **dolgu malzemelerinin polimer içinde iyi dağılması** için çift vidalı ekstrüderler tercih edilir.

- Cam elyafı, karbon elyafı, talk veya grafen gibi dolguların eşit dağılımını sağlar.
- Plastikleştiriciler ve stabilizatörlerin polimere iyice karışmasını garanti eder.
- Üretim sürecinde sıcaklık ve kesme kuvveti kontrol edilerek degradasyon önlenir.

2.5. Ekstrüder ve degradasyon önlemleri

- *Termal degradasyonu önlemek için:*
 - Polimerin optimum sıcaklık aralığında işlenmesi gerekir.
 - Yavaş ve kontrollü ısıtma yapılmalı, aşırı sıcaklıktan kaçınılmalıdır.
- *Gaz ve uçucu bileşenlerin uzaklaştırılması için:*
 - Vakum havalandırma sistemleri kullanılmalıdır.

- *Mekanik kesme kuvvetini azaltmak için:*
 - Vida hızı çok yüksek olmamalıdır (çok yüksek hız, lif kırılmasına neden olur).
 - Uzun L/D oranına sahip vidalar tercih edilmelidir.
- *Nem kaynaklı bozunmayı önlemek için:*
 - Higroskopik polimerler (PA, PC, PET) işlenmeden önce kurutulmalıdır.

Ekstrüderler, polimerlerin işlenmesi, şekillendirilmesi ve katkı maddeleriyle homojen hale getirilmesi için kritik makinelerden biridir. İşleme sıcaklığı, vida hızı ve basınç iyi kontrol edilmezse degradasyon (bozunma) oluşabilir. Çift vidalı ekstrüderler, polimer kompozitlerin dolgu maddeleriyle daha iyi karışmasını sağlar. Vakum havalandırmalı ekstrüderler, polimerin içindeki gazları uzaklaştırarak yüzey kalitesini iyileştirir.

3. ENJEKSİYON KALIPLAMA VE POLİMER İŞLEME SÜRECİ

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik ve termoset polimerlerin belirli bir sıcaklıkta eritilip, yüksek basınç altında bir kalıba enjekte edilerek şekillendirilmesi işlemidir. Yüksek hassasiyetli ve seri üretime uygun olduğu için otomotiv, elektronik, tıbbi cihazlar ve ambalaj gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılır (Farotti, 2018).

3.1. Enjeksiyon Kalıplama Süreci

Enjeksiyon kalıplama işlemi **dört ana aşamadan** oluşur:

Hammadde Besleme: Polimer peletleri besleme hunisine eklenir. Bazı polimerler (PA, PET, PC) higroskopik olduğu için işleme öncesinde kurutulmalıdır.

Ergitme ve Karıştırma: Vida hareketi ve ısıtıcılar yardımıyla polimer eritilir. Eğer katkı maddeleri (renk pigmenti, dolgu malzemesi vb.) ekleniyorsa, bu aşamada homojen karışım sağlanır.

Kalıba Enjeksiyon: Eritilmiş polimer, yüksek basınç ile kalıba enjekte edilir. Kalıbın içini tamamen doldurması için belirli bir tutma basıncı uygulanır.

Soğutma ve Kalıptan Çıkarma: Malzeme, soğutma kanalları aracılığıyla sertleştirilir. Kalıp açılarak ürün çıkarılır ve bir sonraki döngüye geçilir.

3.2. Enjeksiyon Kalıplama Parametreleri ve Etkileri

Enjeksiyon kalıplama parametreleri, eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, soğutma süresi ve vidanın hızı gibi değişkenlerden oluşur. Bu parametreler; ürünün boyutsal doğruluğunu, mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini doğrudan etkiler. Yanlış ayarlamalar ise iç gerilmeler, çarpılma, yanma izi veya boşluk gibi hatalara yol açabilir. Enjeksiyon kalıplama parametreleri ve etkileri kısaca aşağıdaki tablo Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Enjeksiyon Kalıplama Parametreleri ve Etkileri

Parametre	Etkisi	Tipik Aralık
Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	Polimerin akışkanlığı ve kalıp doldurma kabiliyeti	180 - 350°C
Enjeksiyon Basıncı (bar)	Kalıbın tamamen dolmasını sağlar	500 - 2500 bar
Tutma Basıncı (bar)	Parçadaki çekilmeyi önler	200 - 800 bar
Soğutma Süresi (saniye)	Düzgün kristalizasyon ve büzülmeyi önleme	5 - 60 saniye
Vida Hızı (rpm)	Malzeme homojenliği ve kesme kuvveti	20 - 150 rpm
Kalıp Sıcaklığı (°C)	Yüzey kalitesini ve iç gerilmeleri etkiler	20 - 150°C

3.3. Enjeksiyon Kalıplamada Degradasyon ve Önleme Yöntemleri

Termal Degradasyon: Çok yüksek sıcaklık polimerin zincir yapısını bozabilir. Sıcaklık aralığı, polimerin işleme penceresine uygun olmalıdır.

Gaz ve Hava Kabarcıkları: Higroskopik polimerler (PA, PET, PC) işleme öncesinde kurutulmalıdır. Vakum havalandırılmalı sistemler kullanılabilir.

Kesme Kuvveti ve İç Gerilmeler: Aşırı vida hızı polimerin kesme ile bozunmasına neden olabilir. Düşük hız ve optimum basınç ile işleme yapılmalıdır.

Çekme ve Büzülme Sorunları: Kalıbın soğutma kanalları doğru tasarlanmalıdır. Tutma basıncı ve süresi iyi ayarlanmalıdır.

3.4. Enjeksiyon Kalıplamanın Avantajları ve Dezavantajları

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, polimerlerin üretiminde en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntemin en önemli avantajı, karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek hassasiyetle ve tekrarlanabilir biçimde üretilmesidir. Ayrıca yüksek üretim hızına sahip olması, seri üretim için uygunluğu ve otomasyona kolay entegre edilebilmesi, yöntemi endüstride tercih edilir hale getirmektedir (Strong, 2006; Fried, 2014). Yöntem sayesinde ürünlerde yüksek yüzey kalitesi elde edilebilmekte, çok çeşitli polimer türleri kullanılabilmekte ve birden fazla malzemenin tek parçada birleştirilmesi mümkün olabilmektedir (Harper, 2002).

Bununla birlikte enjeksiyon kalıplamanın bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İlk yatırım maliyeti oldukça yüksektir ve kalıp tasarımı ile üretim süreci uzmanlık gerektirmektedir. Ayrıca kalıp değişiminin uzun sürmesi, küçük ölçekli üretimlerde yöntemin ekonomik olmamasına yol

açmaktadır (Chanda & Roy, 2008). Üretim sırasında polimerlerin yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalması, özellikle termal olarak kararsız polimerlerde bozunma riskini artırabilmektedir (Brazel, 2012). Bunun yanında, kalın kesitli parçaların kalıp içinde homojen olarak soğutulması zor olabilmekte ve bu durum iç gerilmelere ya da yüzey kusurlarına sebep olabilmektedir (Mallick, 2007).

Sonuç olarak, enjeksiyon kalıplama yöntemi yüksek hacimli ve hassas üretim için oldukça avantajlıdır; ancak yüksek maliyet, uzmanlık gereksinimi ve bazı teknik sınırlamalar yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır. Dolayısıyla üretim yöntemi seçiminde parçanın boyutu, şekli, malzeme türü ve üretim miktarı gibi parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir (Callister & Rethwisch, 2020).

3.5. Kullanım Alanları ve Ürünler

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik ve bazı termoset polimerlerin yüksek basınç altında kalıplara enjekte edilerek şekillendirilmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntem, yüksek üretim hızı, hassasiyet ve otomasyona uygunluğu nedeniyle çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Otomotiv sektöründe tampon, gösterge paneli, kapı iç kaplamaları ve far muhafazaları gibi parçaların üretiminde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Strong, 2006; Mallick, 2007). Elektrik ve elektronik endüstrisinde ise priz gövdeleri, anahtarlar, konektörler ve muhafaza kutuları enjeksiyon kalıplama ile üretilmektedir (Harper, 2002).

Ambalaj endüstrisi de bu yöntemin en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Tek kullanımlık kaplar, şişe kapakları, yiyecek saklama kapları ve çeşitli tüketim malzemeleri enjeksiyon kalıplama ile ekonomik şekilde üretilebilmektedir (Fried, 2014). Tıp ve sağlık sektöründe ise şırınga gövdeleri, ilaç kapakları, test tüpleri, medikal cihaz muhafazaları gibi ürünlerin üretiminde

enjeksiyon kalıplama tercih edilmektedir (Chanda & Roy, 2008). Ayrıca oyuncak, ev eşyası, mutfak gereçleri, spor ekipmanları ve günlük kullanımda yer alan birçok plastik parça bu yöntemle üretilmektedir (Callister & Rethwisch, 2020).

Sonuç olarak, enjeksiyon kalıplama yöntemi çok yönlü uygulama alanına sahiptir ve özellikle seri üretime uygunluğu sayesinde otomotiv, elektronik, ambalaj, sağlık ve tüketim ürünleri endüstrilerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yöntemin sağladığı yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi, ürün çeşitliliğini artırmakta ve modern imalat teknolojileri içerisinde önemli bir yer edinmesini sağlamaktadır (Brazel, 2012).

Enjeksiyon kalıplama, polimerlerin yüksek hassasiyetle şekillendirilmesini sağlayan etkili bir üretim yöntemidir. Üretim sürecinde sıcaklık, basınç ve soğutma süreleri iyi kontrol edilmelidir. Termoplastikler ve termosetler için farklı parametreler uygulanmalıdır. Degradasyon önlenerek yüzey kalitesi ve mekanik dayanım artırılabilir.

4. POLİMER KOMPOZİTLERDEKİ KATI/DOLGU MADDELERİ VE ÜRETİME ETKİLERİ

Polimer kompozitler, polimer matrisinin mekanik, termal, elektriksel veya diğer özelliklerini iyileştirmek için **katı/dolgu maddeleri** ile takviye edilen malzemelerdir. Bu dolgular, kompozitin dayanıklılığını, sertliğini, termal kararlılığını ve işlenebilirliğini artırabilir.

4.1. Yaygın Olarak Kullanılan Katkı/Dolgu Maddeleri

Polimerlerin işlenebilirliklerini artırmak, kullanım ömürlerini uzatmak ve nihai ürünün performansını geliştirmek amacıyla çeşitli katkı ve dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Bunlar farklı işlevlere göre sınıflandırılabilir:

Plastikleştiriciler; Plastikleştiriciler polimer zincirleri arasındaki ikincil bağları zayıflatarak zincir hareketliliğini artırır ve böylece malzemeye esneklik kazandırır. En yaygın kullanılan plastikleştiriciler arasında ftalatlar (örneğin DEHP, DBP), adipatlar ve sebasatlar bulunmaktadır (Fried, 2014; Harper, 2002).

Isı ve UV stabilizatörleri; Polimerler UV ışınları ve yüksek sıcaklıklarda bozunmaya eğilimlidir. Bu nedenle, HALS (Hindered Amine Light Stabilizers), benzotriazol türevleri ve organotin bileşikler gibi katkılar, polimerin ışık ve ısıya karşı dayanıklılığını artırmak için yaygın biçimde kullanılır (Chanda & Roy, 2008; Strong, 2006).

Alev geciktiriciler; Polimerlerin çoğu yanıcı özellik gösterdiğinden, güvenlik açısından alev geciktirici katkıları önemlidir. Alüminyum hidroksit, antimon trioksit, fosforlu bileşikler ve halojenli alev geciktiriciler en sık kullanılan örneklerdir (Stevens, 1998; Brazel, 2012).

Antistatik ve iletken katkıları; Statik elektriklenmeyi önlemek ve elektriksel iletkenliği sağlamak amacıyla karbon siyahı, grafit, karbon nanotüp ve metal oksitler katkı olarak kullanılmaktadır (Mallick, 2007; Fried, 2014).

Dolgu maddeleri; Polimer matrislere katılan inorganik dolgu maddeleri, maliyeti düşürürken aynı zamanda mekanik dayanımı ve ısı özellikleri geliştirmektedir. Kalsiyum karbonat (CaCO_3), talk, silika, kaolen ve mika en çok kullanılan dolgu maddeleri arasındadır (Callister & Rethwisch, 2020; Harper, 2002).

Takviye elyafları; Yüksek mukavemet ve sertlik elde etmek için polimer matrislere cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı (örneğin Kevlar) gibi takviye malzemeleri eklenir (Mallick, 2007).

Renk vericiler; Estetik ve koruyucu amaçlarla titanyum dioksit (TiO_2), demir oksit gibi pigmentler kullanılmaktadır. Bunlar aynı zamanda UV ışınlarına karşı da koruma sağlayabilir (Harper, 2002).

Yaşlanma önleyiciler (Antioksidanlar); Fenolik antioksidanlar, fosfitler ve butil hidroksitoluen (BHT) gibi katkıları, polimerin oksidatif bozunmasını yavaşlatarak ömrünü uzatır (Chanda & Roy, 2008; Fried, 2014).

Köpürtücüler; Polimerlere hücresel yapı kazandırmak ve yoğunluğu azaltmak için köpürtücüler kullanılmaktadır. Azodikarbonamid (ADC) ve sodyum bikarbonat bu amaçla en yaygın kullanılan maddelerdir (Strong, 2006).

4.2. Katkı/Dolgu Maddelerinin Üretime Etkileri

Polimer üretim süreçlerinde katkı ve dolgu maddelerinin kullanımı, malzemenin işlenebilirliği, üretim maliyeti, mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Katkı maddeleri genellikle polimerin işlenmesi sırasında karışım aşamasında veya ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerde eklenmektedir. Bu katkıları sayesinde üretim sırasında karşılaşılan problemlerin azaltılması ve son ürünün performansının artırılması mümkün olmaktadır (Chanda & Roy, 2008; Fried, 2014).

Plastikleştiriciler, polimerin viskozitesini düşürerek işlenmesini kolaylaştırır ve daha düşük enerji tüketimiyle üretim yapılmasına imkân sağlar. Ancak fazla miktarda kullanıldığında malzemenin mekanik dayanımını azaltabilmektedir (Harper, 2002). Isı ve UV stabilizatörleri, üretim esnasında polimerin yüksek sıcaklığa ve ışığa maruz kaldığında bozunmasını engelleyerek proseste oluşabilecek renk değişimi ve mekanik zayıflamaları önler (Strong, 2006).

Dolgu maddeleri, özellikle kalsiyum karbonat, talk veya silika gibi inorganik bileşenler, polimerlerin üretim maliyetini düşürmekte ve aynı zamanda boyutsal kararlılığı artırmaktadır. Bununla birlikte yüksek miktarda dolgu kullanımı, polimerin akışkanlığını azaltarak enjeksiyon ve ekstrüzyon işlemlerinde kalıp doldurma problemlerine yol açabilir (Callister & Rethwisch, 2020).

Takviye elyafları (cam elyafı, karbon elyafı, aramid) üretimde mukavemet ve sertliği önemli ölçüde artırsa da, işlenebilirliği zorlaştırır ve özel kalıplama teknikleri gerektirir. Bu durum üretim süresini ve maliyetini artırabilmektedir (Mallick, 2007). Köpürtücüler ise üretim sırasında gaz çıkışı sağlayarak düşük yoğunluklu ve hücresel yapıli malzemelerin elde edilmesine olanak tanır. Ancak bu katkıların kontrollü kullanılmaması, ürünün homojenliğini ve yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir (Brazel, 2012).

Katkı/dolgu maddeleri, polimer üretim süreçlerini çeşitli şekillerde etkileyebilir;

a) Mekanik Özelliklere Etkisi

- Mukavemet ve Sertlik Artışı: Cam elyafı, karbon elyafı ve talk gibi dolgular polimerin rijitliğini artırır.
- Aşınma Direnci: Metal oksitler, silika ve bor karbür, sürtünme ve aşınmaya karşı daha dayanıklı yüzeyler oluşturur.
- Kırılgnalık Artışı: Bazı dolgular, özellikle yüksek sertlik veren maddeler, polimerin esnekliğini azaltabilir.

b) Termal özelliklere etkisi

- Isı Dayanımı: Mika, karbon elyafı ve metal oksitler polimerin yüksek sıcaklıklarda stabilitesini artırır.

- Düşük Termal Genleşme: Talk ve karbon elyafı gibi dolgular, termal genleşmeyi azaltarak daha kararlı parçalar üretmeyi sağlar.

c) *Elektriksel özelliklere etkisi*

- Elektrik İletkenliği: Grafit, karbon elyafı ve grafen gibi katkıları, polimerleri iletken hale getirir.
- Yalıtıcılık: Mika ve silika, yüksek dielektrik özellikleriyle elektrik yalıtımı sağlar.

d) *İşlenebilirlik ve üretim süreçlerine etkisi*

- Daha Düşük Maliyet: Kalsiyum karbonat gibi dolgular, polimerin maliyetini düşürerek daha ekonomik üretim sağlar.
- Yüzey Kalitesi: İnce dolgu maddeleri, enjeksiyon kalıplama veya ekstrüzyon gibi işlemlerde daha pürüzsüz yüzeyler oluşturur.
- İşleme Zorlukları: Katkılı polimerler, yüksek viskoziteye neden olabilir ve kalıp aşınmasını artırabilir.

e) *Sıcaklığa Etkisi:*

- Cam Elyafı ve Karbon Elyafı: Termal iletkenliği artırarak, daha hızlı soğuma sağlar. Ancak yüksek sıcaklıklarda işlenmelidir.
- Talk ve Kalsiyum Karbonat: Ergime sıcaklığını genellikle değiştirmez, ancak viskoziteyi artırabilir.
- Grafit ve Grafen: Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olup elektrik iletkenliği ekleyebilir.

Sonuç olarak, katkı ve dolgu maddelerinin üretim süreçlerine etkisi hem olumlu hem de sınırlayıcı faktörler içermektedir. Doğru katkı türü ve miktarının seçilmesi, polimerin işlenebilirliğini iyileştirirken aynı zamanda istenen mekanik, termal ve kimyasal özelliklerin elde edilmesini sağlar. Bu nedenle katkı ve dolgu maddelerinin üretim parametreleriyle uyumlu şekilde optimize edilmesi kritik öneme sahiptir (Stevens, 1998; Chanda & Roy, 2008). Polimer kompozitlerde kullanılan **katı/dolgu maddeleri**, ürünlerin mukavemet, sertlik, ısı dayanımı, elektriksel özellikler ve işlenebilirlik gibi birçok parametresini etkiler. Doğru dolgu maddesinin seçimi, üretim yöntemi ve istenen nihai özelliklere bağlıdır.

5. POLİMER KOMPOZİTLERİN ÜRETİM SICAKLIĞI VE AKIŞ HIZI

Polimer kompozitlerin üretiminde sıcaklık ve akış hızı, hem işlenebilirlik hem de nihai ürünün kalitesi açısından kritik parametrelerdir. Bu değerler kullanılan polimer matrisi, dolgu oranı ve üretim yöntemi gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

5.1. Polimer Kompozitlerde Üretim Sıcaklığı

Polimer kompozitlerin üretim sıcaklığı, genellikle ana polimerin **ergime sıcaklığı (T_m)** veya cam geçiş sıcaklığı (T_g) dikkate alınarak belirlenir. Katkı malzemeleri (cam elyafı, karbon elyafı, talk vb.), sıcaklık ayarlarını değiştirebilir. Yaygın olarak kullanılan polimerlerin ergime ve üretim sıcaklıkları verilmiştir (Tablo 4) (Tablo 5) (Şekil 2).

Tablo 4. Termoplastikler Ergime ve Üretim Sıcaklığı

Polimer Matris	Ergime Sıcaklığı (°C)	Üretim Sıcaklığı (°C)	Kaynakça
Polietilen (PE)	105-135	160-250	Mallick, 2007; Rauwendaal, 2014
Polipropilen (PP)	160-175	180-280	Kissel, 2015; Mei-Fang, 2006
Polivinil Klorür (PVC)	100-260	160-210	Krevelen & Nijenhuis 2009
Polistiren (PS)	210-270	200-250	Krevelen & Nijenhuis 2009
Polietilen Tereftalat (PET)	245-265	260-300	Mohanty et al., 2000; Bledzki & Gassan, 1999
Polikarbonat (PC)	225-265	280-330	Peters, 1998; Rauwendaal, 2014
Poliamid (PA, Nylon 6/6)	250-270	260-320	Mohanty et al., 2000; Mallick, 2007
Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)	200-240	230-270	Krevelen & Nijenhuis 2009
Polimetilmetakrilat (PMMA)	160-200	200-250	Hajduk 2021

Tablo 5. Termosetler Ergime ve Üretim Sıcaklığı

Polimer Matris	Ergime Sıcaklığı (°C)	İşleme Sıcaklığı (°C)	Kaynakça
Epoksi (EP)	150-200	180-250	Krevelen & Nijenhuis 2009
Fenolik Reçine (PF)	150-250	180-250	Krevelen & Nijenhuis 2009
Termoplastik Poliüretan (PU)	170–200 °C	180–220 °C	Wang 2022
Doymamış Poliester (UP)	100-200	150-250	Krevelen & Nijenhuis 2009

Şekil 2. PP Kompozitinin Ekstrüder Üretim Sıcaklıkları



5.2. Akış Hızı (Viskozite ve Reolojik Özellikler)

Polimer kompozitlerin **akış hızı**, üretim sırasında kullanılan sıcaklık, polimerin viskozitesi ve dolgu malzemesinin türü/oranı gibi faktörlere bağlıdır (Tablo 6) (Tablo 7).

Akış Hızını Etkileyen Faktörler:

Sıcaklık Artışı → Düşük viskozite → Yüksek akış hızı

Dolgu Oranının Artışı → Yüksek viskozite → Düşük akış hızı

Kayma Hızı (Shear Rate) Artışı → Düşük viskozite → Daha iyi işlenebilirlik

Moleküler Ağırlık → Yüksek moleküler ağırlıklı polimerler düşük akış hızına sahiptir

Akış hızı için reolojik karakterizasyon, Melt Flow Index (MFI) ve Viskozite (η) ile belirlenir. Melt Flow Index (MFI): Polimerin belirli sıcaklık ve basınç altında ne kadar akışkan olduğunu ölçer. Viskozite (η): Newtonian olmayan akış gösteren polimerlerde sıcaklığa ve kayma hızına bağlı olarak değişir.

Tablo 6. Bazı Polimerlerin Akış Hızı ve Dolgu Etkisi

Polimer Matris	Tipik MFI (g/10dk, 230 °C, 2.16 kg)	Dolgu ile Etkisi
PE (LDPE)	0.3 - 20	Cam elyafı ile viskozite artar.
PE (HDPE)	0.1 - 15	Talk ilavesi ile akış azalır.
PP	1 - 50	Karbon elyafı ile akış azalır.
ABS	1 - 25	Dolgu ile viskozite artar.
PC	5 - 20	Cam elyafı eklenirse akış düşer.
PA (Naylon 6/6)	2 - 30	Lif takviyeleri viskoziteyi artırır.

Tablo 7. Üretim Yöntemine Göre Sıcaklık ve Akış Davranışı

Üretim Yöntemi	İdeal Sıcaklık Aralığı (°C)	Akış Davranışı
Enjeksiyon Kalıplama	180 - 330	Orta-yüksek akış hızı
Ekstrüzyon	160 - 300	Düşük-orta akış hızı
Kalıp Presleme (Compression Molding)	150 - 350	Düşük akış hızı
3D Baskı (FDM, SLA)	200 - 270	Orta akış hızı
Laminasyon ve Vakum İnfüzyon	100 - 250	Düşük akış hızı

Polimer kompozitlerin üretim sıcaklığı, temel polimer matrisine ve dolgu malzemesine bağlıdır. Genel olarak 180-330 °C arasında değişir. **Akış hızı**, polimerin viskozitesine, sıcaklığa ve dolgu miktarına bağlı olarak değişir. Dolgu miktarı arttıkça viskozite yükselir ve akış hızı düşer. Üretim yöntemine bağlı olarak sıcaklık ve akış ayarları optimize edilmelidir. Enjeksiyon kalıplama için yüksek akışkanlık, ekstrüzyon için orta akışkanlık gereklidir.

6. POLİMER KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİNDE DEGRADASYON

6.1. Polimer Degradasyonunun Türleri

Polimer degradasyonu, polimer zincirlerinin kimyasal veya fiziksel etkenler sonucu yapılarını kaybederek özelliklerini yitirmesi sürecidir (Albertsson & Karlsson, 1990). Bu süreç, farklı dış etkenlere bağlı olarak çeşitli şekillerde gerçekleşebilir.

Şekil 3. Termal Degradasyon



Termal Degradasyon; Polimerlerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması sonucunda moleküler zincirlerinin kopmasıdır. Bu durumda malzemenin mekanik dayanımı azalır ve renk değişimi gibi fiziksel belirtiler ortaya çıkar. Genellikle ısıtma, ergitme veya işleme sırasında görülür (Ravve, 2012) (Şekil 3).

Şemadaki adımlar ve mekanizmalar ise literatürde yaygın olarak belirtilen temel süreçlere dayanmaktadır:

- Polimer granülü (ısı öncesi): Başlangıçta katı ve stabildir.
- Hızlı ısıtma ve ergime: Enjeksiyon makinesinde 200–300°C’ye ısıtılır, viskoz sıvı hâline gelir (Strong, 2006; Chanda & Roy, 2008).
- Termal degradasyon: Uzun süre veya yüksek sıcaklıkta zincir kırılması, yan grupların kaybı ve depolimerizasyon gerçekleşir (Fried, 2014; Harper, 2002).
- Kalıp içi bozunma: Ürün akışı sırasında malzeme kalitesinde düşüş meydana gelir (Callister & Rethwisch, 2020) (Şekil 4).

Şekil 4. Organik Madde İçerikli PP Kompozitin Termal Degradasyonu



Oksidatif Degradasyon; Oksijenle temas eden polimer zincirleri zamanla kimyasal bağlarını kaybeder. Bu tür bozunma genellikle ısı ile birleştiğinde daha hızlı gerçekleşir. Otomotiv parçaları gibi açık havada kullanılan ürünlerde yaygındır (Ravve, 2012, Wiles ve Scott 2006).

Fotodegradasyon; Güneş ışığında bulunan ultraviyole (UV) ışınları, polimer zincirlerinde kopmalara neden olur. Bu tür degradasyon, dış mekânda kullanılan plastiklerde renk solması, çatlama ve kırılabilirlik ile kendini gösterir (Wiles ve Scott 2006, Andrady, 2015).

Hidrolitik Degradasyon; Su veya nemin etkisiyle polimer zincirlerinde hidroliz reaksiyonları meydana gelir. Özellikle ester, amid ve karbonat grubu içeren polimerlerde sık görülür. Biyobozunur plastiklerde bu mekanizma önemli rol oynar (Singh ve Sharma 2008).

Mekanik Degradasyon; Yüksek kesme gerilmeleri, sürtünme veya tekrarlanan darbe gibi fiziksel etkiler sonucunda polimer zincirlerinin fiziksel olarak kırılmasıdır. Genellikle işleme sırasında veya kullanım esnasında oluşur (Tadmor ve Gogos, 2013)

Biyolojik Degradasyon; Mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen bozunmadır. Biyopolimerler, bakteriler veya enzimler yardımıyla daha küçük moleküllere ayrışır. Bu tür

degradasyon, çevre dostu uygulamalarda tercih edilir (Andrady, 2015).

Bu durumlar malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek nihai ürünün performansını düşürebilir.

Tablo 8. Polimer Kompozitlerin Üretimi Sırasında Karşılaşılan Başlıca Bozunma Türleri

Degradasyon Türü	Nedenleri	Etkileri
<i>Termal Degradasyon</i>	Yüksek sıcaklık, uzun süreli ısı maruziyeti	Moleküler zincir kırılması, viskozite azalması, mekanik dayanım kaybı
<i>Oksidatif Degradasyon</i>	Oksijenle reaksiyon, yüksek sıcaklık	Renk değişimi, çatlama, yüzey kalitesinin bozunması
<i>Hidrotermal Degradasyon</i>	Yüksek sıcaklıkta nem ve su buharı	Hidroliz, mekanik özelliklerde bozunma
<i>Mekanik Degradasyon</i>	Yüksek kesme kuvvetleri, aşırı karıştırma	Lif kırılması, malzeme zayıflaması
<i>Fotodegradasyon</i>	UV ışınları, güneş ışığı	Sararma, yüzey çatlaması, kırılabilirlik artışı
<i>Kimyasal Degradasyon</i>	Asitler, bazlar, çözücüler	Moleküler yapı değişimi, gevrekleşme

6.2. Degradasyonu Etkileyen Faktörler

Polimerlerin degradasyon davranışı, hem çevresel hem de yapısal birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörler, polimerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini zamanla değiştirebilir (Andrady, 2015; Tadmor & Gogos, 2013; Ravve, 2012).

Sıcaklık; Yüksek sıcaklık, polimer zincirlerinin termal bozunmasını hızlandırır. Bu durum, moleküler ağırlığın düşmesine ve mekanik dayanımın azalmasına neden olur.

Oksijen ve Hava Teması; Oksijenle temas, özellikle yüksek sıcaklıkla birleştiğinde, oksidatif degradasyona yol açar. Bu tür bozunma genellikle renk değişimi ve kırılabilirlik ile kendini gösterir.

Ultraviyole (UV) Işınımı; UV ışınları, fotodegradasyonu tetikleyerek zincir kopmalarına ve malzeme sararmasına yol açar. Dış ortamda kullanılan polimerler bu etkiye daha açıktır.

Nem ve Su; Hidroliz reaksiyonları, su veya nemin etkisiyle bazı polimer zincirlerinin parçalanmasına neden olur. Özellikle ester, amid ve karbonat grupları içeren polimerlerde bu etki daha belirgindir.

Mekanik Gerilmeler; Yüksek kesme kuvvetleri, sürtünme ve darbeler polimer zincirlerinde fiziksel kopmalara neden olur. Bu durum, mekanik degradasyon olarak adlandırılır.

Polimerin Kimyasal Yapısı; Zincir yapısı, bağ türü, kristallik oranı ve katkı maddeleri, polimerin bozunmaya karşı direncini belirler. Örneğin, doymamış bağlar içeren polimerler oksidasyona daha yatkındır.

Katkı Maddeleri (Additive'ler); Antioksidanlar, UV stabilizatörleri ve dolgu maddeleri gibi katkılar, degradasyonu yavaşlatabilir. Ancak bazı katkılar işleme sırasında bozunmayı da hızlandırabilir.

Polimerin kimyasal yapısına örnek Polietilen (PE) ve Polivinil Klorür (PVC) polimerleri gösterilebilir. Polietilen (PE), doymuş bir karbon zincirine sahiptir. Bu yapı, oksidasyona karşı görece dayanıklıdır ve genellikle termal degradasyona karşı iyi performans gösterir. Ancak, PE'nin moleküler yapısında çift bağ veya polar grup bulunmadığı için fotodegradasyona (UV etkisiyle bozunmaya) karşı hassasiyet daha yüksektir. Polivinil Klorür (PVC) ise yan zincirde klor atomu taşıyan polar bir polimerdir. Bu klor grubu, PVC'yi diğer polimerlere göre daha karmaşık degradasyon mekanizmalarına maruz bırakır. Örneğin, ısıtıldığında HCl (hidrojen klorür) açığa çıkararak bozunmayı hızlandırır (termal degradasyon sırasında). Kimyasal yapının degradasyon üzerindeki etkisi polimer bağlarda görülmektedir. Doymamış bağlar (C=C) veya heteroatomların varlığı (örneğin O,

N, Cl) polimerin kimyasal reaktivitesini artırır ve bozunma hızını etkiler. Polimer zincirinde bulunan kopma noktaları veya zayıf bağlar (ester, amid grupları) hidrolize ve diğer bozunma süreçlerine yatkındır.

Tablo 9. PE Ve PVC Polimerlerin Kimyasal Yapısı ve Degradasyon Özelliği

Polimer	Kimyasal Yapı	Degradasyon Özelliği
Polietilen (PE)	-[CH ₂ -CH ₂]- n-	Doymuş zincir, termal dayanıklı, UV hassas
Polivinil Klorür (PVC)	-[CH ₂ -CHCl]-n-	Polar yan zincir, termal bozunma HCl açığa çıkarır

Tablo 10. Degradasyonu Etkileyen Faktörler Ve Etkileri

Faktör	Degradasyona Etkisi
Üretim Sıcaklığı	Çok yüksek sıcaklık, polimer zincirlerinin kırılmasına neden olur (Ravve, 2012).
İşleme Süresi	Uzun süreli ısı ve kesme kuvveti, moleküler ağırlığın düşmesine neden olur (Tadmor & Gogos 2013).
Dolgu Maddesi	Metal oksitler ve cam elyafı bazı polimerlerde termal kararlılığı artırırken, aşırı miktarda kullanımı viskoziteyi artırarak mekanik stres oluşturabilir (Tadmor & Gogos, 2013).
Nem ve Su	Hidroliz reaksiyonları oluşturarak polimerin parçalanmasına neden olur (özellikle poliamid ve polikarbonatta) (Andrady, 2015).
Oksijen ve Hava Teması	Oksidatif bozunmayı artırarak renk değişimi ve yüzey hasarı oluşturur (Andrady, 2015).

6.3. Üretim Yöntemlerine Göre Degradasyon Riski

Üretim yöntemlerine göre polimerlerde degradasyon riski, uygulanan sıcaklık, basınç ve işlem süresine bağlı olarak değişir.

Tablo 11. Degradasyon Riskleri

Üretim Yöntemi	Degradasyon Riski	Olası Sorunlar
<i>Ekstrüzyon</i>	Orta	Yüksek sıcaklık ve kesme kuvveti nedeniyle zincir kırılması ve viskozite azalması
<i>Enjeksiyon Kalıplama</i>	Yüksek	Yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle oksidatif ve termal degradasyon riski
<i>Kalıp Presleme</i>	Düşük-Orta	Uzun süreli sıcaklık maruziyeti nedeniyle termal degradasyon oluşabilir
<i>3D Baskı (FDM, SLA)</i>	Orta	Tekrar ısıtma ve katmanlı üretim sürecinde oksidatif bozunma görülebilir
<i>Vakum İnfüzyon ve Laminasyon</i>	Düşük	Reçine bazlı polimerlerde UV ve kimyasal bozunma riski olabilir

6.4. Degradasyonu Önleme Yöntemleri

Polimerler, ekstrüzyon ve enjeksiyon gibi yüksek sıcaklık ve basınç altında işlenen malzemeler olarak çeşitli bozunma mekanizmalarına maruz kalır. Bu bozunmalar; termal, oksidatif, hidrotermal ve fotodegradasyon olarak sınıflandırılabilir. Her bir bozunma türü, polimerin moleküler yapısını ve mekanik/optik özelliklerini etkiler. Üretim sırasında ve sonrasında ürün kalitesini korumak için uygun önleme yöntemleri uygulanmalıdır.

6.4.1. Termal Degradasyon Önleme

Termal bozunma, polimerin yüksek sıcaklığa maruz kalmasıyla zincir kırılması, renk değişimi ve mekanik özellik kaybına yol açar. Önleme yöntemleri;

- *Sıcaklık kontrolü:* Polimerin termal dayanımına uygun işlem sıcaklığı seçilmelidir.
- *İşleme süresinin kısaltılması:* Malzemenin yüksek sıcaklıkta kalma süresi minimize edilmelidir.
- *Residence time optimizasyonu:* Eriyik fazda polimerin uzun süre kalması engellenir (Zweifel et al., 2009; Crompton, 2012).

- *Gelişmiş soğutma kanalları:* Homojen ve hızlı soğutma ile sıcak nokta oluşumunun önlenmesi (Rose, 2019)
- *Termal analiz yöntemleri:* TGA, DSC ile bozunmanın sınırlarının ve güvenli işlem parametrelerinin belirlenmesi (Aldhafeeri et al., 2022)

6.4.2. Oksidatif Degradasyon Önleme

Polimerlerin ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi eriyik hâlinde şekillendirme işlemleri sırasında maruz kaldıkları oksijen, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında zincir kırılması, çapraz bağlanma, renk değişimi ve mekanik özelliklerde zayıflama gibi olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir (Allen & Edge, 1992). Bu süreç, **termal-oksidatif degradasyon** olarak adlandırılır ve hem işleme koşulları hem de çevresel faktörlerden etkilenir. Oksidatif bozunma, serbest radikallerin oluşumu ve zincir kırılmaları ile karakterizedir. Oksidatif degradasyonu önlemek veya minimize etmek için uygulanabilecek başlıca yöntemler aşağıda verilmiştir.

- **Antioksidan kullanımı:** Primer ve sekonder antioksidanlar, radikal oluşumunu ve hidroperoksitleri etkisiz hale getirir (Zweifel et al., 2009).
- **Oksijen teması azaltma:** Vakumlu ekstrüzyon, inert gaz purging (temizleme) ve oksijen bariyerli paketlenme ile oksijenle temas sınırlanır (Rabek, 1995).
- **Metal kontaminasyonunun önlenmesi:** Metal deaktivatör katkıları ve ekipman yüzey temizliği ile oksidasyon katalizörleri pasif hâle getirilir (Wypych, 2025).
- **UV stabilizatörleri:** Fotooksidatif bozunmayı önlemek için HALS ve UV absorblayıcılar eklenir (Allen & Edge, 1992).

Genel olarak, oksidatif degradasyonu önlemede **işleme parametrelerinin optimizasyonu, katkı maddesi kullanımı ve çevresel faktörlerin kontrolü** birlikte ele alınmalıdır. Özellikle yüksek hacimli üretimlerde, bu stratejilerin bir arada uygulanması ürün ömrünü ve performansını önemli ölçüde artıracaktır.

6.4.3.Hidrotermal Degradasyon Önleme

Hidrotermal degradasyon, polimerin eriyik veya yüksek sıcaklıkta su molekülleri ile reaksiyona girerek zincir kırılması (chain scission) yaşaması ve moleküler ağırlığının düşmesi olarak tanımlanır (Rabek, 1995). Bu mekanizma özellikle nem çekme eğilimi yüksek polimerlerde (higroskopik polimerler) - örneğin poliamidler (PA), polietilen tereftalat (PET), polikarbonat (PC) ve polilaktik asit (PLA) - üretim sırasında önemlidir (Grassie, 1985). Hidrotermal bozunma, ekstrüzyon ve enjeksiyon süreçlerinde hem **işleme sıcaklığı hem de nem miktarının** kontrolü ile önlenebilir.

- Ön kurutma (pre-drying): PET, PLA, PA gibi polimerler, kritik nem seviyelerinin altına düşürülmelidir (Auras et al., 2004).
- Düşük nemli işleme ortamı: Vakum veya inert gaz purging ile eriyik fazda su uzaklaştırılır (Stevens, 1998).
- Sıcaklık ve süre optimizasyonu: İşlem sıcaklığı polimerin izin verdiği aralıkta tutulmalı, kalış süresi kısaltılmalıdır (Wypych, 2025).
- Katkı maddeleri: Hidroliz inhibitörleri zincir uçlarındaki reaktiviteyi düşürür (Pilla, 2011).

Hidrotermal degradasyonun önlenmesi için **nemin polimerden uzaklaştırılması ve işleme sırasında yeniden su girişinin engellenmesi** temel stratejilerdir. Ön kurutma, düşük nemli işleme ortamı ve uygun katkı maddeleri ile bu sorun büyük ölçüde giderilebilir.

6.4.4. Kesme Kuvveti ve Mekanik Stresin Azaltılması

Yüksek kesme kuvvetleri ve mekanik stres, polimer zincirlerinin parçalanmasına, lif kırılmasına ve nihai parçanın mekanik özelliklerinde bozunmalara yol açabilir. Bu nedenle proses parametrelerinin optimize edilmesi ve kalıp tasarımının dikkatli yapılması kritik öneme sahiptir. Polimer işleme sırasında yüksek kesme kuvvetleri ve mekanik stres, zincir kırılmasına ve viskozite dalgalanmalarına yol açabilir. Önleme yöntemleri:

- *Vida devri ve geri basınç optimizasyonu:* Yüksek rpm ve geri basınç azaltılarak shear heating (kayma ısınması) minimize edilir (Altepeter, 2023).
- *Eriyik sıcaklığı kontrolü:* Polimer viskozitesi, düşük kesme ile yeterli akış sağlanacak şekilde ayarlanır.
- *Yolluk, kapı ve kalıp geometrisi optimizasyonu:* Akış yolları genişletilerek yerel basınç ve kesme şiddeti azaltılır.
- *İşleme yardımcıları:* Polimerin sürtünmesini azaltan PPA ve düşük viskoziteli katkıları kullanılır.

6.4.5. UV ve Fotodegradasyon Önleme

Polimerler, özellikle poliolefinler (PE, PP) ve bazı termoplastik aromatik polyesterler (PET, PBT) gibi UV ışığına duyarlı malzemeler, ekstrüzyon ve enjeksiyon sırasında ya da sonrasında **fotodegradasyon** riski taşırlar. Fotodegradasyon, polimer zincirlerinin UV ışığı ile etkileşmesi sonucu serbest radikal oluşumu, zincir kırılması (chain scission), çapraz bağlanma ve renk değişimi gibi olumsuz etkiler yaratır (Allen & Edge, 1992). Bu süreç, ürün dayanımı ve estetiği açısından ciddi sorunlar doğurabilir. UV ve fotodegradasyon, polimer zincirlerinin UV ışığı ile etkileşmesi sonucu serbest radikallerin oluşması ve zincir kırılması ile meydana gelir. Önleme yöntemleri:

- *UV stabilizatörler:* HALS ve UV absorblayıcılar kullanılarak zincir kırılmaları yavaşlatılır (Wypych, 2025; Allen & Edge, 1992).
- *Pigmentler ve renkli katkılar:* TiO₂, ZnO veya koyu renkli polimerler UV ışınlarını absorbe eder (Allen & Edge, 1992).
- *İşleme koşullarının iyileştirilmesi:* Sıcaklık kontrolü ve kısa kalış süreleri, stabilizatörlerin etkinliğini korur (Crompton, 2012).
- *Depolama ve ambalaj:* Ürünler ışık geçirmeyen ambalajlarda saklanmalı, dış ortam maruziyeti minimize edilmelidir.

Polimer kompozitlerin üretiminde termal, oksidatif, mekanik ve kimyasal bozunmalar görülebilir. Üretim sıcaklığı ve işleme süresi kontrol edilmeli, aşırı sıcaklık ve kesme kuvvetinden kaçınılmalıdır. Antioksidanlar, UV stabilizatörleri, nem gidericiler ve uygun dolgu malzemeleri kullanılarak bozunma önlenabilir. İdeal üretim koşulları sağlanarak kompozitin mukavemeti, yüzey kalitesi ve ömrü artırılabilir.

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Ekstrüzyon ve enjeksiyon süreçlerinde polimer kompozitlerin termal maruziyeti, malzemenin reolojik davranışı, mekanik performansı ve kimyasal stabilitesi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Yüksek işlem sıcaklıkları, polimer zincirlerinde termo-oksidatif bozunma, zincir kırılması ve yan ürün oluşumuna yol açarak moleküler ağırlık dağılımında bozunmalara sebep olabilir. Dolgu ve takviye fazlarının varlığı, hem ısı iletimini hem de ara yüzey etkileşimlerini değiştirerek lokal sıcaklık artışlarına ve potansiyel degradasyona neden olabilmektedir. Bu bağlamda, üretim parametrelerinin optimize edilmesi; sıcaklık profillerinin malzemenin termal stabilitesine uygun şekilde tasarlanması ve işleme sürelerinin minimize

edilmesi, polimer kompozitlerin mekanik bütünlüğünü ve uzun dönem performansını korumada kritik öneme sahiptir.

Dolayısıyla, termal kontrolün hassas bir şekilde uygulanması, ekstrüzyon ve enjeksiyon üretiminde kompozit malzemenin yapısal ve fonksiyonel bütünlüğünü güvence altına almak için temel bir gerekliliktir.

KAYNAKÇA

- Albertsson, A. C., & Karlsson, S. (1990). The influence of biotic and abiotic environments on the degradation of polyethylene. *Progress in Polymer Science*, 15(2), 177–192.
- Aldhafeeri, T., Alotaibi, M., & Barry, C. F. (2022). Impact of melt processing conditions on the degradation of polylactic acid. *Polymers*, 14(14), 2790.
- Allen, N. S., & Edge, M. (1992). *Fundamentals of polymer degradation and stabilization*. Springer.
- Altepeter, M., Schöppner, V., & Wanke, S. (2023). Polypropylene degradation on co-rotating twin-screw extruders. *Polymers (Basel)*, 15(9), 2181.
- Andrady, A. L. (2015). *Plastics and environmental sustainability*. John Wiley & Sons.
- Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2004). An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 835–864.
- Avcı, B., Dönmez Çavdar, A., & Mengeloğlu, F. (2022). Odun polimer kompozitlerin doğal ve yapay (suni) yaşlandırma sonrası özelliklerinde meydana gelen değişiklikler. *Ormancilık Araştırma Dergisi*, 9 (Özel Sayı), 264–270.
- Aydın, H. Y., & Altun, S. (2020). Odun kökenli malzemelerin takviyesi ile oluşturulan polilaktik asit matrisli kompozitler. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 22(3), 1061–1076.
- Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274.

- Brazel, C. S., & Rosen, S. L. (2012). *Fundamental principles of polymeric materials* (3rd ed.). Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Capone, C., Di Landro, L., Inzoli, F., Penco, M., & Sartore, L. (2007). Thermal and mechanical degradation during polymer extrusion processing. *Polymer Engineering and Science*, 47, 1813–1819.
- Ceretti, D. V. A., Edeleva, M., Cardon, L., & D'hooge, D. R. (2023). Molecular pathways for polymer degradation during conventional processing, additive manufacturing, and mechanical recycling. *Molecules*, 28, 2344. <https://doi.org/10.3390/molecules28052344>
- Chanda, M., & Roy, S. K. (2006). *Plastics technology handbook*. CRC Press.
- Crawford, R. J., & Martin, P. J. (2020). *Plastics engineering* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Crompton, T. R. (2012). *Thermal stability of polymers*. Smithers Rapra Technology.
- Farotti, E., & Natalini, M. (2018). Injection molding: Influence of process parameters on mechanical properties of polypropylene polymer. A first study. *Procedia Structural Integrity*, 8, 256–264.
- Fried, J. R. (2014). *Polymer science and technology*. Prentice Hall Press.
- Grassie, N., & Scott, G. (1985). *Polymer degradation and stabilisation*. Cambridge University Press.
- Hajduk, B., et al. (2021). Thermal and optical properties of PMMA films reinforced with nanoparticles. *Scientific Reports*, 11(1), 12282.

- Harper, C. A. (2002). *Handbook of plastics, elastomers, and composites* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Kaymakci, A., & Ayırmis, N. (2016). Influence of repeated injection molding processing on some mechanical and thermal properties of wood plastic composites. *BioResources*, 11(4), 10112–10121.
- Kissel, W. J., Han, J. H., & Meyer, J. A. (2015). Polypropylene: Structure, properties, manufacturing processes, and applications. In H. G. Karian (Ed.), *Handbook of polypropylene and polypropylene composites* (pp. 15–20). Dekker Publishing.
- Krevelen, D. W. V., & Nijenhuis, K. T. (2009). *Properties of polymers: Their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions* (4th ed.). Elsevier.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design* (3rd ed.). CRC Press.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2002). Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, 10, 19–26.
- Nicholson, J. W. (2017). *The chemistry of polymers* (5th ed.). The Royal Society of Chemistry.
- Olivares, G. S., Solis, A. S., Calderas, F., Torres, M. L., Valencia, E. H., Gonzaga, A. R., & Manero, O. (2013). Extrusion with ultrasound applied on intumescent flame-retardant polypropylene. *Polymer Engineering and Science*, 53, 2018–2026.
- Peters, S. T. (1998). *Handbook of composites*. Springer.

- Pilla, S. (2011). *Handbook of bioplastics and biocomposites engineering applications*. Wiley.
- Rabek, J. F. (1995). *Polymer photodegradation: Mechanisms and experimental methods*. Springer.
- Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion* (5th ed.). Hanser Publishers.
- Ravve, A. (2012). *Principles of polymer chemistry* (3rd ed.). Springer Science & Business Media.
- Rosato, D. V., Rosato, D. V., & Rosato, M. V. (2004). *Plastic product material and process selection handbook* (pp. 190–275). Elsevier.
- Rose, D. (2019). Plastic degradation during injection molding. American Injection Molding Institute. <https://aim.institute/plastic-degradation-during-injection-molding/>
- Salehiyan, R., & Soleymani Eil Bakhtiari, S. (2024). A review on rheological approaches as a perfect tool to monitor thermal degradation of biodegradable polymers. *Korea–Australia Rheology Journal*, 36, 295–317.
- Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93(3), 561–584.
- Slapnik, J., Lucyshyn, T., & Pinter, G. (2021). Relationships between the decomposition behaviour of composites and their processing parameters. *Polymers*, 13(24), 4448. <https://doi.org/10.3390/polym13244448>.
- Stevens, M. P. (1998). *Polymer chemistry: An introduction*. Oxford University Press.
- Strong, A. B. (2006). *Plastics: Materials and processing* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.

- Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Taubner, V., & Shishoo, R. (2001). Influence of processing parameters on the degradation of poly(L-lactide) during extrusion. *Journal of Applied Polymer Science*, 79, 2121–2316.
- Wang, J., et al. (2022). A review of research on the effect of temperature on polyurethane degradation. *Polymers (Basel)*, 14(21), 4586.
- Wiles, D. M., & Scott, G. (2006). Polyolefins with controlled environmental degradability. *Polymer Degradation and Stability*, 91(7), 1581–1592.
- Wypych, G. (2025). *Handbook of material weathering* (7th ed.). ChemTec Publishing.
- Zweifel, H., Maier, R. D., & Schiller, M. (2009). *Plastics additives handbook* (6th ed.). Hanser Publishers.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FIN THICKNESS ON HEAT EXCHANGER PERFORMANCE

Harun YAKA¹

Harun AKKUŞ²

Mehmet BALTA³

1. INTRODUCTION

Thermal management has become one of the fundamental engineering problems that directly affect system performance in today's technological applications. From industrial processes to electronic devices, and from the automotive sector to renewable energy systems, the need for effective thermal control is critical in terms of energy efficiency and system safety [1,2]. Systems used to transfer heat between two fluids separated by a solid boundary at different temperatures are called heat exchangers. Heat exchangers play a critical role across numerous sectors, such as energy production, chemical manufacturing, food processing, electronics cooling, environmental systems, waste heat utilization, industrial fabrication, HVAC systems, refrigeration technologies, and aerospace engineering [3]. Heat exchangers are fundamental thermal system components that enable the efficient transfer of heat between two or more fluids. These systems are

¹ Doç. Dr., Amasya University, Mechanical Engineering Department, Amasya, Türkiye, harun.yaka@amasya.edu.tr, ORCID:0000-0003-4859-9609.

² Doç. Dr., Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Automotive Technology, Niğde, Türkiye, hakkus@ohu.edu.tr, ORCID:0000-0002-9033-309X.

³ Lecturer, Technical Sciences Vocational School, Machinery and Metal Technologies Department, Amasya University, Amasya, Turkey, mehmet.balta@amasya.edu.tr, ORCID:0000-0002-7074-9258.

based on the principle of directing the fluid through a tube to transport and remove the accumulated heat from the system [4]. In the literature, tube-type heat exchangers are successfully used in many different application areas such as industrial heat exchangers, electronic component cooling systems, automotive cooling circuits, and thermal energy systems [5]. In the design of these systems, many parameters, such as tube diameter, material type, fluid properties, and flow regime, directly determine the overall heat transfer efficiency of the system [6]. In addition, whether the system operates with natural circulation or forced flow plays an important role in the efficiency of convection and conduction mechanisms.

Figure 1. Types of Fin-Tubes Made from Different Materials



Various types of heat exchangers have been developed for use in industrial applications [7]. Among the cooling solutions developed to meet these requirements, shell-and-tube heat exchangers stand out due to their simple structure, high heat transfer capacity, and modular design advantages. Finned tubes consist of thin fins wrapped around the tubes to increase the heat transfer surface area. Fin-tube heat exchangers, in particular, are used in a wide range of applications, from HVAC systems to the

automotive industry, due to their potential to increase heat transfer by providing a large surface area [2]. The geometric properties of finned tubes (fin height, spacing, and thickness) and material properties have a direct impact on heat transfer performance. Material selection plays a critical role in such systems in terms of thermal conductivity. Aluminum is a widely preferred material in the manufacture of finned structures due to its high thermal conductivity ($\sim 237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), low density, and corrosion resistance [1]. However, experimental analysis of such systems can be both costly and time-consuming due to complex geometries and challenging flow regimes. Therefore, numerical analyses are widely used in the preliminary design and optimization processes of engineering systems [8].

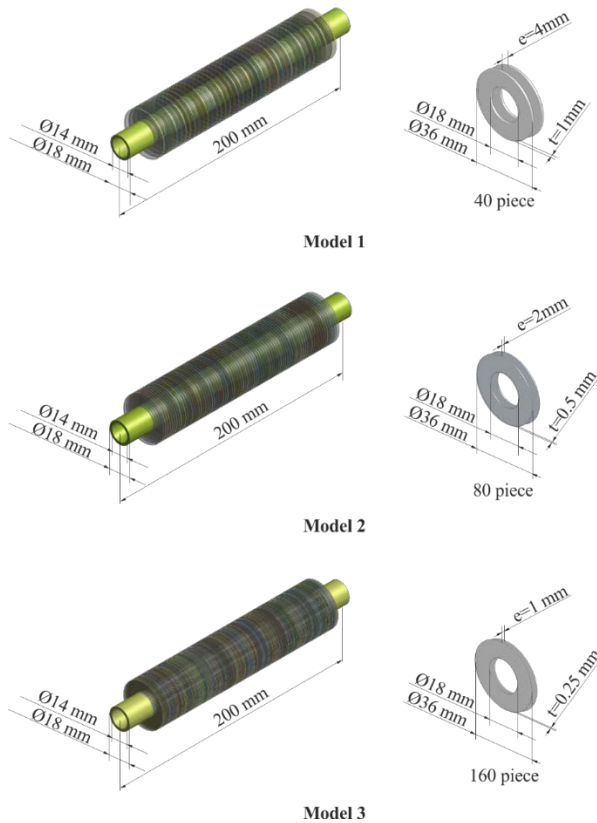
2. MATERIALS AND METHODS

In this study, numerical investigations related to heat transfer in three-dimensional and steady-state conditions were conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) principles. CFD is an engineering field that solves fundamental conservation equations such as energy, continuity, and momentum through a numerical algorithm in a computer environment. This method allows critical physical values such as heat transfer, pressure loss, lift, and drag forces to be predicted without the need for experimental setups. Consequently, CFD analyses significantly contribute to accelerating design processes and reducing product costs. ANSYS Fluent commercial software was chosen for the analysis. The solution basis of this program is based on the Finite Volume Method, which requires dividing the model into small control volumes. Conservation equations are integrated in these control volumes and converted into algebraic equation systems suitable for numerical solutions. Solutions are

continued until the defined convergence criterion is reached after linearizing the obtained discrete equations [9].

The models to be used in the study were designed using SolidWorks 2023 software. The dimensions of the models are as follows: Outer diameter 18 mm, inner diameter 14 mm, and consisting of fins of different thicknesses with an outer diameter of 36 mm and an inner diameter of 18 mm placed on the tube. The dimensions of the models are given in Figure 2.

Figure 2. Dimensions of the Models Used in the Study

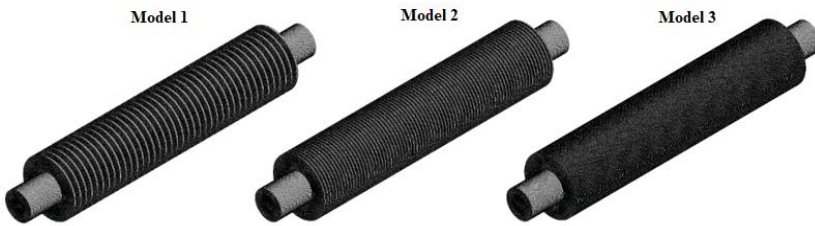


As shown in Figure 2, three different models have been designed. While creating the models, the amount of material used for the fins was kept constant in order to determine the most suitable design. Model 1 was created with a fin thickness of 1 mm

and a distance between fins of 4 mm. Model 2 was created with a fin thickness of 0.5 mm and a distance between fins of 2 mm. Model 3 was created with a fin thickness of 0.25 mm and a distance between fins of 1 mm.

It is known that numerical analysis results depend on the number of cells. To be independent of the number of cells, numerical analyses were performed with different numbers of cells to determine the appropriate number of cells. As a result of the numerical analyses, Model 1 had 1,121,070 cells, Model 2 had 1,075,534 cells, and Model 3 had 1,674,404 cells. Figure 3 shows the cell structures of the three models.

Figure 3. Image of the Cell Structures Belonging to the Models



Water at a temperature of 353 K has been defined as the heat transfer fluid, and aluminum has been defined as the heat exchanger material. The velocity of the hot water entering the heat exchanger and the inlet temperature are defined as the velocity-inlet and pressure-outlet boundary conditions. Since air flow will occur on the outer surfaces of the tubes, the convection coefficient for air has been defined for the outer surfaces of the tubes and the fins. For air, these values are set as $h=15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ and $T=293 \text{ K}$.

The pressure-velocity coupling was resolved using the PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) algorithm, ensuring consistency between the continuity and momentum equations. To discretize the convective terms, a second-order upwind scheme was employed for improved accuracy. The

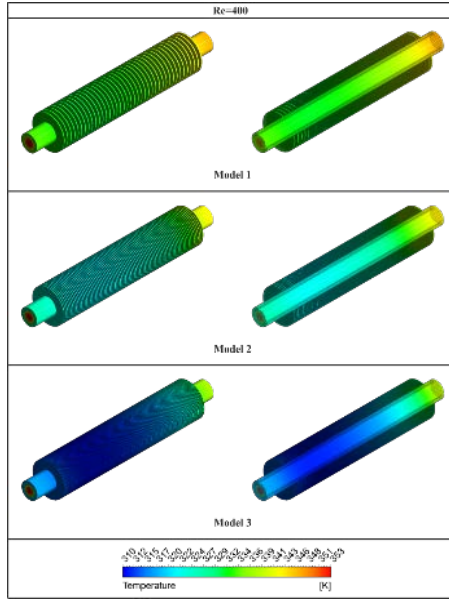
simulations proceeded iteratively until the residuals for the momentum, continuity, and energy equations were reduced below 10^{-6} , indicating numerical convergence [10].

3. NUMERICAL RESULTS

This section presents the analysis results for three different Reynolds numbers calculated for heat exchangers in three models created with straight tubes and different fin thicknesses. The temperature contours obtained from the analysis are presented.

Figure 4 shows the temperature distributions of three different heat exchangers for $Re = 400$. In Model 3, the fin thickness and the distance between fins are the smallest, resulting in a higher number of fins. Thus, Model 3 has the largest surface area among the models. When comparing the models, it was observed that there were significant differences in heat transfer in Model 3, which had an increased surface area, compared to the other models. Heat transfer was followed by Model 2 and Model 1, respectively. Temperature differences were observed to be 5.8 K, 9 K, and 12.3 K for Model 1, Model 2, and Model 3, respectively.

Figure 4. Temperature Distributions for Re=400



Analysis results for Reynolds number 800 are shown in Figure 5. An increase in water inlet velocity caused a decrease in the inlet-outlet temperature difference. The highest temperature difference occurred in Model 3, which has the largest surface area. For Re=800, the temperature differences for Models 1, 2, and 3 were 3.4 K, 5.5 K, and 7.9 K, respectively.

Figure 5. Temperature Distributions for Re=800

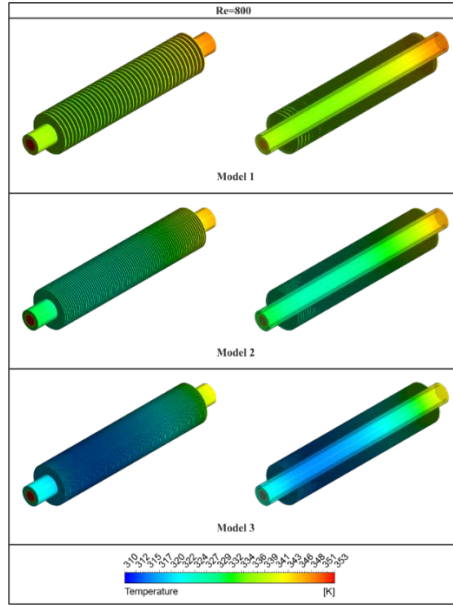


Figure 6 shows the temperature distributions for Re=1200. It has been observed that an increase in inlet velocity has a significant effect on heat transfer. In this analysis, it was determined that the increase in inlet velocity resulted in a smaller inlet-outlet temperature difference compared to other Re numbers. The resulting temperature differences were 2.5 K, 4.2 K, and 6 K for Model 1, Model 2, and Model 3, respectively.

Figure 6. Temperature Distributions for Re=1200

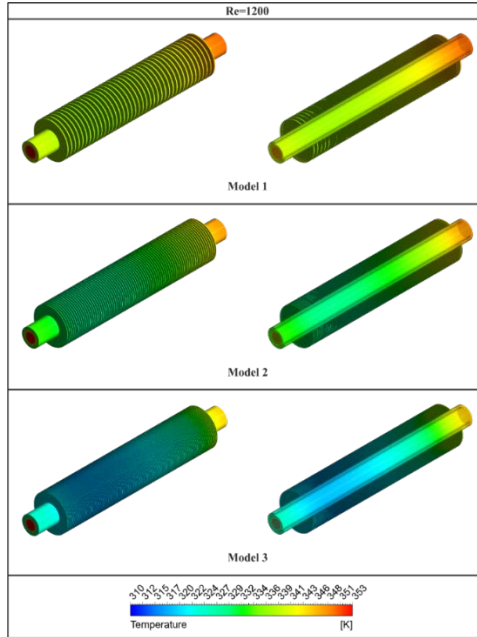
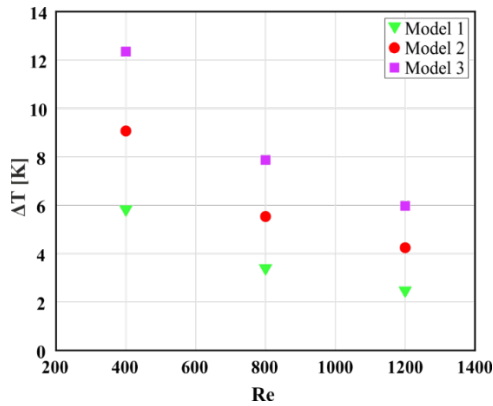


Figure 7 graphically shows the temperature differences for different Re numbers. The greatest temperature difference for all Re numbers occurred in Model 3, which had an increased surface area. A decrease in the Re number revealed a decrease in temperature differences.

Figure 7. Comparison of Temperature Differences for Different Re Numbers



4. RESULTS

The rapid increase in global energy consumption brings with it an increased demand for energy. Considering that a large portion of the current energy supply is met by fossil fuels and the observed decline in the reserves of these resources, the concepts of efficiency and sustainability in energy use are of critical importance. In this context, heat exchangers are fundamental engineering equipment used to transfer heat from one medium to another. With the optimal design and accurate selection of heat exchangers, it is possible to achieve high heat transfer performance even in limited volumes. This optimization contributes to energy savings by directly increasing the overall energy efficiency of systems and supports the sustainable use of energy resources. As a result, heat exchangers are emerging as an integral component of efficiency-focused solutions developed to address the current energy crisis.

This study numerically investigates the effect of flat tube heat exchangers with fins of different thicknesses on heat transfer. Three different models were designed for heat exchangers of the same weight, varying in fin thickness and number. Model 3, with the thinnest fins and the largest surface area, was found to have the highest temperature difference.

REFERENCES

1. Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill Education.
2. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons.
3. Kakac, S., & Liu, H. (2002). Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. CRC Press.
4. Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons.
5. Hewitt, G. F., Shires, G. L., & Bott, T. R. (1994). Process Heat Transfer. CRC Press.
6. Manglik, R. M., & Bergles, A. E. (1995). Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part I-Laminar flows. *Journal of Heat Transfer*, 117(4), 756–764.
7. MAXWOR Makina Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi. (06.10.2025). *Finli Borulu Eşanjörler*. <https://www.maxwor.com/product/finli-borulu-esanjorler>
8. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education.
9. ANSYS Inc. (2022). ANSYS Fluent Theory Guide.
10. Bressloff, N. W. (2001). A parallel pressure implicit splitting of operators algorithm applied to flows at all speeds. *International journal for numerical methods in fluids*, 36(5), 497-518.

KALİTE İYİLEŞTİRME SÜRECİNDE HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ: TALAŞLI İMALAT SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA

Funda KAHRAMAN¹

İsmail ÇAKMAKÇI²

Mehmet KÜÇÜK³

1. GİRİŞ

Artan rekabet koşulları nedeniyle imalat sektöründeki işletmelerin, ürün ve üretim süreçlerini sürekli güncel tutmaları büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, uzun vadeli iş başarısındaki riskleri azaltmak ve rekabet avantajını korumak için enerji tüketimi ve atık yönetimi gibi alanlarda verimlilik sağlanması, müşteri beklentilerinin karşılanması, maliyetlerin düşürülmesi belirleyici unsurlar olacaktır. Üreticiler, ürün ve süreç kalitesini artırmak ve hataları önlemek amacıyla kapsamlı çalışmalar yürütmektedir. Kalite ve süreç iyileştirme çalışmalarında, istatistiksel yöntemler etkili şekilde kullanılmaktadır.

Hata türü ve etkileri analizi (HTEA), sürekli iyileşme prensibi doğrultusunda öğrenilen hataların tekrarlanmasını önlemeyi amaçlayan ve toplam kalite yönetimi stratejisini benimsemiş şirketlerde kullanılan temel teknikler arasında yer

¹ Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, fkahraman@tarsus.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1661-3376.

² Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 33400, Tarsus/Mersin, ORCID: 0009-0006-8189-0552.

³ Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 33400, Tarsus/Mersin, ORCID: 0000-0001-9196-0784.

almaktadır (Akın, 2005; Çevik ve Aran, 2009; Hasar ve Yalçınkaya, 2021). İmalat endüstrisinde kalite geliştirme amacıyla HTEA yöntemini kullanan çalışmalar yapılmıştır (Dağcı Yüksel ve Ersöz, 2023). HTEA, imalat süreçlerinde, hataların azaltılması, düzeltilmesi ya da tamamen ortadan kaldırılması amacıyla yaygın olarak kullanılan biri yaklaşımıdır (Arslan Kazan, Kuruca ve Karatop, 2022; Koç, 2023).

1.1. Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA)

HTEA ilk olarak 1940’larda ABD ordusu tarafından güvenilirlik analizlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. NASA, 1960’lardan sonra havacılık sistemlerinde kullanmıştır. Askeri ve havacılık alanında başarılı uygulamaları sonrasında diğer alanlarda da uygulamaları başlamıştır (Akın, 2005; Kadioğlu, Uçmuş ve Gönen, 2009; Stamatis, 2003; Stamatis, 2014; Sağbaş ve Kahraman 2020; Şençoban Kaya ve Alaykiran, 2019).

ABD’de otomotiv sektöründe 1970’lerde ilk olarak Ford Motor kullanmıştır. Avrupa’da, 1985 yılında FIAT, Renault ve Peugeot Citroen Grubu tarafından uygulanmıştır. 1993’te Otomotiv Endüstrisi Faaliyet Grubu (AIAG), Amerikan Kalite Kontrol Topluluğu (ASQC) tarafından otomotiv alanında HTEA standardı oluşturulmuştur (Hasar ve Yalçınkaya, 2021). Türkiye’de HTEA uygulamaları 1985’ten itibaren görülmektedir (Şençoban Kaya ve Alaykiran, 2019).

HTEA, otomotiv başta olmak üzere imalat endüstrisinde tahminleme için kullanılmıştır. Son dönemlerde, ürün geliştirme ve mevcut tasarımlarda önemli iyileştirmeler sürecinde ortaya çıkabilecek olası hataların türünü, sebebini, frekansını-sıklığını ve etkilerini tespit etmek amacıyla kalite ve güvenilirlik öncelikli birçok alanda kullanılmaktadır. Sistemik bir prosedür olan HTEA kullanım alanları; savunma, uzay-havacılık, ilaç,

yenilenebilir enerji, yazılım geliştirme, lojistik olarak sıralanabilir.

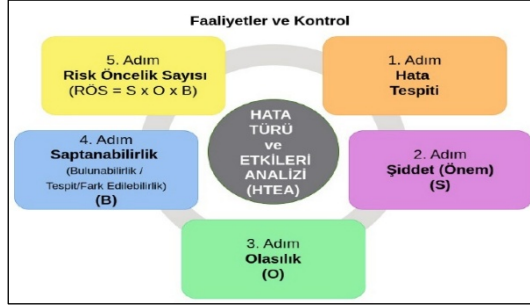
HTEA için kaynaklarda farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Genel olarak, HTEA (i) sistem, (ii) tasarım, (iii) süreç, (iv) servis aşamalarında oluşabilecek hataları ve etkilerini müşteriye ulaşmadan belirlemek ve hataları iyileştirmek-azaltmak için uygulanan sistematik bir mühendislik yaklaşımıdır (Baysal, Canıyılmaz ve Eren, 2002; Hasar ve Yalçınkaya, 2021; Koç, 2023; Sağbaş ve Kahraman, 2020; Stamatis, 1995, 2003, 2014; Çevik ve Aran, 2009). HTEA’da iki temel kavram hataların oluşumunu ve müşterilere etkilerini içeren “hata modu” ile hata sonuçlarının incelendiği “etki analizi”dir (Yen ve Zeng, 2010). Hataların engellenmesi konusunda yürütülen çalışmalar zamanla değişmiştir. Eski ve yeni düşünce sisteminin değerlendirilmesi Tablo 1’de görülmektedir (Akın, 2005; Sağbaş ve Kahraman, 2020).

Tablo 1. Hata önleme düşüncesi sistematigi eski ve yeni yaklaşımlar (Akın, 2005)

Eski düşünce	Yeni düşünce
Fireleri izleme	Firelerin azaltılması/sıfırlanması
Güvenilirliği belgeleme	Güvenilirliği artırma
Problemleri çözüme	Problemleri öngörme/engelleme

HTEA’da hatanın önemi, hataların müşteri memnuniyetine negatif yansımalarını ifade eder. Hataların etki seviyeleri arttıkça önemi de artar. Risk öncelik sayısı (RÖS), riskin önceliğini belirlemeye yarayan bir göstergedir. HTEA genellikle Şiddet/Önem (ağırlık), Olasılık/Frekans (sıklık), Tespit (saptama) üç indis ile değerlendirilir (Baysal, Canıyılmaz ve Eren, 2002; Koç, 2023). ABD’de ve Japonya’da etkin olarak kullanılan HTEA çizelgelerinde her hatanın önemi (S), olasılığı (O) ve hataların keşfedilmesinin/belirlenmesinin zorluk derecesi (D) ve kritik değer (C) gösterilmektedir. Risk öncelik göstergesi; olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik değerlerinin çarpımı ile elde

edilmektedir (Akın, 2005). Şekil 1’de HTEA proses sistematığı gösterilmiştir.



Şekil 1. HTEA prosesi (Sağbaş ve Kahraman, 2020; Yen ve Zeng, 2010)

Stamatis (1995, 2003, 2014)’e göre HTEA çalışmalarında temel kavramların açıklamaları şu şekildedir:

- Fonksiyon ürün ya da süreçten beklenen hedeflerdir.
- Hata bir fonksiyonda başarısızlıktır.
- Hata türü bir sistemdeki fonksiyonun yerine getirilmemesidir.
- Hata etkisi sistemde fonksiyonun karşılanmadığı durumda müşteriden alınan olumsuz geri bildirimdir.
- Hata nedeni fonksiyonun beklentileri karşılamasına engel olan faktörlerdir.
- Şiddet (S) hatanın müşteri üzerindeki etki derecesidir.
- Olasılık (O) hatanın ortaya çıkma olasılığının frekansıdır.
- Belirlenebilirlik/Bulunabilirlik (B) hatanın müşteriye ulaşmadan önce kontroller ile müşteriye ulaşmadan önce tespit edilebilme derecesidir.
- Kritiklik (C) bir hatanın oluşma sıklığı ile müşteriye ulaşmadan önce tespit edilebilme olasılığının çarpımıdır.

- RÖS; şiddet(S), olasılık(O) ve bulunabilirlik(B) değerlerinin çarpımıdır.

Talaşlı imalat, genellikle metal malzemeden kesici takımlar yardımıyla talaş kaldırma prensibiyle istenen boyut, şekil ve yüzey kalitesine sahip parçaların üretilmesini sağlayan geleneksel imalat yöntemleridir. Metal, plastik ve kompozit gibi farklı malzemelerde hassas işleme ve geniş uygulama esnekliğiyle talaşlı imalat yöntemleri, dünyada ve ülkemizde otomotiv, savunma sanayisi ve havacılık gibi hemen her sektörde kritik yere sahiptir.

1.2. Literatür İncelemesi

Literatürde HTEA'nın birçok alanda farklı uygulamalarını inceleyen çalışmalar görülmektedir. HTEA ile ilgili örnek çalışmalar özetlenmiştir.

Dağcı Yüksel ve Ersöz (2023), HTEA ve veri madenciliği yardımıyla bir talaşlı imalat işletmesinde hataların nedenlerini belirlemeyi ve hataları ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. Önleyici faaliyetler sonucunda, yüksek risk değerlerine sahip hataların RÖS değerlerinde önemli iyileşme sağlamıştır. Dwianda (2021), CNC freze pnömatik sistem arızalarını ve nedenlerini belirlemek ve alınabilecek önlemler üzerine bir HTEA çalışması yürütmüştür. Öncelikli sorun olarak pnömatik valf bileşenlerinde meydana gelen sızıntıların en kritik risk (en yüksek RPN değeri) tespit etmiştir. Arızalarının temel nedenleri olarak, kompresörden gelen havanın yüksek nem oranı (RPN 392) ve düşük hava kalitesi (RPN 384) olduğunu belirlemiş ve basınç düşüşlerine neden olduğunu belirtmiştir. Kadioğlu, Uçmuş ve Gönen (2009), İzmir Kemalpaşa'da faaliyet yürüten işletmede tasarım kaynaklı hataları belirlemek ve imalat öncesinde önlemek için Tasarım-HTEA gerçekleştirmiştir. Kebede (2025), CNC makinelerde tekrarlayan hataların nedenlerini tespit etmek amacıyla HTEA ile birlikte Pareto ve Balık Kılçığı (Ishikawa) diyagramlarını entegre

ettiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Pantazopoulos ve Tsinopoulos (2005) çalışmasında metal şekillendirme sürecinde oluşabilecek hata modlarını ile bunların olası nedenlerini ve üretim kalitesi üzerindeki etkilerini tanımlamayı ve analiz etmeyi amaçlamıştır. Türedi ve Bircan (2016) çalışmasında imalat sektöründe ürün taşıma, istifleme, sınıflandırma için kullanılan gantry kartezyen robotların performansını HTEA yöntemini kullanarak incelemiştir.

Arslan Kazan, Kuruca, ve Karatop (2022), çalışmada endüstriyel mutfak ürünleri üretimi yapan bir işletmede talaşlı imalat atölyesinde HTEA çalışması uygulamıştır. HTEA yöntemini ERP programına entegre ederek analizlerde daha hızlı ve doğru sonuçlar elde etmiştir. Arslan Kazan, Kuruca, ve Karatop (2023), çalışmada endüstriyel mutfak ürünleri üretimi yapan bir işletmede talaşlı bölümünde geleneksel HTEA ve Fuzzy-HTEA uygulamıştır. Ulaştığı sonuçları karşılaştırmıştır. Sağbaş ve Kahraman (2020) elektrikli ev aletleri üretimi yapan bir işletmede HTEA çalışması ile hatalı ürün miktarını düşürmeyi amaçlamıştır. Proses HTEA ile RÖS değerlerini belirlemiş ve yüksek değerlerine karşı önleyici faaliyetler gerçekleştirmiştir. Süreçte iyileşme sağlamıştır.

Baysal, Canıyılmaz ve Eren (2002), otomotiv alanında egzoz bagası imalatında HTEA çalışması yürütmüştür. Çevik ve Aran (2009) piston imalat sürecini için HTEA çalışması gerçekleştirmiştir. On hata türü belirlemiş ve RÖS değerlerini hesaplamıştır. Müşteri şikayetlerinde %47,4 azalma ile birlikte en önemli üç hatada %62, %52,4 ve %52,4 oranlarında azalma sağlamıştır. Sönmez ve Unğan (2017) otomotiv sektöründe metal işleri konusunda faaliyet yürüten bir işletmede pul, yay türevlerinin imalat sürecinde malzeme kabulü, kalite kontrolü, stok ve sevkiyat süreçleri için HTEA çalışması gerçekleştirmiştir.

Düzdar ve Özdemir Cihan (2024), cam sanayisinde kalite iyileştirme ve müşteri şikayetlerini azaltma amacıyla HTEA ve pareto çalışması yürütmüştür.

Eyüboğlu ve Özfirat (2023), çalışmada enerji üretim tesisinde rüzgar türbini kurulum, bakım işlemlerini iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirmiş ve HTEA çalışması yürütmüştür.

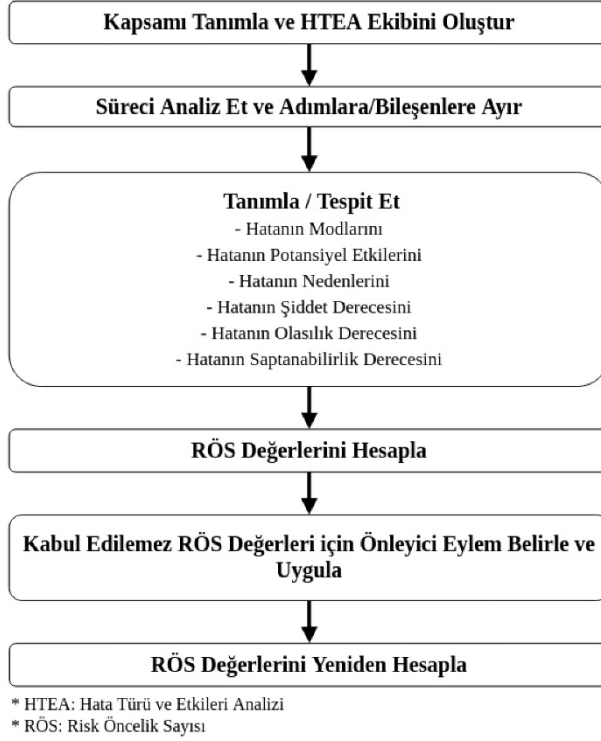
Huang vd., (2020) geleneksel HTEA yöntemi için yapılan gelişmeleri analiz etmek amacıyla 1998-2018 yılları arasında yayımlanmış 263 makaleyi sistematik olarak incelemiştir. HTEA iyileştirme konusundaki çalışmaların 2013 sonrasında hızla arttığını belirlemiştir. Anahtar kelime analizinde “HTEA”, “sistem”, “risk değerlendirmesi”, “kritiklik analizi”, “hata modu” ve “önceliklendirme” literatürde en sık kullanılan anahtar kelimeler olduğunu tespit etmiştir. Zuniawan (2020), çeşitli sektörlerdeki HTEA uygulamalarının faydalarını ve zorluklarını değerlendiren sistematik bir literatür çalışması yapmıştır. Çalışma, HTEA’nın kalite yönetiminde, risk azaltmada ve operasyonel verimliliği artırmada kritik yerini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi (MTOSB)’de pompa imalat yapan bir firmanın talaşlı imalat departmanında HTEA ve iyileştirme gerçekleştirilmiştir. Yürütülen çalışmayla firmada kalite iyileştirme amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi (MTOSB)’de pompa imalat alanında faaliyet gösteren bir işletmede HTEA çalışması yürütülmüştür. İşletme, toplamda 10.000m² kapalı alanı ve 65 çalışanı bulunmaktadır. Firma bünyesinde talaşlı imalat, üretim, pres, kaynak, depo ve atölye olmak üzere altı birim bulunmaktadır. HTEA çalışması, talaşlı imalat bölümünde

gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın işlem adımları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. HTEA uygulamasının iş akış şeması

HTEA çalışması her bir hata türü ve muhtemel etkileri tespit edilmiştir. Her bir hata için Tablo 2’te gösterilen 1-10 aralığında şiddet, olasılık, saptanabilirlik derecelerinin çarpımına göre RÖS seviyeleri (Eşitlik 1 ile) hesaplanmıştır.

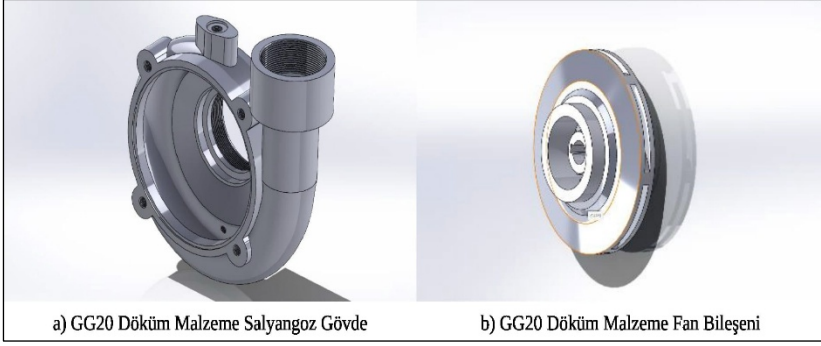
$$RÖS = Şiddet (S) \times Olasılık (O) \times Saptanabilirlik (B) \quad (1)$$

Tablo 2. Şiddet, olasılık, saptanabilirlik değerlerinin derecelendirme skalası (Stamatis, 1995, 2003, 2014).

Şiddet (S)	Derece	Olasılık (O)	Derece	Saptanabilirlik (B)	Derece
Yok	1	Neredeyse Hiç	1	Neredeyse Kesin	1
Çok Önemsiz	2	Çok Zor	2	Çok Yüksek	2
Önemsiz	3	Zor	3	Yüksek	3
Çok Düşük	4	Çok Az	4	Ortanın Üstü	4
Düşük	5	Az	5	Orta	5
Orta	6	Orta	6	Az	6
Yüksek	7	Ortanın Üstü	7	Çok Az	7
Çok Yüksek	8	Yüksek	8	Zor	8
Uyarılı Tehlikeli Etki	9	Çok Yüksek	9	Çok Zor	9
Uyarısız Tehlikeli Etki	10	Neredeyse Kesin	10	Neredeyse İmkansız	10

RÖS değerleri en yüksek RÖS=1000, orta derece RÖS=125 ve en küçük RÖS=1 olarak hesaplanabilir. RÖS değerleri tespit edildikten sonra en yüksek değerden başlanarak en düşük değere kadar düzeltme için önlemler alınarak ilerlenmektedir. Hesaplanan RÖS değeri büyüdükçe hatanın önceliği artmaktadır. Literatürde HTEA çalışmalarında önlem alma kararı için Ford Motor Şirketine göre üç durumda ifade edilmektedir. (Eyüboğlu ve Özıfırat, 2023; Sönmez ve Unğan, 2017). İlk olarak RÖS değerinin 40'tan düşük olması, risklerin mevcut kontrol operasyonları ile yönetilebileceğini göstermektedir. İkinci durum RÖS'ün 40 ile 100 arasında yer alması, riskin yönetilebilir olduğunu ancak iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır. Proaktif tedbirler ile verimliliğin artacağını göstermektedir. Son durum RÖS'ün 100'ün üzerinde olması riskin yüksek kritiklik seviyesinde olduğunu göstermektedir. Risk azaltma stratejilerinin başlatılması zorunludur.

Sunulan çalışmada incelenen GG20 döküm malzemenin imal edilen salyangoz gövde ve fan bileşenlerinin CAD modelleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Pompa bileşenlerinin CAD modelleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada iki farklı elemanın imalatı için hataların kaynağı araştırılmıştır. İlk olarak GG20 döküm malzemeden üretilen salyangoz gövde parçasının CNC torna tezgahında işlemi ve ikincisi GG20 döküm malzemeden üretilen pompa fan bileşeninin balans tezgahında işlemi için HTEA çalışması gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar değerlendirmiş ve sunulmuştur.

3.1. CNC Torna Tezgahında İşlenen Salyangoz Gövde için HTEA Çalışması

GG20 döküm malzemeden üretilen, yatay milli yüzeysel pompa için salyangoz gövde parçasının CNC torna tezgahında iç çap işleme sürecindeki hataları ve değerlerini belirlemek için HTEA çalışması gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir. CNC torna tezgahında gövde parçasının işlenmesi, (i) CAM verisinin tezgaha gönderilmesi, (ii) seri imalat öncesinde tezgahın ayarlanması ve prototip imalatı (iii) seri üretime geçilmesi olarak üç adımdan oluşmaktadır. Tespit edilen hata türleri; hatalı veri aktarılması, operatörün hatalı yönlendirilmesi, hatalı prototip, küçük değerde iç çap olarak belirlenmiştir. Hesaplanan RÖS değerlerine sonrasında önleyici faaliyetler

belirlenmiş ve uygulanmıştır. Ulaşılan sonuçlar Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Parça işleme süreci hataları ve RÖS seviyeleri

İşlem	Alt adımlar	Hata türleri	Hata etkileri	S	Nedenler	O	Kontrol	B	RÖS
Parça imalatı	CAM verisinin tezgaha gönderilmesi	Hatalı veri aktarılması	Hurda ürün	6	CAM uzmanının yetersizliği veya dikkatsizliği	6	İmalat sorumlusu kontrol onayını	8	288
			Ek personel gereksinimi	4					192
		Operatörün hatalı yönlendirilmesi	Hurda ürün	6					288
			Ek personel gereksinimi	4					192
	Tezgahın ayarlanması ve prototip imalatı	Hatalı prototip	Hurda ürün	3	Personelin hatalı program aktarması	6	İmalat sorumlusu kontrol onayını	3	54
					Parçanın yanlış bağlanması				
					Yanlış master seçimi				
			Ek personel gereksinimi	2	Katerin yanlış bağlanması	6	CAM uzmanının operatörü operasyonel yönlendirmesi	3	36
					Yanlış takım ucunun kullanımı				
					Yanlış programı çalıştırma				
	Torna işlemi	Küçük değerde iç çap	Hurda ürün	8	CAM uzmanının yetersizliği ya da dikkatsizliği	8	Kalite kontrolden prototip onay	5	320
			Montajda uyumsuzluk	9	Operatörün yanlış sıfır alması		Operatörlerin her parçada kontrol ve ölçüm yapması		360
					Takım ucunun aşınması				
			Ek personel gereksinimi	7	Yanlış takım kullanımı		Periyodik kalite kontrol		280

(* S: Şiddet, O: Olasılık, B: Saptanabilirlik)

Tablo 4. Önleyici faaliyetler ve yeni RÖS seviyeleri

İşlem	Alt adımlar	Hata türleri	Hata etkileri	Önleme	Sorumlu	S	O	B	RÖS
Parça imalatı	CAM verisinin tezgaha gönderilmesi	Hatalı veri aktarılması	Hurda ürün	İmalat sorumlusunun program onayı	İmalat sorumlusu	4			64
			Ek personel gereksinimi	Personel eğitimi	Kalite kontrol mühendisi	2	4	4	32
				Program listesi oluşturma	CAM uzmanı				
		Operatörün hatalı yönlendirilmesi	Hurda ürün	Operatöre iş emri aktarımı	CAM uzmanı	4			48
			Ek personel gereksinimi			2	4	3	24
	Tezgahın ayarlanması ve prototip imalatı	Hatalı prototip	Hurda ürün	Hurda yönetimi eğitimi	İmalat sorumlusu, Müdür, CAM uzmanı	2			40
			Ek personel gereksinimi			1	5	4	20
	Torna işlemi	Küçük değerde iç çap	Hurda ürün	Operatörün talimatlara uyması	İmalat sorumlusu, Kalite kontrol mühendisi	7			70
			Montajda uyumsuzluk	Tezgah sıfır alma		8	5	2	80
				Takım ucunun aşınma kontrolü					
			Ek personel gereksinimi	Takım kontrolü	Operatör, Kalite kontrol mühendisi	6			60
				Kalite kontrol personelinin onayı					

(* S: Şiddet, O: Olasılık, B: Saptanabilirlik)

3.2. Balans Tezgahında İşlenen Fan için HTEA Çalışması

GG20 döküm malzemeden üretilen fan parçasının balans tezgahında balansı alınması işleminde karşılaşılan hataların belirlenmesi için HTEA gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir. Balans alma işlem adımları; (i) tezgahın ayarlanması ve dengelenmesi, (ii) balans ayarının referans nokta ve değerde alınması, (iii) frezenin yüksekliği olarak sıralanmaktadır. Belirlenen hatalar; tezgah balans ayarında hata, operatörün hatalı yönlendirilmesi, parça balans ayarının noktası

ve değerinin kayması, derin talaş kaldırma olarak belirlenmiştir. Hesaplanan RÖS değerleri sonrasında önleyici faaliyetler belirlenmiş ve uygulanmıştır. Ulaşılan sonuçlar Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Balans alma süreci hataları ve RÖS seviyeleri

İşlem	Alt adımlar	Hata türleri	Hata etkileri	S	Nedenler	O	Kontrol	B	RÖS
Balans alma	Tezgahın ayarlanması ve dengelenmesi	Tezgah balans ayarında hata	Hurda ürün	8	Operatörün yetersizliği	6	İmalat sorumlusu kontrolü, onayını	8	384
			Ek personel gereksinimi	4					192
		Operatörün hatalı yönlendirilmesi	Hurda ürün	7					336
			Ek personel gereksinimi	4					192
	Balans ayarının referans nokta ve değerinde alınması	Parça balans ayarının noktası ve değerinin kayması	Ürünün görsel kalitesinin düşük olması	4	Personelin derin talaş kaldırması	7	İmalat sorumlusu kontrolü, onayını Kalite kontrol sorumlusunun kontrolü, onayını	9	252
			Ek personel gereksinimi	5					315
	Frezenin yüksekliği	Derin talaş kaldırma	Ürünün fireye ayrılması ve kullanımda yıpranma	9	Personelin bilgilendirilmemesi	7	Prototip onayı	2	126

(* S: Şiddet, O: Olasılık, B: Saptanabilirlik)

Tablo 6. Önleyici faaliyetler ve yeni RÖS seviyeleri

İşlem	Alt adımlar	Hata türleri	Hata etkileri	Önleme	Sorumlu	S	O	B	RÖS
Balans alma	Tezgahın ayarlanması ve dengelenmesi	Tezgah balans ayarında hata	Hurda ürün	Operatörün eğitimi	İmalat sorumlusu, Mühendis	3	2	5	30
			Ek personel gereksinimi						
		Operatörün hatalı yönlendirilmesi	Hurda ürün						
			Ek personel gereksinimi						
	Balans ayarının referans nokta ve değerde alınması	Parça balans ayarının noktası ve değerinin kayması	Ürünün görsel kalitesinin düşük olması	Personel eğitimi		2	4	4	32
			Ek personel gereksinimi						
	Frezenin yüksekliği	Derin talaş kaldırma	Ürünün fireye ayrılması ve kullanımda yıpranma	Teknik dokümantasyonun sunulması ve personelin bilgilendirilmesi		3	2	3	18

(* S: Şiddet, O: Olasılık, B: Saptanabilirlik)

4. SONUÇ

Hata türü ve etkileri analizlerinde, riskler sürekli olarak değerlendirilir ve proaktif önleyici stratejilerle etkili bir şekilde minimize edilmektedir. Bu yaklaşım, uzun vadede şirket performansı artırırken süreçlerde sürekli iyileşmeyi teşvik etmektedir.

Çalışma, Mersin-Tarsus OSB’de pompa imalatı yapan bir tesisin talaşlı imalat biriminde yürütülmüştür. Ürün kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla, Proses Hata Türü ve Etkileri Analizleri (P-FMEA: Process Failure Modes and Effect Analysis) uygulanmıştır.

Çalışmada, GG20 döküm malzemeden üretilen salyangoz gövde parçasının CNC torna tezgahındaki işleme süreci ile GG20 döküm malzemeden üretilen pompa fan bileşeninin balans tezgahındaki işlemleri dikkate alınarak potansiyel hata kaynakları derinlemesine araştırılmıştır. Riskler proaktif bir yaklaşımla değerlendirilmiş ve belirlenen kritik hata modları için önleyici faaliyetler ve iyileştirme çalışmaları uygulanmıştır. Uygulanan bu stratejiler sonucunda RÖS değerlerinde önemli düşüş sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akın, H. B. (2005). Hata türü ve etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama. *Öneri Der-gisi*, 6(24), 271-278. <https://doi.org/10.14783/maruoneri.680987>
- Arslan Kazan, C., Karatop, B., ve Koruca, H., (2023). Cost optmization with internet supported fmea and fuzzy fmea analysis. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(2), 950-970. <https://doi.org/10.30798/makuiibf.1097590>
- Arslan Kazan, C., Koruca, H., ve Karatop, B. (2022). Hata türü ve etkileri analizi (HTEA): İmalat atölyesinde anlık hata ve durum izleme uygulaması. *Mühendislik Bi-limleri ve Tasarım Dergisi*, 10(3), 804-815. <https://doi.org/10.21923/jesd.1070951>
- Baysal, M. E., Canıyılmaz, E., ve Eren, T. (2002). Otomotiv yan sanayiinde hata türü ve etkileri analizi. *Teknoloji Dergisi*, 5(1-2), 83-90.
- Çevik, O., ve Aran, G. (2009). Kalite iyileştirme sürecinde hata türü etkileri analizi (FMEA)* ve piston üretiminde bir uygulama. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 8(16), 241-265.
- Dağcı Yüksel, B., ve Ersöz, F. (2023). Failure mode and effects analysis and data mi-ning approach to quality improvement in manufacturing industry. *Proceedings on En-gineering Sciences*, 5(1), 49-62. <https://doi.org/10.24874/pes05.01.005>
- Düzdar, İ., ve Özdemir Cihan, T. (2024). Cam sektöründe müşteri şikayetlerindeki hata oranlarına Pareto ve HTEA uygulaması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(4), 2358-2377. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1262078>

- Dwianda, Y. (2021). Failure mode and effect analysis (FMEA) of pneumatic system of cnc milling machine. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering-*, 65(1), 14-18.
- Eyüboğlu, A. K., ve Özfirat, M. (2023). Rüzgâr enerjisi tesislerinde başlıca tehlikelerin HTEA risk analiz yöntemi ile değerlendirilmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1(1), 1-11.
- Hasar, M., ve Yalçinkaya, N. (2021). Üretim sektöründe hata türü ve etkileri analizi. *Ankara. İksad Yayınevi*.
- Huang, J., You, J.-X., Liu, H.-C., ve Song, M.-S. (2020). Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda. *Reliability Engineering ve System Safety*, 199, 106885. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106885>
- Kadıoğlu, M., Uçmuş, E., Gönen, D. (2009). Makine imalatı yapan bir işletmede tasarım hata türü ve etkileri analizi ile hata kaynaklarının belirlenmesi ve kalitenin iyileştirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 42-55.
- Kebede, S. (2025). Application of FMEA in root cause analysis of recurrent failures in industrial CNC Machines. *International Journal of Mechanics of Solids*, 6(1), 09-14.
- Koç, K.H. (2023). Endüstriyel uygulamalar için kalite güvence teknikleri. *İstanbul: İÜC Yayınevi*.
- Pantazopoulos, G. A., ve Tsinopoulos, G. (2005). Process failure modes and effects analysis (PFMEA): A structured approach for quality improvement in the metal forming industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 5, 5-10. <https://doi.org/10.1361/15477020522933>

- Sağbaş, A., ve Kahraman, B. (2020). Hata türü etkileri analizi ile elektrikli ev aletleri üretiminde süreç verimliliğinin geliştirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(2), 1-7.
- Sönmez, Y., ve Unğan, M. C. (2017). Hata türü etkileri analizi ve otomotiv parçaları üretiminde bir uygulama. *İşletme Bilimi Dergisi*, 5(2), 217-245. <https://doi.org/10.22139/jobs.321887>
- Stamatis D. H. (1995) *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin.
- Stamatis, D.H. (2014) *The ASQ pocket guide to failure mode and effect analysis (FMEA)*, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin.
- Şençoban Kaya, S., ve Alaykiran, K. (2019). Hata türü ve etkileri analizi ve döküm sektöründe bir uygulama. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 76-89.
- Türedi, A. T., ve Bircan, D. A. (2016). Endüstriyel robotik otomasyon sistemlerinde görülen hataların ve sistem güvenilirliğinin hata türleri ve etkileri yöntemi ile analizi. *Mühendis ve Makina*, 57(672), 56-61.
- Yen, B. P. C., ve Zeng, B. (2010). A hierarchical assessment method using Bayesian network for material risk detection on green supply chain. In *2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 1184-1188), IEEE.

Zuniawan, A. (2020). A Systematic Literature Review of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation in Industries. 1(2), 59-68.
<https://doi.org/10.22441/IJIEEM.V1I2.9862>

SOLUK BORUSUNUN 3D ORGAN BASIMI YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ

Mehmet ÖZER¹

1. GİRİŞ

3B baskı teknikleri kullanımında son yıllarda tıp alanında artış görülmektedir. Bu kullanım artışının başlıca sebebi 3B baskı teknolojisi bilgisayar ortamında hazırlanmış bir tasarımı kolay ve hızlı bir şekilde uygun bir 3B baskı makinasının kullanılmasıyla fiziksel bir modele dönüştürebilmemizdir. Ayrıca yine bu yöntemde oldukça karmaşık organ, kemik, vb. yapılarında 3B baskıları kolayca yapılabilmektedir. 3B baskı yönteminin getirdiği bu esneklik ve hız neticesinde daha sağlıklı ve uzun ömürlü tedavilere yönelik çalışmalar yapılmış ve oldukça başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.

3B baskı teknolojisi 1980' lerde icat edilmiştir. 3B baskı sisteminin kurucu ortağı Charles "Chuck" Hull, 1983 yılında dünyanın ilk 3B yazıcısını (stereolitografi) icat etmiştir. 1980' lerin ortalarında ve sonlarında, 3B baskı teknolojisinin yaygınlaşması artmıştır. 1987 yılında, Dr. Carl Deckard seçici lazer sinterleme (SLS) sürecini geliştirmiştir. Scott Crump, 1989 yılında füzyon biriktirme modellemesini (FDM) icat etmiş ve Stratasys Inc.' i kurmuştur. Bugün bu iki şirket, 3B Systems ve Stratasys, 3B baskı endüstrisinin liderleri konumundadır (Cheng et al., 2016).

3B yazdırma işlemi, çeşitli geometrik şekiller oluşturmak için genellikle sıralı katmanların üst üste eklendiği bir üretim

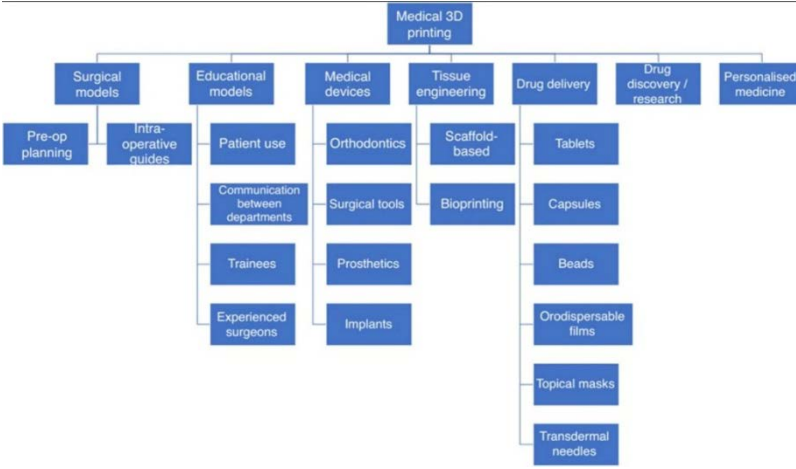
¹ Öğr. Gör. Dr., Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir MYO, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojileri Programı, ozer@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6212-1217.

sürecidir. Bu, eklemeli üretim (AM) olarak bilinen yaygın bir baskı işlemidir ve aynı zamanda katı serbest biçimli imalat (SFF) olarak da bilinen hızlı prototipleme biçimidir. 3B yazıcılar, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı veya bilgisayarlı tomografi (CT) tarayıcısı tarafından verilen dijital model verilerini okuyan bir bilgisayar tarafından kontrol edilir (Yeong, Chua, Leong, Chandrasekaran, & Lee, 2006), AM için ana teknikler arasında sıvı bazlı, katı bazlı ve toz bazlı AM yer alır ve bunlar, polimerler ve seramikler gibi malzemelerden 3B nesneler oluşturan bir dizi farklı cihaz ve yöntemi içerir (Rayate & Jain, 2018).

3B yazıcılardan yapay organların üretilmesi, özelleştirilmiş protezlerin üretilmesi ayrıca hastaya özel anatomik modeller, implantlar ve özelleştirilmiş ilaç dağıtım sistemlerinin oluşturulması bekleniyor. Cerrahi alanında ise, eğitim için anatomik modellerin oluşturulması ve hastaya özgü uygulanacak tedavilerde karmaşık prosedürlerin simülasyonunu, uygulamasını hızlandırması açısından ideal yöntemdir.

2. 3B BASKININ TIPTA KULLANIM ALANLARI

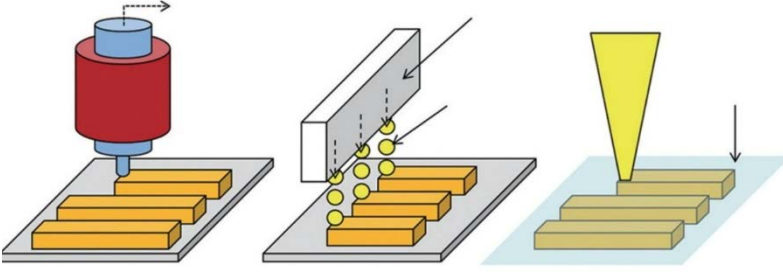
3B baskının tıbbi kullanımı, cerrahi modeller, tıbbi eğitim modelleri, medikal aletler, doku mühendisliği, ilaç salınımı, ilaç araştırma / geliştirme ve kişisel tıp uygulamalarıdır. 3B baskının bu alanlarda kullanımının sınıflandırılması Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Tıbbi alanda yaygın olarak kullanılan 3B baskı teknikleri (Anwar, 2018).

2.1. 3B Yazıcılarda Kullanılan Yöntemler

3B baskıda kullanılan yöntemlerden en yaygın olarak uygulanan AM yöntemi FDM yöntemidir. Bu yöntem, bir polimerin ısıtılması (ilaç yükleme yapılmış / yapılmamış olabilir), tabakalı bir şekilde bir nozülünden ekstrüde edilmesi ve ardından erimiş polimerin 3B şeklini alıp kürlenmesi aşamalarından oluşur. Dağıtma, 3 boyutlu doku / organ baskısına uygulanan en yaygın tekniktir. Dağıtım, erimiş veya çözünmüş biyomateryallerin mikro ölçüde meme aracılığıyla doğrudan ekstrüzyonunu içerir. Şekil 2’ de 3B basım, dağıtım, mürekkep püskürtme ve stereolitografi tekniği işlemi gösterilmiştir (Park, Jang, Lee, & Cho, 2016).



Şekil 2. 3B doku / organ analogları oluşturmak için 3B baskı teknikleri. (A) dağıtım, (B) mürekkep püskürtme ve (C) stereolitografi tekniği (Park et al., 2016).

Dağıtım tekniklerinde yaygın olarak kullanılan biyomateryaller, dağıtılacak uygun viskoziteye, yüksek uygunluğa ve şekillendirilebilirliğe sahip olmalıdırlar (Billiet, Gevaert, De Schryver, Cornelissen, & Dubruel, 2014; Pati et al., 2014; Smith, Christian, Warren, & Williams, 2007).

Biyomateryaller, dağıtılacak ısıtmayla eritilirlerse ayrıca termo-plastisite ve termostabiliteye sahip olmalıdırlar (Hoque, Chuan, & Pashby, 2012; Shim et al., 2010). Seçici lazer sinterleme (SLS), aynı zamanda FDM sürecinden önemli ölçüde farklı bir temel mekanizmaya sahip olan bir AM sürecidir. SLS, başarılı bir baskı işleminde hem lazer bazlı füzyon hem de kullanılan malzemelerin akış özelliklerinin çok önemli bir role sahip olduğu bir şekil oluşturmak için polimer veya diğer substratların parçacıklarını katman katman birleştirmek için bir lazer kullanan yöntemdir (Al-Dulimi, Wallis, Tan, Maniruzzaman, & Nokhodchi, 2021).

Tablo 1, bu yöntemlerin kullanımlarını, avantajlarını ve dezavantajlarını detaylandırmakta ve ayrıca listelenen 3B baskı tekniklerinin her biri için yaygın olarak kullanılan bazı malzemeleri içermektedir. Uygun malzeme türleri, baskı işleminin doğasına bağlıdır.

Azad vd. farklı ekstrüzyon 3B baskı süreçleri için doğru polimerlerin nasıl seçileceğini tartışmıştır (Azad et al., 2020). Pereira vd. ayrıca, en yaygın olarak kullanılan eczacılığa ait dereceli polimerlerin bazılarının, 3B basılabilen filamentler üretmek için nasıl kullanılmaya uygun olabileceğini tartışmıştır (Pereira, Figueiredo, Fernandes, & Pinto, 2020).

Tablo 1. Yaygın kullanılan 3B baskı metotları (Al-Dulimi et al., 2021).

İsim	Kaynaşmış Biriktirme Modelleme (FDM)	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Seçici Lazer Erime (SLM)	Stereolitografi Cihaz (SLA)
Teknik	Malzeme ekstrüzyonu	Toz yatağı füzyonu	Toz yatağı füzyonu	VAT polimerizasyonu
Metot	Erimiş termoplastik, üst üste katmanlar halinde biriktirilir. Her katman birbirine kaynaşarak bir nesne oluşturur	Toz malzemelerin katmanlarını sinterlemek ve kaynaştırmak için kullanılan lazer, genellikle gevşek bir şekilde bağlanmış parçacıklarla gözenekli yapıda nesne oluşturur	Metal tozu eritmek ve kaynaştırmak için kullanılan yüksek güçlü lazer	Sıvı reçinenin fotopolimerizasyonu ile katılaştırılması
Kullanım	-Nanokapsüller için bir dağıtım sistemi -Tablet oluşumu -Dokusu mühendisliği kemik için iskele -Vajinal halkaların üretimi - Rahim içi cihazlar ve deri altı çubuklar -Orodispers olabilir film - Mikro iğneler -Çok bölmeli kapsüller küçük partiler	İlaç yüklü ürünler (ör. Tabletler, çok birimli dozaj formları) anında ve değiştirilmiş sürüm profilleri ile farklı ilaç yükleme yetenekleri	İntervertebral implantlar	Baskılar Maskeler Mikro iğneler Polipiller COVID-19 test kiti

	-Masa			
Çoğunlukla kullanılan malzeme	Termoplastik polimerler	Metal tozu termoplastik polimer, mum, seramik, alaşımlar	Metal tozu termoplastik polimer, mum, seramik, alaşımlar	Sıvı fotopolimerler, Polimer seramikler, reçineler, hidrojenler vb.
Olumlu Yanları	-İçi boş nesnelerin ve çeşitli polimerlerin üretimine izin verir -Birçok geometrik şekil ve rengin oluşturulmasına izin verir -Bu yöntem için geliştirilmiş, kullanımı kolay Farnasötik dereceli polimerler -Düşük maliyetli, minimum boyut, yaygın olarak bulunabilen; sağlık sistemine kolayca dahil edilebilir -PLA gibi FDA onaylı termoplastiklerle uyumlu, polikaprolakton ve poliglikolik asit Yüksek derecede ayarlanabilir, uygun fiyatlı, min. boyutlu -Uygun maliyetli, çok yönlü esnek, karmaşık üretimlere izin verir sırayla bırakma	-Çözücüsüz işlem -Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında hızlı -Tek adımlı süreç -Daha yüksek çözünürlüklü nesneler üretir	Biyoyumlu alaşım tozlarını birleştirir	Malzemelerin FDM' den daha hızlı parçalanması Daha yüksek ilaç yüklem kapasitesi Daha yüksek çözünürlük Işığa duyarlı ilaçlar dışında hiçbir ilaç degradasyonu yoktur Lokalize ısınmanın en aza indirilmesi nedeniyle termal olarak daha kararsız ilaçlarla kullanılabilir

	özelliklerini değiştiren şekiller, yüksek Yeniden üretilebilirlik			
Olumsuz Yanları	Çözünürlük, SLS ve SLA gibi diğer yöntemlerden daha düşüktür. Enjeksiyon kalıplamadan daha uzun işlem süresi	Bazen lazer tabanlı füzyon ile baskı yatağında üretilen yüksek ısı özellikle ilaç termolabil ise ilaç bozulmasına neden olabilir. Bu teknoloji için yalnızca iyi akış özelliklerine sahip toz uygundur ve bu, çoğu farmasötik yardımcı maddeyi dışarıda bırakabilir	Yüksek güçlü lazer tarafından oluşturulan yüksek sıcaklık nedeniyle ilaç bozulması	Genellikle güvenli olarak tanınmaz, Birkaç tane olmasına rağmen Tıbbi sınıf polimerler mevcuttur Sadece katı sıvı reçineler Malzeme özellikleri, örneğin Foto iyileştirilebilirlik, uygundur.

2.2. Tıbbi Alanda Kullanılan 3B Baskı malzemeleri

Tıbbi olarak kullanılan 3B baskı malzemeleri şunları içerir: (a) titanyum alaşımı, zirkonyum, kobalt-krom alaşımı, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımı ve benzeri gibi tıbbi metal malzemeler. Metal malzemeler iyi mekanik mukavemete, elektrik iletkenliğine ve süneklığe sahiptir, bu da onları sert dokunun onarımında avantajlı kılar. Örneğin, Fan ve ark. tarafından yapılan titanyum alaşımlı kemik implantları, kemik tümörleri için uzuv kurtarma ameliyatı (Fan, 2015) ve skapular-klaviküler kırık için cerrahi (Ranabhat, 2018) için 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır. (b) Biyoseramikler, kalsiyum fosfat seramikler, alüminyum oksit seramikler ve benzerleri dahil olmak üzere kullanılan seramik malzemelerdir. Bunların arasında biyoseramikler, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek sıcaklık direnci ve korozyon direnci avantajlarına sahiptir. Örneğin, Konno ve ark. Ameliyattan sonra doğrudan vücuda implante edilebilen kişiselleştirilmiş protezler yapmak için malzeme olarak trikalsiyum karbonat tozu kullanmıştır (Konno, 2016). (c) Doğal polimer malzemeler ve sentetik polimer

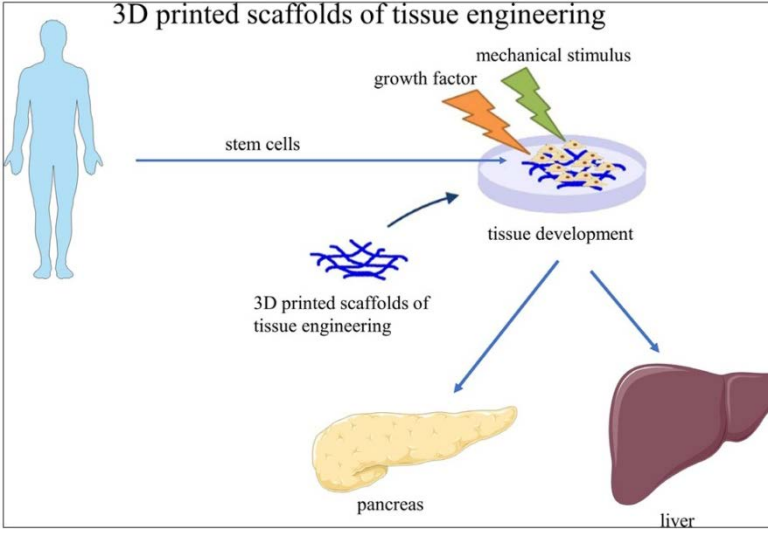
malzemeler dahil olmak üzere tıbbi polimer malzemeler son yıllarda en hızlı gelişen tıbbi malzemelerdir. Lan vd. tarafından yapılan gözenekli iskeleler, propilen fumarat ve diğer malzemeler insan süngerimsi kemiği ile aynı mekanik özelliklere sahiptir ve fibroblastların yapışmasını ve farklılaşmasını teşvik edebilir (Lan, 2009). (d) Kang vd. biyonomik materyali olarak da adlandırılan canlı doku organlarını basmak için ilk olarak canlı hücreleri “mürekkep” olarak kullanılmış ve deney hayvanlarında test edilmiştir (Kang, 2016). Schaffner vd. organik maddeyi ayrıştırabilen, biyoyumluğa sahip ve yüksek gerilme mukavemetine sahip bakteri selülozu sentezleyebilen canlı bakterileri içeren bir "fonksiyonel canlı mürekkep" (F-link) geliştirmiştir. Bu tedavi yöntemi yanık hastaları için deri greftlemede geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur (Schaffner, Rühs, Coulter, Kilcher, & Studart, 2017). Tablo 2’ de 3B baskının ile tıbbi kullanımları verilmiştir.

Tablo 2. 3B basılmış malzemelerin tıbbi kullanımları (Schaffner et al., 2017).

Tıbbi kullanımlar	Örnekler
Tıbbi cihazlar	Protez, işitme cihazı, gözlük, Cerrahi kılavuz, diş implantasyonu Rehber, HIV-1 teşhis telefonu
Organ modelleri	Arteriyel anevrizma modeli, intrakraniyal / omurga modeli
Kişisel implantlar	Kalp kapakçıkları, bağırsak yamaları, omurga aşılama
Doku mühendislik iskeleleri	Doku mühendisliği yumurtalık / sinir / pankreas
Organ basımı	Deri, böbrek, karaciğer, kemik
Eczacılık bilimi	Talep üzerine üretim, ilaç denemeleri (çipte organ), eylemi iyileştirme İlaçların hareket tarzı

3. 3B BASKIDA ÜRETİLEN BİYOAKTİF İSKELELER

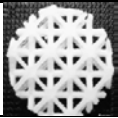
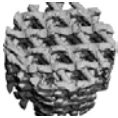
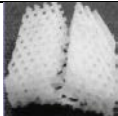
2012 yılında, 3B biyo-baskının ilk klinik denemesi Hollanda' da ki bir hastanede gerçekleştirilmiştir. 3B yazıcı kullanılarak yazdırılan biyonik çene bir hastaya nakledilmiştir. O zamandan beri Japonya, Polonya ve diğer bazı ülkelerde daha fazla denemeler yapılmıştır. Aşılanan materyaller, hastaların işitme ve sesini etkilemeden özellikle ses organlarıyla etkileşime girebilmiştir (Li, Fan, & Zhu, 2020). Canlı dokuları doğrudan basmak için, hücre kültürü için birçok basılı yapı iskelesi kullanılmıştır. Hücrelerin, iki boyutlu ortamlara kıyasla iskelelerde kültürlendiklerinde daha yüksek canlılık ve işleve sahip oldukları görülmüştür (Kawaguchi, Hatta, & Nakanishi, 2013; Matsumoto K, 2014). 3B baskıdan elde edilen polikaprolakton (PCL) iskeletleri, Tablo 3' te gösterildiği gibi farklı hücre türlerinin kültürlenmesinde kullanılmıştır. Ancak bu sadece iskelelerin hücrelerle iki boyutlu düzeyde kombinasyonudur ve bu nedenden dolayı 3B biyobaskı olarak adlandırılmıştır. Aslında, dolaylı 3B baskıda hücreler ve malzemeler arasındaki etkileşim hala iki boyutludur çünkü hücre çevresinin yalnızca bir tarafı iskeledir. Şekil 3' te kök hücreler ve uygun baskı yönteminin kullanılmasıyla üretilen organların görseli verilmiştir.

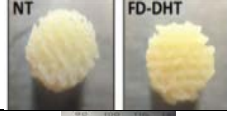
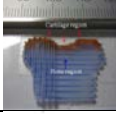
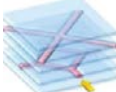
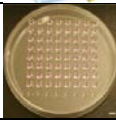
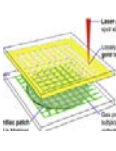
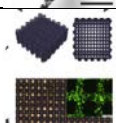
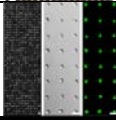


Şekil 3. Doku mühendisliğinin 3 boyutlu yazdırılmış iskeleleri.

Yeni doku onarım teknolojisi, az sayıda hastanın otolog kök hücrelerini seçiyor ve ardından kusurlu bölgeyle oldukça uyumlu iskeleler hazırlamak için 3B baskı teknolojisini kullanıyor. Kök hücreler, doku ve organları onarmak veya oluşturmak için iskeleler boyunca "onarır" veya "büyür" (Schaffner et al., 2017).

Tablo 3. 3B baskı örnekleri (Page H, 2013).

Türler	Malzemeler	Hücreler	Morfoloji
Dolaylı	PCL	Miyoblast hücre hattı C2C12	
Dolaylı	Kalsiyum fosfat modifiye PCL (PCL-CaP) fibrinojen ile tedavi	Mezenkimal kök hücreler (MSC' ler)	
Dolaylı	PCL	MSCs	

Dolaylı	Soya proteinli gliserol	MSCs	
Dolaylı	PCL ve aljinat	Osteoblast hücreleri ve kondrosit	
Dolaylı	Kolajen ve jelatin	Hücre yok	
Doğrudan	Hücre kültürü ortamı	Fare embriyonik kök hücreleri (mESC' ler)	
Doğrudan	Matrigel içine daldırılmış PEUU üzerine basılmış hücreler	İnsan umbilikal ven endotel hücreleri (hUVEC' ler), MSC 'ler	
Doğrudan	HA ve gelMA	Kondrosit	
Doğrudan	gelMA	Canlı kanser hücresi, HepG2	
Doğrudan	Tek hücre deseni	Birkaç meme kanseri hücresi	

4. ORGANLARIN 3B BASKI YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ

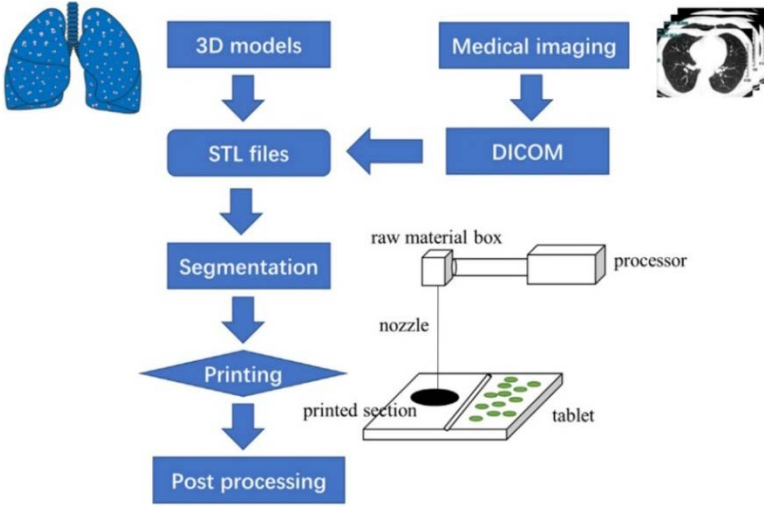
Başta organ yetmezliği tedavisinde kullanılmak üzere, 3B biyoyazıcılar, temel malzeme olarak hücreleri ve biyolojik malzemeleri alır daha sonra 3B basım teknolojisini kullanarak in vitro olarak kişiselleştirilmiş 3B biyolojik fonksiyonel hale getirerek yapılar üretmek için biyonik morfoloji ve özel hücrenin ihtiyacına göre mikro ortamda üretimi gerçekleştirir.

Daha farklı tedaviler içinde 3B basım işlemiyle, organ rekonstrüksiyonu, burun tipinin yeniden inşası (Gu et al., 2015), kulak kepçesi rejenerasyonu (Lee et al., 2014; Yi et al., 2019), maksillofasiyal kırıkdağın yeniden inşası (Visscher et al., 2016), kemiğin doldurma (Morrison et al., 2018; Roskies et al., 2017; Wang et al., 2016), kan damarlarının yeniden yapılandırılması (Wenz, Borchers, Tovar, & Kluger, 2017), daha sonra hastaya mükemmel bir şekilde uyan kalın, vasküler pediküllü kalp yaması ve kalp oluşturmak için 3B baskı ile özel hidrojel kullanılmıştır (Zhao et al., 2016). Bazı biyoteknoloji şirketleri, karaciğer büyümesi için gereken doku hücrelerini bir petri kabına koymuş bir süre sonra normal bir karaciğere dönüşebilmesi için hücre 3B baskı teknolojisini kullanmışlardır (L. Cheng et al., 2019; Noor et al., 2019). 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilmiş yaşayan organla, yarı organın karşılaştırılması Tablo 4’ te verilmiştir.

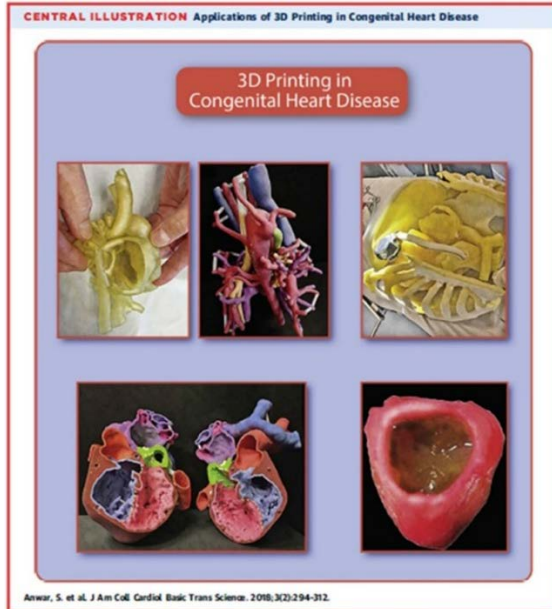
Tablo 4. 3B baskılı yarı organlar ile 3B baskılı canlı organların karşılaştırılması (Page H, 2013).

	Yarı organalar	Yaşayan organlar
Malzemeler	Silika jel, metal	Bioink
Fonksiyon	Kayıp fizyolojik işlevlerin bir kısmını gerçekleştirin	Ölü organı değiştirin
Örnekler	Biyonik göz Yapay kornea Silikon kalp	Karaciğer Böbrek Pankreas

Son yıllarda geliştirilen teknolojilerle birlikte 3B baskının hızı büyük bir gelişme kaydetmiştir. Örneğin, Prellis Biologics şirketi tarafından kullanılan holografik baskı teknolojisi, 5 ms' de katmanlar oluşturabilir, bu da organ baskısı için oldukça faydalı bir gelişme olmuştur. Şekil 4’ te tasarım aşamasında basım aşamasına kadar olan süreçte bir organın üretim iş akışı verilmiştir. Şekil 5’ de Anwar ve arkadaşları tarafından üretilmiş çalışmalarda kullandıkları cerrahi organ modellerin bir görseli verilmiştir.



Şekil 4. Oluşturulacak 3B modelin DICOM bilgileri STL dosyasına yazdırma prosedürü için dönüştürülür, daha sonra STL dosyası "dilimlenir" ve tek bir varlık halinde üst üste bindirilmek üzere 3B yazıcı ile katman katman basılır (Schaffner et al., 2017).



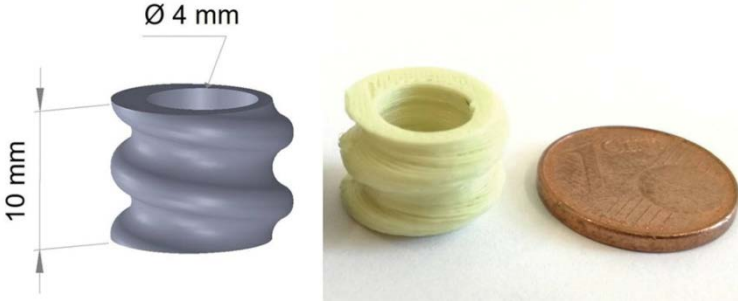
Şekil 5. 3B basılmış organ modelleri (Zein et al., 2013).

5. 3B BASILMIŞ TRAKEAL İMPLANT VE STENTLER

Biyomalzemelerin kullanımı, bir organın yeniden inşası ya da kaybedilen bir bölümünün yeniden üretilerek onarımı için birçok durumda vazgeçilmez tedavi yöntemi olarak tanımlanmıştır. Rezeksiyon uzunluğu 5 cm' den az olan örneğin kanser, travma, stenoz, doğumsal problemlerden kaynaklanan defektler ya da trakeal kusur vb. çevresel rezeksiyon sonrası rekonstrüksiyon amaçlı baskı yöntemi kullanılmıştır. Trakeal doku mühendisliği, trakeal stenoz veya tıkanıklığın neden olduğu yüksek mortalite oranları nedeniyle özellikle önemlidir (Anwar, 2018). Komplikasyonların ortaya çıktığı yaklaşık % 20' lik hasta grubunda daha büyük trakeal defektlerin rekonstrüksiyonu için yapay yamalar kullanılmıştır. Trakea, larinksi akciğerlere bağlayarak hava kanalına izin veren içi boş bir organdır. Normal insan erkek trakeasının iç çapı yaklaşık 25 mm ve uzunluğu yaklaşık 16 cm' dir (Ott et al., 2016). Trakeal kusurlar genellikle doğuştan anomalilerden kaynaklanır, tümör ablasyonu ve travmatik yaralanmalar. Bu trakeal kusurların tedavisi, tamamen kusur boyutuna ve boyutuna bağlıdır. Trakeal rekonstrüktif cerrahide; silikon (PDMS: polidimetilsiloksan olarak da adlandırılır), PTFE (politetrafloroetilen), PU (poliüretan) veya PCL gibi sentetik protez biyomalzemeleri kullanılmıştır (Rich & Gullane, 2012; Rostam et al., 2016).

Keitaro Matsumoto ve ark. trakeal rezeksiyon için hastaya özel 3 boyutlu modelleri kullanmıştır. Karmaşık trakeal rezeksiyon ve rekonstrüksiyon için preoperatif simülasyonların kullanılabilirliğini hastaya özel baskılı modeller üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Onların 3B baskılı modelleri kullanan mimik operasyonları, uygun değer cerrahi stratejinin seçiminde doğru hazırlık ve güven sağlamıştır (Chan, Gabra, Baig, Manoukian, & Daniel, 2020). Jane C Carter ve ark. Anestezi hava yolu yönetimi eğitimi için, özellikle bebek boyun önünden erişim

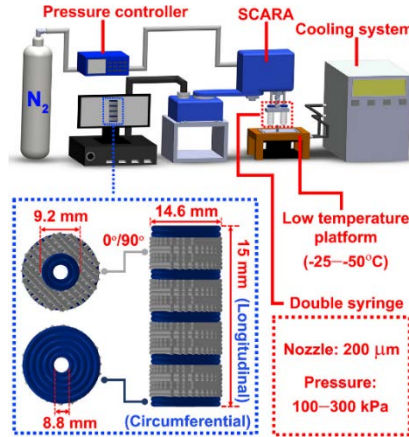
ve özelleştirilmiş hava yolu planlaması için, piyasada bulunan pediatrik hava yolu modellerinde bir eksiklik tespit etmişlerdir. Bu tespit neticesinde, gerçekçi dokunsal geribildirim, tekrarlanabilirlik ve belirli hasta patolojileri için modifikasyon potansiyeli içeren uygun fiyatlı, yüksek kaliteli bir eğitim cihazı için üç boyutlu basılı bir prototip oluşturmuşlardır. Stratasys Polyjet üzerinde oluşturulan modelleri, pediatrik hava yolu yönetiminde yeni ve yararlı bir eğitim aracı olmuştur (Matsumoto, 2020). Tim Feuerbach ve ark. tıbbi sınıf bir poli (laktik-ko-glikolik asit) ve bir ilaçtan oluşan biyolojik olarak parçalanabilen ilaç salınımlı trakeal stentler, erimiş birikim modellemesi ile basılmıştır. Hastaya özel implantlar için gerekli olan stent boyutlarını korurken özellikle düşük bir stent gözenekliliği ve yüksek mekanik mukavemet elde etmek amacıyla bir dilimleme parametresi optimizasyon yöntemi önermiştir. PLGA' lar, implante edilebilir ilaç dağıtım sistemleri için köklü kopolimerlerdir ve ABD Gıda ve İlaç Dairesi tarafından onaylanmıştır. Tüm nesnelerin dijital 3B modelleri ve STL dosyaları SolidWorks CAD yazılım ile oluşturulmuş ve Python' da yazılmış özel dilimleme yazılımıyla işlenmiştir. Her katman için, katman kontürü tek bir malzeme şeridi ile basılmış ve ardından katman içi için özel bir baskı deseni uygulanmıştır. Oluşan stent geometrileri tıbbi sınıf ResomerVR RG 858 S ve model ilaç triamteren, optimize edilmiş bir dilimleme parametre seti ile FDM tarafından başarıyla basılmıştır. PLGA malzeme kullanılarak 3B üretilmiş stent Şekil 6' da gösterilmiştir (Shai et al., 2020).



Şekil 6. 800 mm² yüzey alanına sahip dijital 3B model stent ve ağırlıkça % 5 triamteren ile yüklenmiş ResomerVR RG 858 S' den oluşan basılı stent (Shai et al., 2020).

İn Gul Kim ve ark. trakeal mukoza ve kıkırdak rejenerasyonunu, iki katmanlı bir tübüler yapı iskelesi ve insan kaynaklı pluripotent kök hücre (iPSC) kaynaklı hücrelerin en uygun kombinasyonu yoluyla geliştirebilen, doğal trakeaya benzer mekanik özelliklere sahip yapay bir trake tasarlamışlardır. Yapay trakeanın çerçevesi, elektrospun PCL nanofiberler ve 3B baskılı PCL mikrofiber ile üretilmiştir. Ayrıca, insan bronşiyal epitel hücreleri (hBEC' ler), iPSC' den türetilmiş mezenkimal kök hücreler (iPSC-MSC' ler) ve iPSC' den türetilmiş kondrositler (iPSC-Chds), in vivo olarak trakeal mukoza ve kıkırdak rejenerasyonunu en üst düzeye çıkarmak için kullanılmıştır (Feuerbach, Kock, & Thommes, 2020). Botao Gao ve ark. segmental trakeayı yeniden kurma için, tavşanların doğal trakeasına benzer morfolojiye sahip bir 3B baskılı poli (l-laktik asit) PLLA iskelesine dayanan doku mühendisliği yapılmış trakea kullanmıştır. 3B baskılı yapı iskeletleri, otolog aurikuladan elde edilen kondrositlerle tohumlanmış, 2 hafta süreyle dinamik olarak in vitro olarak ön kültürlenmiş ve bütünleşmiş bir segmental trakea organoid ünitesi oluşturmak için 2 hafta daha in vivo olarak önceden vaskülerize edilmiştir. Daha sonra, tasarlanmış trakeal ikame pediküllü kas flepleri ile nakledilerek tavşanlarda segmental trakeal kusurlar restore edilmiştir (Kim, 2020).

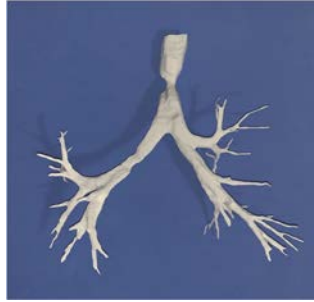
Cheng-Tien Hsieh ve ark. 3B baskıda mürekkep olarak farklı fiziko-kimyasal özelliklere sahip iki tür suda biyolojik olarak parçalanabilir poliüretan (PU) kullanılmıştır. 3B basılmış trakeal yapı iskeletlerinin karmaşık yapısı, düşük sıcaklıkta su bazlı 3B baskı mürekkebinden doğal tavşan trakeasının yapısını taklit etmek için üretilmiştir. Biyoaktif faktörler veya küçük moleküler ilaç (Y27632), MSC' lerin kondrojenezini desteklemek için uygun bir şekilde mürekkebe dahil edilmiştir. 3B basılmış iskeleleri, kendi geliştirdikleri bir LFDM sistemi tarafından üretilmiştir. Sistem, seçici bir uyumluluk montaj robot kolu (SCARA), z eksenli hareket platformu, bir ısıtıcıya bağlı birden fazla nozul, bir soğutma sistemi ve bunun yanı sıra bilgisayar destekli tasarım (CAM) / bilgisayar destekli üretim (CAD) teknolojilerinden oluşturulmuştur. Nozul boyutu (200 μm), hava basıncı (100–300 kPa) ve platform sıcaklığı (-25 ila -50 $^{\circ}\text{C}$), başarılı bir baskı için ayarlanması gereken parametre değerleri seçilmiştir. Karmaşık yapıya ve mükemmel esnekliğe sahip 3B basılmış trakeal iskeleler, çift şırıngalı donmuş sıvı çökeltme üretimi (LFDM) platformu tarafından iki PU bazlı mürekkepten başarıyla üretilmiştir. LFDM sistemi ile üretilmiş numuneler şekil 8' de verilmiştir (B. Gao et al., 2019).



Şekil7. LFDM, düşük sıcaklıkta üç boyutlu trakeal iskele imalatı için baskı platformu (B. Gao et al., 2019).

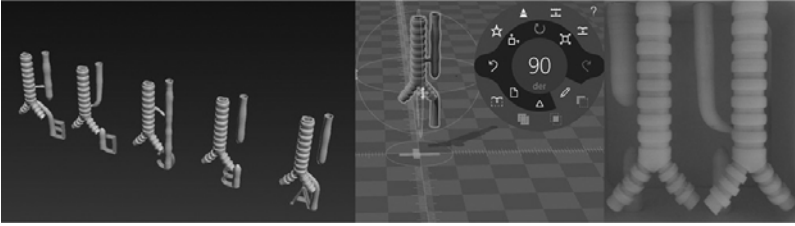
Soo Yeon Jung ve ark. fizyolojik trakeal duruma dayanmak için konakçı doku infiltrasyonuna ve yeterli biyomekanik özelliklere izin vermek için mikro ölçekli mimariye sahip yeni bir 3B baskılı PU trakeal iskele geliştirmiştir. Yarım boru şeklinde bir PU iskelesi (1,8 cm yükseklik, 0,18 cm kalınlık ve 2 cm çap) 3B baskı ile üretilmiş 200µm PU kiriş oluşturmuştur. 3B baskılı trakeal iskeleler, $200 \times 200 \times 200 \mu\text{m}^3$ boyutlu gözenekli bir iç mikro yapı ve gözeneksiz bir dış katmandan oluşmuştur (H. S., P. H. J., L. J., K. P., L. J. S., L. Y. J., & P. C. H. Park, 2018). Antti a. Mäkitie ve ark. makroskopik ve mikroskopik geometri kontrolü için yeni uyarlanmış biyopolimerler (foto sertleştirme teknolojisi) veya geleneksel biyoemilebilir polimerler, FDM kullanan kontrollü üretim yöntemlerine yönelik konseptin kanıtını göstermiştir. Üretilen iskeleler doku mühendisliği araştırmaları için uygun olmuştur. Orta yaşlı bir erkeğin doku mühendisliği trakea iskele prototipi 3B modelini tasarlamış ve eklemeli imalat ile üretmişlerdir (Jung et al., 2016). Sadiq S. Rehmani ve ark. potansiyel insan kullanımı için çeviri uygunluğuna sahip bir büyük hayvan modelinde anterior trakeal kusurların rekonstrüksiyonu için biyomühendislik trakeal greftler (BETG'ler) oluşturmak için üç boyutlu baskıyı kullanan bir süreç geliştirmeyi amaçlamıştır. Hayvanın hava yollarının sanal 3B modellerini oluşturmak için ameliyat öncesi bilgisayarlı tomografik taramaları kullanılmışlardır. Anatomik olarak ölçeklenmiş trakeal greftler daha sonra 3B baskılı PCL ve hücre dışı matris kullanılarak geliştirilmiştir (Mäkitie et al., 2013). Manchen Gao ve ark. gerçeğine benzer morfolojiye sahip tavşanın doğal nefes borusu bölümünü biyolojik olarak parçalanabilir bir retiküler PCL iskelesini 3B olarak yazdırmıştır. Bu in vitro süspansiyon, bir doku mühendisliği trakeasının (TET) daha başarılı bir şekilde yeniden yapılandırılmasını sağlamış ve değiştirilen trakeal segmentin genel destek işlevini geliştirmiştir (Rehmani et al., 2017). Jae-Hyun park ve ark. 3B biyo-baskıyı kullanarak bir doku mühendisliği yöntemiyle etkili bir yapay

trakea oluşturmaya çalışmıştır. Çok katmanlı bir iskele, bir 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. PCL ve hidrojel, baskı işleminde nazal epitel ve kulak kıkırdak hücreleri ile kullanılmıştır. Yapay trakea, deney hayvanlarına transplante edilmiştir (M., Z. H., D. W. , B. J. , G. B. , X. D. , . . . & Z. J. Gao, 2017). Dekai Xia ve ark. doğal keçi trakeasını temsil eden tüm segmentli TET, otolog kulak kıkırdak hücreleri ile tasarlanmış bir PCL iskelesi kullanılarak 3B olarak basılmıştır. TET klinik fizibilite ve potansiyeli değerlendirmek için mekanik analiz ve ardından in vivo implantasyonlar yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile gözlemlendiği gibi, 3B yazdırılmış iskeleler başarıyla hücreleştirilmiştir. Mekanik kuvvet sıkıştırma çalışmaları, hem PCL iskelelerinin hem de TET' lerin, doğal trakeaya göre daha sağlam bir basınç dayanımına sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır (J. H., Y. J. K., L. J. B., S. Y. M., L. K. W., B. S. W., . . . & K. D. H. Park, 2019). Joshua A. Stramiello ve ark. Üç boyutlu baskının bir karmaşık patolojinin yönetiminde çok yönlü bir ek olarak, pediatrik hava yolu tıkanıklığı için hem cerrahi planlamada hem de implant oluşturmada 3B baskının güçlü bir rolü olduğuna dair giderek artan sayıda kanıt incelemişler. Hastaya özgü hastalık olan trakeomalazi ve trakeal stenoz, teşhis ve tedavi için multidisipliner bir yaklaşım olarak trakeal stenozlu bir pediatrik hava yolunun 3B baskılı naylon modeli üretmişlerdir. Üretilen 3B baskılı naylon model şekil 8 'da verilmiştir (Xia et al., 2019).



Şekil8. Trakeal stenozlu bir pediatrik hava yolunun 3B baskılı naylon modeli (Xia et al., 2019).

Şenol Emre ve ark. anabilim dallarında tasarlayıp üretmiş oldukları eğitim modelleri ile uygulamalı öğrenci eğitiminin etkinliğinin ölçüldüğü randomize prospektif bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile hazırladıkları ve “Cerrahpaşa Modelleri” ismini verdikleri eğitim modelini ABS plastik malzeme ve FDM yöntemi kullanarak üç boyutlu yazıcıda eğitimde kullanmak amaçlı üretmişler. Eğitim için üretilen 3B modeller şekil 9’ da verilmiştir (Tam, Laycock, Jayne, Babar, & Noble, 2013).



Şekil 9. Özofagus atrezisi - trakeoözofageal fistül Cerrahpaşa modelinin ABS plastikten FDM baskı (Tam et al., 2013).

KAYNAKÇA

- Al-Dulimi, Z., Wallis, M., Tan, D. K., Maniruzzaman, M., & Nokhodchi, A. (2021). 3D printing technology as innovative solutions for biomedical applications. *Drug Discovery Today*, 26(2), 360–383. <https://doi.org/10.1016/J.DRUDIS.2020.11.013>
- Anwar, S. et al. (2018). 3B printing is a transformative technology in congenital heart disease. *JACC Basic Transl. Sci.* , 3, 294–312.
- Azad, M. A., Olawuni, D., Kimbell, G., Badruddoza, A. Z. M., Hossain, Md. S., & Sultana, T. (2020). Polymers for Extrusion-Based 3D Printing of Pharmaceuticals: A Holistic Materials–Process Perspective. *Pharmaceutics*, 12(2), 124. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12020124>
- Billiet, T., Gevaert, E., De Schryver, T., Cornelissen, M., & Dubruel, P. (2014). The 3D printing of gelatin methacrylamide cell-laden tissue-engineered constructs with high cell viability. *Biomaterials*, 35(1), 49–62. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2013.09.078>
- Chan, D. S., Gabra, N., Baig, A., Manoukian, J. J., & Daniel, S. J. (2020). Bridging the gap: Using 3D printed polycaprolactone implants to reconstruct circumferential tracheal defects in rabbits. *The Laryngoscope*, 130(12). <https://doi.org/10.1002/lary.28472>
- Cheng, G. Z., Estepar, R. S. J., Folch, E., Onieva, J., Gangadharan, S., & Majid, A. (2016). Three-dimensional Printing and 3D Slicer: Powerful Tools in Understanding and Treating Structural Lung Disease. *Chest*, 149(5), 1136–1142. <https://doi.org/10.1016/J.CHEST.2016.03.001>

- Cheng, L., Yao, B., Hu, T., Cui, X., Shu, X., Tang, S., ... Huang, S. (2019). Properties of an alginate-gelatin-based bioink and its potential impact on cell migration, proliferation, and differentiation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 1107–1113. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.06.017>
- Fan, H. , F. J. , L. X. , P. Y. , L. X. , P. G. , & G. Z. (2015). Implantation of customized 3-D printed titanium prosthesis in limb salvage surgery: A case series and review of the literature. . *World Journal of Surgical Oncology*, 13, 308.
- Feuerbach, T., Kock, S., & Thommes, M. (2020). Slicing parameter optimization for 3D printing of biodegradable drug-eluting tracheal stents. *Pharmaceutical Development and Technology*, 25(6), 650–658. <https://doi.org/10.1080/10837450.2020.1727921>
- Gao, B., Jing, H., Gao, M., Wang, S., Fu, W., Zhang, X., ... Zheng, J. (2019). Long-segmental tracheal reconstruction in rabbits with pedicled Tissue-engineered trachea based on a 3D-printed scaffold. *Acta Biomaterialia*, 97, 177–186. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2019.07.043>
- Gao, M. , Z. H. , D. W. , B. J. , G. B. , X. D. , ... & Z. J. (2017). *Tissue-engineered trachea from a 3B-printed scaffold enhances whole-segment tracheal repair*. .
- Gu, Q., Hao, J., Lu, Y., Wang, L., Wallace, G. G., & Zhou, Q. (2015). Three-dimensional bio-printing. *Science China Life Sciences*, 58(5), 411–419. <https://doi.org/10.1007/s11427-015-4850-3>
- Hoque, M. E., Chuan, Y. L., & Pashby, I. (2012). Extrusion based rapid prototyping technique: An advanced platform for

- tissue engineering scaffold fabrication. *Biopolymers*, 97(2), 83–93. <https://doi.org/10.1002/bip.21701>
- Jung, S. Y., Lee, S. J., Kim, H. Y., Park, H. S., Wang, Z., Kim, H. J., ... Kim, H. S. (2016). 3D printed polyurethane prosthesis for partial tracheal reconstruction: a pilot animal study. *Biofabrication*, 8(4), 045015. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/8/4/045015>
- Kang, H. W. , L. S. J. , K. I. K. , K. C. , Y. J. J. , & A. (2016). A 3B bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity. *Nature Biotechnology*, 34, 312–319.
- Kawaguchi, N., Hatta, K., & Nakanishi, T. (2013). 3D-Culture System for Heart Regeneration and Cardiac Medicine. *BioMed Research International*, 2013, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2013/895967>
- Kim, I. G. , P. S. A. , L. S. H. , C. J. S. , C. H. , L. S. J. , ... & K. S. K. (2020). *Transplantation of a 3B-printed tracheal graft combined with iPS cell-derived MSCs and chondrocytes.* .
- Konno, T. , M. T. , O. H. , K. N. , O. K. , & W. E. (2016). Rapid 3-dimensional models of cerebral aneurysm for emergency surgical clipping. . *No Shinkei Geka*, 44, 651–660.
- Lan, P. X. , L. J. W. , S. Y. J. , & C. D. W. (2009). Development of 3B PPF/DEF scaffolds using micro-stereolithography and surface modification. . *Journal of Materials Science. Materials in Medicine*, 20, 271–279.
- Lee, J.-S., Hong, J. M., Jung, J. W., Shim, J.-H., Oh, J.-H., & Cho, D.-W. (2014). 3D printing of composite tissue with complex shape applied to ear regeneration.

- Biofabrication*, 6(2), 024103.
<https://doi.org/10.1088/1758-5082/6/2/024103>
- Li, H., Fan, W., & Zhu, X. (2020). Three-dimensional printing: The potential technology widely used in medical fields. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 108(11), 2217–2229.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.36979>
- Mäkitie, A. A., Korpela, J., Elomaa, L., Reivonen, M., Kokkari, A., Malin, M., ... Seppälä, J. (2013). Novel additive manufactured scaffolds for tissue engineered trachea research. *Acta Oto-Laryngologica*, 133(4), 412–417.
<https://doi.org/10.3109/00016489.2012.761725>
- Matsumoto, K. , T. D. , T. T. , M. T. , H. G. , D. R. , . . . & N. T. (2020). Preoperative tracheal resection and reconstruction simulations with patient-specific three-dimensional models. *General Thoracic and Cardiovascular Surgery*, , 1–4.
- Matsumoto K, I. T. Y. H. Y. Y. A. Y. H. K. (2014). Clinical use of three-dimensional models of the temporomandibular joint established by rapid prototyping based on cone-beam computed tomography imaging data. *Oral Radiol*, 30, 98–104.
- Morrison, R. J., Nasser, H. B., Kashlan, K. N., Zopf, D. A., Milner, D. J., Flanagan, C. L., ... Hollister, S. J. (2018). Co-culture of adipose-derived stem cells and chondrocytes on three-dimensionally printed bioscaffolds for craniofacial cartilage engineering. *The Laryngoscope*, 128(7). <https://doi.org/10.1002/lary.27200>
- Noor, N., Shapira, A., Edri, R., Gal, I., Wertheim, L., & Dvir, T. (2019). 3D Printing of Personalized Thick and Perfusable

- Cardiac Patches and Hearts. *Advanced Science*, 6(11).
<https://doi.org/10.1002/advs.201900344>
- Ott, L. M., Zabel, T. A., Walker, N. K., Farris, A. L., Chakroff, J. T., Ohst, D. G., ... Detamore, M. S. (2016). Mechanical evaluation of gradient electrospun scaffolds with 3D printed ring reinforcements for tracheal defect repair. *Biomedical Materials*, 11(2), 025020.
<https://doi.org/10.1088/1748-6041/11/2/025020>
- Page H, F. P. R. EG. (2013). Three-dimensional tissue cultures: Current trends and beyond. *Cell Tissue Res*, 352, 123–131.
- Park, H. S. , P. H. J. , L. J. , K. P. , L. J. S. , L. Y. J. , . . . & P. C. H. (2018). A 4-Axis technique for three-dimensional printing of an artificial trachea. . *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, , 15(4), 415–425.
- Park, J. H. , Y. J. K. , L. J. B. , S. Y. M. , L. K. W. , B. S. W. , . . . & K. D. H. (2019). *Experimental tracheal replacement using 3-dimensional bioprinted artificial trachea with autologous epithelial cells and chondrocytes*.
- Park, J. H., Jang, J., Lee, J.-S., & Cho, D.-W. (2016). Current advances in three-dimensional tissue/organ printing. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 13(6), 612–621. <https://doi.org/10.1007/s13770-016-8111-8>
- Pati, F., Jang, J., Ha, D.-H., Won Kim, S., Rhie, J.-W., Shim, J.-H., ... Cho, D.-W. (2014). Printing three-dimensional tissue analogues with decellularized extracellular matrix bioink. *Nature Communications*, 5(1), 3935.
<https://doi.org/10.1038/ncomms4935>
- Pereira, G. G., Figueiredo, S., Fernandes, A. I., & Pinto, J. F. (2020). Polymer Selection for Hot-Melt Extrusion Coupled to Fused Deposition Modelling in

- Pharmaceutics. *Pharmaceutics*, 12(9), 795.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12090795>
- Ranabhat, A. , Y. C. , & G. Z. P. (2018). Bilateral clavicular fracture with unilateral scapular fracture. *Kathmandu University Medical Journal (KUMJ)*, 16, 94–96.
- Rayate, A., & Jain, P. K. (2018). A Review on 4D Printing Material Composites and Their Applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20474–20484.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.06.424>
- Rehmani, S. S., Al-Ayoubi, A. M., Ayub, A., Barsky, M., Lewis, E., Flores, R., ... Bhora, F. Y. (2017). Three-Dimensional-Printed Bioengineered Tracheal Grafts: Preclinical Results and Potential for Human Use. *The Annals of Thoracic Surgery*, 104(3), 998–1004.
<https://doi.org/10.1016/J.ATHORACSUR.2017.03.051>
- Rich, J. T., & Gullane, P. J. (2012). Current concepts in tracheal reconstruction. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*, 20(4), 246–253.
<https://doi.org/10.1097/MOO.0b013e328355580e>
- Roskies, M. G., Fang, D., Abdallah, M., Charbonneau, A. M., Cohen, N., Jordan, J. O., ... Tran, S. D. (2017). Three-dimensionally printed polyetherketoneketone scaffolds with mesenchymal stem cells for the reconstruction of critical-sized mandibular defects. *The Laryngoscope*, 127(11). <https://doi.org/10.1002/lary.26781>
- Rostam, H. M., Singh, S., Salazar, F., Magennis, P., Hook, A., Singh, T., ... Ghaemmaghami, A. M. (2016). The impact of surface chemistry modification on macrophage polarisation. *Immunobiology*, 221(11), 1237–1246.
<https://doi.org/10.1016/J.IMBIO.2016.06.010>

- Schaffner, M., Rühs, P. A., Coulter, F., Kilcher, S., & Studart, A. R. (2017). 3D printing of bacteria into functional complex materials. *Science Advances*, 3(12). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao6804>
- Shai, S.-E., Lai, Y.-L., Hung, Y.-W., Hsieh, C.-W., Huang, B. J., Su, K.-C., ... Hung, S.-C. (2020). De novo cartilage growth after implantation of a 3-D-printed tracheal graft in a porcine model. *American Journal of Translational Research*, 12(7), 3728–3740.
- Smith, C. M., Christian, J. J., Warren, W. L., & Williams, S. K. (2007). Characterizing Environmental Factors that Impact the Viability of Tissue-Engineered Constructs Fabricated by a Direct-Write Bioassembly Tool. *Tissue Engineering*, 13(2), 373–383. <https://doi.org/10.1089/ten.2006.0101>
- Tam, M. D., Laycock, S. D., Jayne, D., Babar, J., & Noble, B. (2013). 3-D printouts of the tracheobronchial tree generated from CT images as an aid to management in a case of tracheobronchial chondromalacia caused by relapsing polychondritis. *Journal of Radiology Case Reports*, 7(8), 34–43. <https://doi.org/10.3941/jrcr.v7i8.1390>
- Visscher, D. O., Bos, E. J., Peeters, M., Kuzmin, N. V., Groot, M. L., Helder, M. N., & van Zuijlen, P. P. M. (2016). Cartilage Tissue Engineering: Preventing Tissue Scaffold Contraction Using a 3D-Printed Polymeric Cage. *Tissue Engineering Part C: Methods*, 22(6), 573–584. <https://doi.org/10.1089/ten.tec.2016.0073>
- Wang, X.-F., Song, Y., Liu, Y.-S., Sun, Y., Wang, Y., Wang, Y., & Lyu, P.-J. (2016). Osteogenic Differentiation of Three-Dimensional Bioprinted Constructs Consisting of Human Adipose-Derived Stem Cells In Vitro and In Vivo. *PLOS*

- ONE, 11(6), e0157214.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157214>
- Wenz, A., Borchers, K., Tovar, G. E. M., & Kluger, P. J. (2017). Bone matrix production in hydroxyapatite-modified hydrogels suitable for bone bioprinting. *Biofabrication*, 9(4), 044103. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa91ec>
- Xia, D., Jin, D., Wang, Q., Gao, M., Zhang, J., Zhang, H., ... Fu, W. (2019). Tissue-engineered trachea from a 3D-printed scaffold enhances whole-segment tracheal repair in a goat model. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 13(4), 694–703. <https://doi.org/10.1002/term.2828>
- Yeong, W., Chua, C., Leong, K., Chandrasekaran, M., & Lee, M. (2006). Indirect fabrication of collagen scaffold based on inkjet printing technique. *Rapid Prototyping Journal*, 12(4), 229–237. <https://doi.org/10.1108/13552540610682741>
- Yi, H.-G., Choi, Y.-J., Jung, J. W., Jang, J., Song, T.-H., Chae, S., ... Cho, D.-W. (2019). Three-dimensional printing of a patient-specific engineered nasal cartilage for augmentative rhinoplasty. *Journal of Tissue Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1177/2041731418824797>
- Zein, N. N., Hanouneh, I. A., Bishop, P. D., Samaan, M., Eghtesad, B., Quintini, C., ... Klatte, R. (2013). Three-dimensional print of a liver for preoperative planning in living donor liver transplantation. *Liver Transplantation*, 19(12), 1304–1310. <https://doi.org/10.1002/lt.23729>
- Zhao, X., Liu, L., Wang, J., Xu, Y., Zhang, W., Khang, G., & Wang, X. (2016). *In vitro* vascularization of a combined system based on a 3D printing technique. *Journal of*

Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 10(10),
833–842. <https://doi.org/10.1002/term.1863>

4D PRINTING TECHNOLOGY AND SOME APPLICATION EXAMPLES

Mehmet ÖZER¹

1. INTRODUCTION

As technology rapidly advances, traditional printing methods are being replaced by new technologies, paving the way for global advancements in this field. While 2D printers were already widely used in the 1980s, 3D printing technology, which offers the advantages of rapid prototyping and additive manufacturing, was introduced globally, marking a major step forward in the field of printing technology. 3D printing, commercialized in 1987, has since found widespread use in many fields, particularly in biomedical and aerospace fields (Wohlers et al., 2016). One of the most significant advantages of 3D printing is its ability to manufacture objects that cannot be produced using traditional manufacturing techniques. Although 3D printing technologies continue to be widely used in R&D centers, universities, and individual hobbyists in today's world, Skylar Tibbits, a faculty member at MIT (Massachusetts Institute of Technology), introduced 4D printing technology to the world in 2013, using the term "four-dimensional (4D) printing" in her TED talk, which allows static 3D printed objects to change their shape over time (Tibbits, 2013).

A material defined as a "Smart Material" must be able to actively reshape itself through pre-programming, thus fulfilling its function, once the time dimension is activated. Therefore, this

¹ Öğr. Gör. Dr., Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir MYO, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojileri Programı, ozer@balikesir.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6212-1217.

phenomenon, defined as 4D printing, can be explained as a 3D-printed smart material with a stimulation and interaction mechanism that allows it to actively change shape over time.

4D printing is a printing method born from the addition of a time parameter to the shape and function properties of 3D printed objects. Therefore, these materials, which can be produced through 3D printing and have acquired dynamically different identities and capabilities, such as self-healing and assembly, are defined as smart materials. Within the framework of this principle, by combining different disciplines with the contribution of the time parameter, new products of critical importance for humanity can be produced. Shape memory material models are known to be widely used, especially in defence and space studies. NiTi shape memory alloys allow the formation of desired temporary shapes, especially in the martensitic-austenitic phase transformation temperature range. Therefore, they are specifically accepted and widely used in the defence and space industries (Wu et al., 2018; Tibbits, 2014; Zhou et al., 2015; Khoo et al., 2015; Roy et al., 2010; Dilibal, 2006).

2. 4D PRINTING TECHNOLOGY

4D printing technology was previously defined as "3D printing + time." However, its current definition is "the function of a 3D printed object can change over time when exposed to stimuli such as heat, water, pressure, light, sound, and pH." This definition is the most popular expression describing 4D printing technologies today (Kuang et al., 2019). This definition also refers to the process of producing industrial products with smarter materials in terms of shape, properties, and functionality from 3D printing materials. Therefore, 4D printing can predictably perform certain functions, such as self-assembly and repair

(Momeni et al., 2017). Ultimately, 4D printing emerges as extraordinary advances in design through the combined use of 3D printing and smart materials. Figure 1 shows the development steps of printing technology. Figure 2 illustrates the fundamental building blocks of 4D technology.

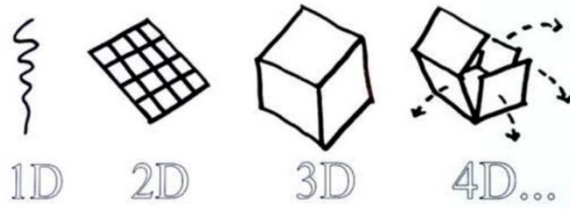


Figure 1. Simple representation of print types (Momeni et al., 2017).

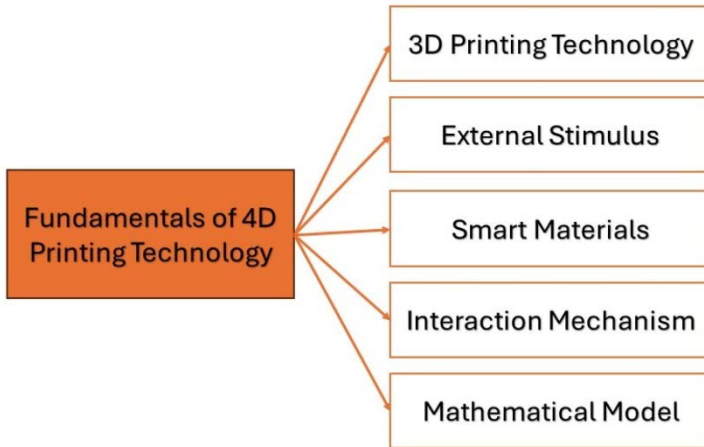


Figure 2. Components of 4D printing technology (Momeni et al., 2017).

The components of 4D printing technology, shown in Figure 2, can be explained as follows:

3D Printing Technology: A 4D printed structure is commonly created by combining multiple materials within a single printed structure. Differences in the properties of the materials lead to the desired deformation behaviour. Therefore, 3D printing is necessary for the production of multi-material structures with simple geometries (Momeni et al., 2017).

External Stimuli: A 4D printed object requires an environment that will trigger a functional change. These environments can include water, heat, light, electric current, pH, pressure, sound, or magnetic fields.

Interaction Mechanism: For a 4D printed object to take the desired shape, it may need to be exposed to external stimuli for a certain period of time and in a specific sequence, but this is how the interaction mechanism is realized (Momeni et al., 2017).

Mathematical Model: Mathematics is required to achieve the desired shape, properties, functions, and material distribution. To achieve these properties, theoretical and numerical models must be developed to establish the connections between 4D printing components (Momeni et al., 2017).

Smart Materials: Materials called "stimulus-responsive" or "smart" materials are one of the most important elements of 4D printing technology. Therefore, 4D printing requires specialized materials that can respond to triggers.

3. SHAPE MEMORY MATERIAL – (SMM)

Some metals and alloys exhibit different properties under the influence of external stimuli, making them widely used in the industrial field. These groups of materials, which can react to the stimuli and take on desired shapes, are called smart materials. In

other words, smart materials are unique materials that respond to chemical or biological influences such as pressure, humidity, light, temperature, electric or magnetic fields, etc. (Orhon, 2012). These smart materials can change shape under the influence of stimuli and then return to their original shape. This phenomenon is characterized by two distinct characteristics: the shape memory effect (SME) and Superelasticity (SE). Furthermore, the starting and ending temperatures of the martensitic and austenitic transformation in smart materials are also highly important. While the martensitic state can easily transform into a new shape, when heated above the austenitic transformation temperature, the smart material will remember its previous shape and return to its original form. The martensitic and austenitic transformation is schematically illustrated in Figure 3. This transformation in smart materials is explained based on the principle of the shape memory effect. Superelasticity, on the other hand, is a state of artificial elasticity that occurs above the austenite finish temperature. In other words, it would be correct to describe it as a martensitic transformation resulting from tension under load, followed by a reversal of the transformation when the load is removed (Kurt et al., 2003). Several important approaches, based on well-developed mechanisms and illustrated in Figure 4, exist to enable more controlled deformation.

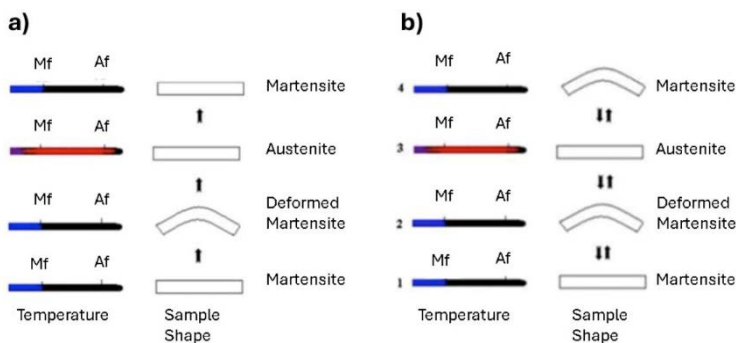


Figure 3. a. One-way shape memory effect b. Two-way shape effect (Çakmak et al., 2017).

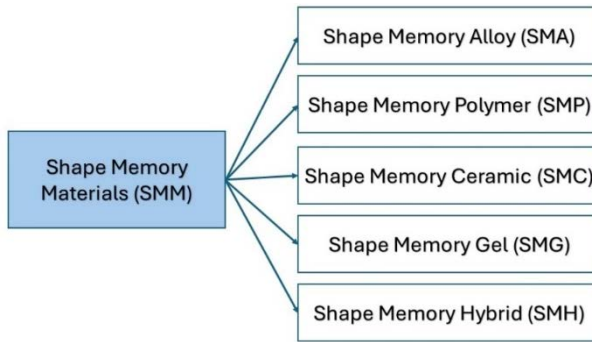


Figure 4. Shape memory material approaches.

3.1. Shape Memory Alloys – (SMA)

Shape memory alloy (SMA) is the term used to describe an alloy type that exhibits the ability to return to its previous shape or size under the influence of heat. SMAs are functional materials that exhibit thermally sensitive Superelasticity and shape memory properties, enabling martensitic and reversible transformations (Kurt et al., 2003; Wu et al., 2000). The main characteristic of SMA is that they can have two distinct shapes or crystal structures at the lower and upper values of the transformation temperature. These materials, which can return to their pre-deformation state at high temperatures, have a structure that can be deformed at lower temperatures. However, they are defined as "unidirectional shape memory materials" only upon heating. Upon recooling, they can be defined as "bidirectional shape memory materials" (Figure 3a) (Çakmak et al., 2017). Achieving bidirectional shape memory properties can be achieved in two ways. Samples are cooled below the martensite phase (M_f) temperature and shaped to the desired shape. It is then heated to a temperature above the austenite phase (A_f) and allowed to take on its new shape. This transformation process can be repeated 20-30 times. After these processes, the sample is effectively programmed. When cooled below the M_f temperature, it returns to its memorized shape.

When heated above the T_g temperature, it returns to its previous shape, completing the transformation (Figure 3b).

3.2. Shape Memory Polymer – (SMP)

Smart polymeric materials that have the ability to return from their temporary shape to their permanent shape when triggered by a stimulus such as temperature, pH, or chemicals after being deformed are called shape memory polymers (SMPs). Although the transformation mechanism in polymeric materials is quite different, they possess shape memory properties like SMAs. SMPs exist in elastic polymeric networks composed of transition points, which acquire their shape at the macroscopic level by being interconnected by cross-links at the molecular level. The fixed points in SMPs ensure that the permanent shape is retained by the covalent or physical bonds in the structure and the entropic properties of the polymer segments between them (Memik et al., 2018). While a crystalline/cross-linked polymer material can be achieved in its permanent state by traditional methods, it can also achieve its temporary shape after the heating, deformation, and cooling processes, as shown in Figure 5a. This process allows the initial shape of the sample to be encoded into the material. If the sample is heated to a value above the transition temperature, it will take its first permanent shape (Memik et al., 2018; Boyacıoğlu, 2016).

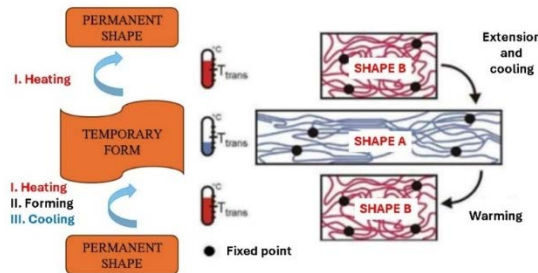


Figure 5. a. Programming of shape memory polymer with temperature b. Molecular mechanism of shape memory effect affected by temperature (Boyacıoğlu, 2016; Behl et al., 2007).

3.3. Shape Memory Ceramic – (SMC)

Some brittle ceramics can exhibit martensitic transformations, making them candidates for shape memory materials (Lai et al., 2013). Zircon-based ceramics, with their superior properties such as high strength, operating temperature, hardness, and low coefficient of friction, are known to offer many advantages over low-metallic alloys (Zhang et al., 2018). Zircon exists in three crystalline phases: the monoclinic phase is stable at room temperature, the tetragonal phase is stable between approximately 1,400°K and 2,500°K, and the cubic phase is the high-temperature phase found above approximately 2,500°K. A first-order, displacement tetragonal-monoclinic ($t \rightarrow m$) phase transformation can be activated by cooling pure tetragonal zirconia to a temperature below 1,400°K. This transformation manifests itself as a volume expansion of approximately 4.0%. This results in undesirable residual stresses. Consequently, cracks and porosity formation occur, which have detrimental effects on the structural integrity and durability of the zirconia substrate (Lai et al., 2013).

3.4. Shape Memory Gel – (SMG)

These gel forms are known to consist of an elastic cross-linked network and a fluid filling the internal interstitial space. This property allows them to easily change size and shape. Shape-memory gels, due to their structure and chemical properties, respond to infinite changes in stimuli such as temperature, light, ions, pH, solvent concentration, biochemical elements, small electric fields, and strain by contracting or swelling. Gels that undergo phase transitions, which involve continuous or discrete volume changes comparable to human muscles, can provide virtually actuating power (Hu et al., 1996; Zhang et al., 1995). Furthermore, these smart gels can be synthesized as composite gels that respond to multiple stimuli (Hu et al., 1996).

4. GENERAL FEATURES OF THE 4D PRINTING PROCESS

By adding the "time" factor as a new dimension to a 3D-printed material, it becomes a shape-memory or shape-changing material, which is now called 4D printing. 4D printing has five fundamental characteristics. These can be expressed as:

1. 3D printing is feasible
2. The presence of a stimulus or trigger
3. Enabling the use of smart or stimulus-responsive materials
4. Involving an interaction mechanism
5. The mathematical model is designable, and the resulting shape is predictable (Erdoğan, 2018).

Material change over time is called the fourth dimension. Therefore, this property of a material undergoing controlled change is defined as shape-motion behaviour. Furthermore, changes such as folding, bending, curling, linear or nonlinear expansion, etc., determine the shape-motion state. Furthermore, different behaviours such as dual and multiple shape memory can be defined depending on the type of effect and stimulus. The resulting structures possess superior properties such as multifunctionality, self-assembly, and repair, which are not available in 3D printing. Changing the shape of a 3D printed sample with time is possible through various methods. As seen in Figure 6, by placing hydrogels between one-dimensional disks, it was shown that the structures lengthened after a certain period of time in an environment where water was used as a trigger. The hydrogels placed between the disks began to move from the first dimension to the second dimension under the stimulus water, thus inducing a shape change throughout the entire structure.

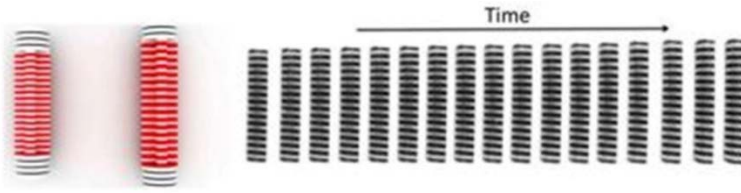


Figure 6. The phenomenon of deformation of one-dimensional samples in one-dimension, linear extension (Momeni et al., 2017).

In another study, a hook designed as an example of the multiple shape memory effect for 4D printing technology is shown in Figure 8. The study involves placing a white basket from a 30°C container into another 70°C container. This hook, produced through 3D printing from a composite smart material with a mathematical model and a pre-designed shape change, is observed to bend at 30°C and straighten at 70°C. The hook was able to hold the basket after bending in the 30°C container Figure 7(a-e) and then returned to its initial position in the 70°C container, straightening itself before releasing the basket Figure 7(f-h) (Momeni et al., 2017).

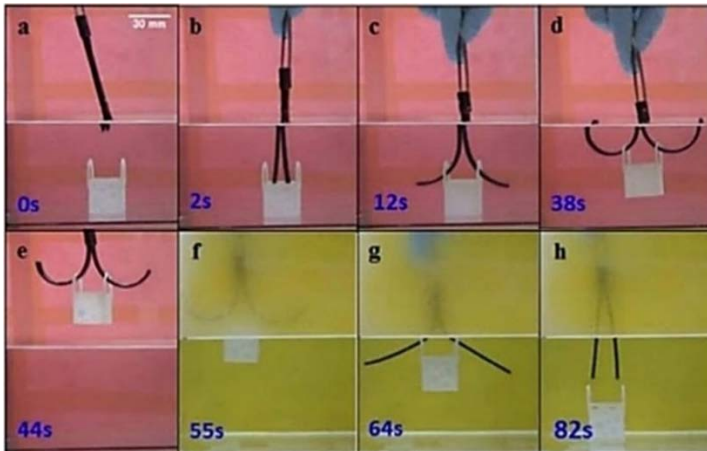


Figure 7. (a)-(e) The formation of the hook in the 30°C container under the time parameter and the stage of holding the basket, (f)-(h) The transfer to the 70°C container and the release of the basket (Momeni et al., 2017).

Various studies have aimed to impart different shape-motion behaviours to 3D objects by manipulating the material distribution within a structure created through shape change. As a result, the new concept of digital material, defined as the production of materials with different properties at different distribution rates, has emerged through 3D printing technology. Thanks to 4D printing, many materials with different properties can be transformed into a single volumetric structure. This can be explained as follows: it has been reported that a negative Poisson ratio can be achieved by distributing the appropriate amount and order of material within a volume (Hiller et al., 2010; Bakarich et al., 2015). By creating a mathematical model of the sample to be 4D printed, the shape change can be predicted. This mathematical model also allows for the structure to be produced with the least possible cost and time, enabling much more effective production. The parameters affecting the mathematical model include criteria such as 3D printing machine anisotropy, nozzle diameter, filament size, and material properties, as well as Young's modulus, twist ratio, and glass transition temperature. In addition, parameters such as the amount of heat and light, as well as the desired final shape, can be considered as other factors affecting the desired length and volume. Figure 8a shows the bending that occurs due to the expansion of hydrogels between hard disks designed in one dimension, as a result of the activation of the water stimulus, and Figure 8b shows the mathematical model of the bent part (Momeni et al., 2017).

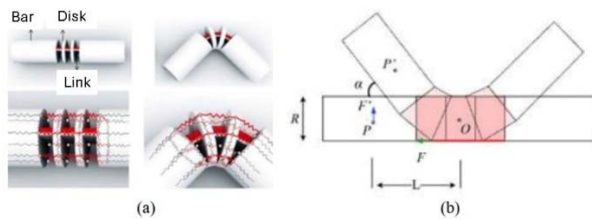


Figure 8. (a) Twist formed by expanding hydrogels, (b) mathematical model of the twist (Momeni et al., 2017).

Another important factor that allows a material to transform from its initial dimension to the desired size is the correct selection of the stimulus type. In this context, there are two primary stimulus mechanisms, known as hydromechanical and thermomechanical methods, that determine 4D printing quality. If an external force or loading determines the behaviour of a 4D printed structure after a stimulus, it acts as a constraint or strain on the mechanism. Stimulus mechanisms subjected to force are defined as forced. Conversely, if a free-moving mechanism, free from any force, causes shape change under the influence of liquid, heat, or pH, it is defined as unforced. Because the force factor significantly influences shape change, the choice of stimulus can also vary. Therefore, numerous studies on this topic in the literature have been conducted using stimulus factors with properties such as hydromechanical, thermomechanical, and pH mechanical. Figure 9 illustrates a two-step unforced transformation using a hydro-thermomechanical mechanism. The 4D printed sample expanded upon contact with cold water. Then, upon contact with hot water, it returned to its initial shape. The expansion and collapse of the part occur without any stress. In this mechanism, the stimuli that cause the structure to expand and collapse are water and temperature.

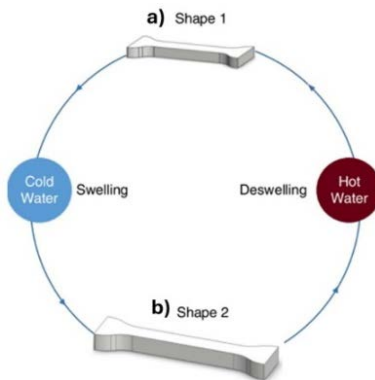


Figure 9. (a) Permanent shape of the test piece, (b) Expansion of the piece with cold water stimulus (Bakarich et al., 2015).

5. SOME APPLICATION AREAS OF 4D PRINTING

4D printing is a promising innovative technology used in many fields such as automotive, biomimetics, aerospace, and electronics (Figure 10). However, this technology still presents many challenges that require solutions. Among these challenges are the development of reversible shape memory materials, their printability, and the reproducibility of 4D printed objects. The smart shape memory materials used in 4D printing are named as shape memory alloys (SMAs), shape memory polymers (SMPS), shape memory ceramics (SMCs), shape memory gels (SMJs), and shape memory hybrids (SMHs) (Ergene et al., 2020; Lee et al., 2017).

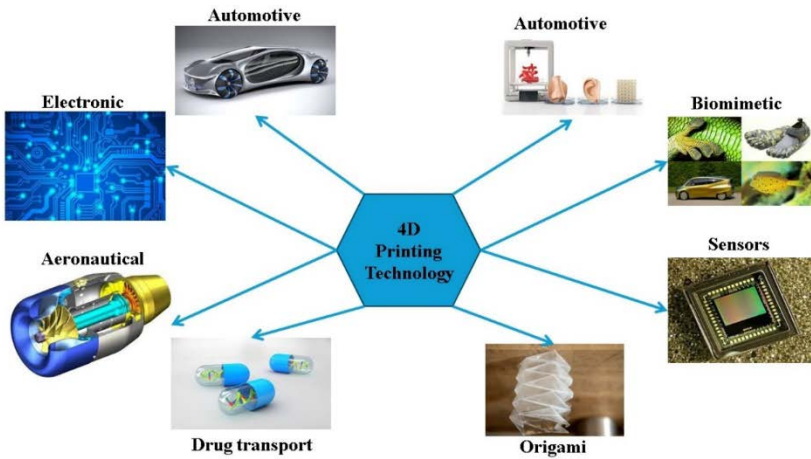


Figure 10. Application areas where 4D Printing Technology is used (Eryıldız, 2022).

In parallel with the growing interest in 4D printing technologies, there has been an increase in their applications in medical devices, smart textiles, soft robots, and defence and aerospace fields (López-Valdeolivas et al., 2018; Shiblee et al., 2019). The concept of self-assembly has entered our lives with the development of this technology. This means that the size of

4D printed products is no longer limited by the size of the print bed. It is possible to program parts for post-production. This reduces the volume required for initial storage, making it possible to use self-assembled products. These precise structures reduce overall printing time and production complexity, enabling the production of designs with simple geometric structures. Small individual parts can be printed using shape memory printing systems and then self-assembled to form larger structures. In a space study by Tibbits and colleagues, it was reported that self-assembly of parts occurred in a predetermined environment using 4D printing technology without the need for human intervention or an external power source (Tibbits et al., 2014). A study by Zhou et al. (2015) reported that self-assembling nanoscale parts were placed in a designated location in the human body for medical purposes. 4D printing is also a preferred method in soft robotics. Traditional soft robotic mechanisms are often known to have drawbacks such as being bulky, energy-consuming, and difficult to assemble. Thanks to 4D printing technologies, it is possible to minimize or completely eliminate the need for expensive, error-prone, and complex electromechanical devices such as motors, sensors, and electronics, which are present in traditional methods (Lee et al., 2017).

In 4D bioprinting, in addition to the maturation of smart materials over time and their new forms, a second technique based on the principle of material deformation is also employed. Objects produced using this technique can change their form and function using external stimuli such as temperature (Bakarich et al., 2015), water (Tibbits, 2019), and magnetic fields (Kokkinis et al., 2015), as well as intracellular forces such as cell fission (Ashammakhi et al., 2018). Shape changes in objects printed with this method is generally achieved using the external environmental stimuli temperature. Smart materials that exhibit the ability to fold, contract, or swell and expand under

temperature, and thus respond to temperature, are called "thermoreponsive." Furthermore, poly(N-Isopropylacrylamide) (PNIPAAm), one of the thermoresponsive materials in medical studies, is widely used in tissue regeneration and specific drug delivery applications. The structure, printed in two layers using PNIPAAm and the water-soluble polymer poly(ϵ -caprolactone) (PCL), can be folded and unfolded under the influence of temperature. Consequently, by controlling the temperature parameter, yeast cells can be released from the opened capsule in a timely manner (Figure 11) (Stoychev et al., 2011).

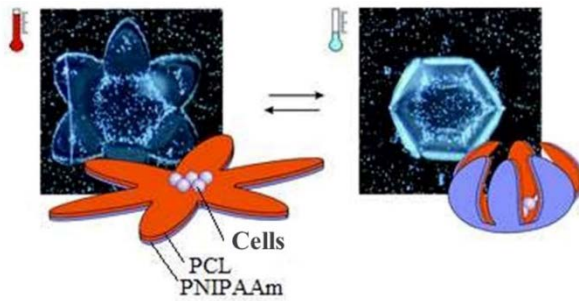


Figure 11. Temperature-sensitive double-layered capsule produced by bioprinting (Ashammakhi et al., 2018)

One of the biomedical applications where 4D bioprinting technology has brought about significant changes is the opportunity it provides for the development of new methods related to potential strategies developed for the creation of biomimetic blood vessels. For example, self-folding polymers can be used to produce blood vessels by encapsulating different cell types in a water environment, thus enabling the formation of multilayered tube-like structures. Another way to create vasculature (vascular system) with 4D bioprinting is to utilize the natural self-organization abilities of cells (Khoo et al., 2015). In a separate study in the field of bioprinting, a patient-specific shape memory stent was applied to broaches where airflow was disrupted or damaged for various reasons. A model design with a

wavy surface geometry was preferred to ensure the stent adheres to the broach wall and prevents slipping. The temporary shape of this stent was fabricated in a C-shaped and narrow form using the SLA method. The mechanism that makes this design possible has been stated as follows: The stent returns to its permanent form after 14 seconds, under the influence of body temperature stimulation, and the broach expands, thus creating airflow as desired (Zarek et al., 2017). Future studies are expected to explore the potential for tissue regeneration using 4D bioprinting in the biomedical field, as well as the integration of injected blood cells with a self-folding polymer, thus creating a wide range of applications for tissue repair (Gao et al., 2016).

REFERENCES

- Ashammakhi N. et al., (2018). „Advances and Future Perspectives in 4D Bioprinting,ioBiotechnol. J., vol. 13, no. 12, p. e1800148, Dec.
- Bakarich, S. E., Gorkin III, R., Panhuis, M. I. H., & Spinks, G. M. (2015). 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromolecular rapid communications*. 36(12): 1211-1217.
- Behl M. and A. Lendlein, (2007).nShape-memory polymers,olMater. Today, vol. 10, no. 4, pp. 2020p. Apr.
- Boyacıoğlu S., (2016). “Şekil Hafızalı Polimerler,” *Kimyasal Gelişmeler*, 05-Feb.
- Çakmak and M. Kaya, (2017).a, p. 10 100ornia, alifornia, CaÖmer nia, a, fornia, nia,Nevşehir Bilim ve Teknol. Derg., vol. 6, no. 2, pp. 54141. 54Dec.
- Dilibal S. (2006). The effect of long-term heat treatment on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys in defense and aerospace applications. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 15(2), 1-23.
- Erdoğan H., (2018). Şekil hafızalı malzemelerin katmanlı üretim yöntemiyle üretilmesi. *ASELSAN 3. Malzeme Teknolojileri Çalıştay*1. 35.
- Ergene, B., & Yalçın, B. (2020). 4 boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanlarının araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), 373-383. 12(3), 108-117.
- Eryıldız, M. (2022). Bölüm Viii 3, 4 Ve 5 Boyutlu Baskı Teknolojisinin İncelenmesi Ve Uygulama Alanlarinin Araştirilmesi. *Mühendislik Bölümleri* 173.

- Gao, B., Yang, Q., Zhao, X., Jin, G., Ma, Y., & Xu, F. (2016). 4D bioprinting for biomedical applications. *Trends in biotechnology*. 34(9): 746-756.
- Hiller, J., & Lipson, H. (2010). Tunable digital material properties for 3D voxel printers. *Rapid Prototyping Journal*. 16(4): 241-247.
- Hu Z., Y. Li, X. Zhang, and Y. Chen, (1996). eBending and shape memory effects of modulated gels,els,,Smart Structures and Materials: Smart Materials Technologies and Biomimetics, vol. 2716, pp. 22424 pp.
- Khoo Z. X. et al., (2015). ,t aprinting of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing,riVirtual Phys. Prototyp., vol. 10, no. 3, pp. 10303.2, Jul.
- Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang, S., An, J., ... & Yeong, W. Y. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*.10(3):103-122.
- Kokkinis D., M. Schaffner, and A. R. Studart, (2015). uMultimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials,atNat. Commun., vol. 6, no. 1, Dec.
- Kuang X. et al., (2019).,Advances in 4D Printing: Materials and Applications,nsAdv. Funct. Mater., vol. 29, no. 2, Jan.
- Kurt B. and N. Orhan, (2003). Şekil Hafızalı Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliği,” *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, vol. 2, no. 1,
- Lai A., Z. Du, C. L. Gan, and C. A. Schuh, (2013). hShape memory and superelastic ceramics at small scales,caScience, vol. 341, no. 6153, pp. 150505pp. 1Sep.

- Lee, J., Kim, H. C., Choi, J. W., & Lee, I. H. (2017). A review on 3D printed smart devices for 4D printing. *International Journal of Precision*.
- López-Valdeolivas, M., Liu, D., Broer, D. J., & Sánchez-Somolinos, C. (2018). 4D printed actuators with soft-robotic functions. *Macromolecular rapid communications*, 39(5), 1700710.
- Memik N. K. and S. Kaplan, (2018). n. . 45145144ic aatic aac aic aensitic a a, fornia, *Tekst. Ve Mühendis*, vol. 25, no. 111, pp. 26464pp. Sep.
- Momeni F., S. M.Mehdi Hassani.N, X. Liu, and J. Ni, (2017)., *Nreview of 4D printing,riMater. Des.*, vol. 122, pp. 4242 pp. 42 422t,
- Momeni, F., Liu, X., & Ni, J. (2017). A review of 4D printing. *Materials & design*. 122: 42-79.
- Orhon A. V., (2012). 422ting, J. Ni, J. Ni, Ni, . NKulan. O,ulEge Mimar., p. 4,
- Roy, D., Cambre, J. N., & Sumerlin, B. S. (2010). Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials. *Progress in Polymer Science*, 35(1-2): 278-301.
- Shiblee, M. N. I., Ahmed, K., Kawakami, M., & Furukawa, H. (2019). 4D printing of shape-memory hydrogels for soft-robotic functions. *Advanced Materials Technologies*, 4(8), 1900071.
- Stoychev G., N. Puretskiy, and L. Ionov, (2011). nov, ofolding all-polymer thermoresponsive microcapsules,icSoft Matter, vol. 7, no. 7, pp. 327777 327777 3277277.

- Tibbitts S., (2013). The emergence of 4D printing. *IEEE Transactions on Materials Science and Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 116-121.
- Tibbitts S., (2019). 4D printing: Material Shape Change. *Architectural Design*, vol. 84, no. 1, pp. 116-121.
- Tibbitts, S. (2015). 4D Printing: Multi-material shape change. *Architectural Design* 84.1.2014: 116-121.
- Tibbitts, S., McKnelly, C., Olguin, C., Dikovsky, D., & Hirsch, S. (2014). 4D printing and universal transformation. *Material Agency, Academia, Design Agency*, 539-548.
- Wohlers T. and T. Gornet, (2016). *History of additive manufacturing*, Wohlers Associates, USA.
- Wu M. H. and L. M. Schetky, (2000). *Industrial Applications For Shape Memory Alloys*, presented at the Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California, pp. 171-179.
- Wu, J. J. Huang, L. M. Zhao, Q. Xie, (2018). 4D Printing: History and recent progress. *Chinese J. Polym. Sci.* 36(5): 563-575.
- Zarek, M., Mansour, N., Shapira, S., & Cohn, D. (2017). 4D printing of shape memory-based personalized endoluminal medical devices. *Macromolecular rapid communications*. 38(2): 1600628.
- Zhang N. and M. A. Zaeem, (2018). *Nanoscale Self-Healing Mechanisms in Shape Memory Ceramics*, *ArXiv* 1812.11136 Cond-Mat, Dec.
- Zhang Z. J. and B. Z. Jang, (1995). *Actuating power capacities of polymers, gels, and composites for use in smart materials systems*, *Smart Structures and Materials* 1995: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, vol. 2447, pp. 26-35.

Zhou Y. et al. From 3D to 4D Printing: Approaches and typical applications. Journal of Mechanical Science and Technology 29, 10: 4281~4288.

ALAŞIM ELEMENTLERİNİN AKMA GERİLMESİ VE SERTLİK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Can GÖNENLİ¹

İbrahim AYDIN²

Ali İhsan BAHÇEPİNAR³

1. GİRİŞ

Alaşımalar, farklı elementlerin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilen ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Alaşım elementlerinin türü ve miktarı, çeliklerin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyerek malzemenin kullanım performansını belirler. Karbon (C), silisyum (Si), mangan (Mn), fosfor (P), kükürt (S), magnezyum (Mg), krom (Cr), nikel (Ni) ve bakır (Cu) gibi elementler; çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik gibi parametrelerde farklı etkiler oluşturur.

Literatürde, alaşımlarda bulunan elementlerin mekanik performans üzerindeki etkileri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Örneğin, Al-Si alaşımlarına Mg ve Cu ilavesinin mekanik dayanımı artırdığı ve ayrıca alaşımın mikro yapısında meydana

¹ Doç. Dr. Can GÖNENLİ, Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, can.gonenli@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9163-1569.

² Doç. Dr. İbrahim AYDIN, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ibrahim.aydin@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6281-4902.

³ Öğr. Gör. Dr. Ali İhsan BAHÇEPİNAR, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ali.bahcepinar@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9744-0146.

gelen değişimlerin malzeme dayanıklılığını geliştirdiği bildirilmiştir (Abdelaziz ve ark., 2019). Mg ilavesinin, Al-%5Si-Cu alaşımlarının mikro yapısını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği; Mg'nin mikro yapı inceltici etkisinin çekme dayanımını artırdığı belirtilmiştir (Salleh ve ark., 2015). Co-Cr-W-Ni esaslı biyomedikal alaşımlara Mn ve Si eklenmesinin, yalnızca mekanik dayanımı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda alaşımın mikro yapısında da belirgin iyileşmeler sağladığı rapor edilmiştir (Ueki ve ark., 2021). Al-Mg-Si alaşımlarında Cu içeriğinin merkezi segregasyon bileşimi ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, Cu miktarındaki artışın alaşımın dayanımını artırdığı tespit edilmiştir (Wu ve ark., 2023). Cu-Fe-Cr-Si alaşımında Mg içeriğinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin incelendiği bir diğer çalışmada, Mg ilavesiyle birlikte yüksek dayanım ve iletkenlik gibi özelliklerin iyileştiği belirlenmiştir (Liu ve ark., 2023). Al-Mg-Si-Cu-Zn alaşımlarına Ni ilavesinin mikro yapıyı geliştirerek mekanik dayanımı artırdığı ve çekme dayanımında anlamlı bir artış sağladığı bildirilmiştir (Li ve ark., 2019). Al-Si alaşımlarına az miktarda Cu ve Mg eklenmesinin, ısıtılma işlem uygulanmasıyla mekanik özellikleri geliştirdiğini gösteren bir başka çalışmada, Cu ve Mg'nin alaşım mikro yapısında ince fazların oluşumuna yol açtığı belirtilmiştir (Beroual ve ark., 2019). Yine Al-Si alaşımlarına Fe ve Cu ilavesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği, bu iki elementin kombinasyonunun alaşım dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir (Wang ve ark., 2010). Cu-Ni-Si alaşımlarında mikro yapı değişimlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelendiği bir çalışmada, ince dispersoid fazların oluşumunun alaşımın dayanımını artırdığı tespit edilmiştir (Gholami ve ark., 2017). 2011 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise Fe ve Cu elementlerinin Al-Si-Cu-Fe-Mn alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış; bu elementlerin yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri iyileştirerek alaşım dayanımını artırdığı belirtilmiştir (Wang,

2011). Al-7Si-0.3Mg-0.8Fe alaşımına Be, Mn, Ca ve Sr gibi elementlerin eklenmesinin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği bir çalışmada, bu element kombinasyonlarının mekanik özellikleri anlamlı biçimde geliştirdiği rapor edilmiştir (Kumari, 2007).

Daha önce yürütülen çalışmada, bu elementlerin çekme dayanımı ve uzama yüzdesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur (Gönenli ve ark., 2024). Bu çalışmada ise aynı elementlerin akma dayanımı ve sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, bir sanayi kuruluşundan temin edilen 20 adet döküm çelik numunesine ait kimyasal bileşim ve mekanik test raporları kullanılmıştır. Her numuneye ait element oranları ile ölçülen mekanik özellikler karşılaştırılarak, akma dayanımı ve sertlik değerlerinin alaşım bileşimiyle olan ilişkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sayısal veriler, her bir elementin mekanik davranışa katkısını ortaya koymak amacıyla grafiksel olarak analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, üretimden elde edilen gerçek verilerin değerlendirilmesi yoluyla, farklı alaşım elementlerinin çeliklerin dayanım ve sertlik özellikleri üzerindeki etkilerini sayısal olarak ortaya koymaktadır. Böylece çalışma, döküm çeliklerin mekanik performansının bileşim temelli olarak yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

Demir esaslı malzemelerde mekanik özellikleri belirleyen en temel bileşenlerden biri karbondur (C). Karbon oranındaki artış çeliğin dayanım ve sertlik değerlerini yükseltirken, fazla miktarlarda bulunması kırılgan davranışa yol açabilir. Özellikle akma ve çekme dayanımı gibi özelliklerde karbon içeriği belirleyici bir parametredir. Silisyum (Si) elementi, döküm özelliklerini geliştirmesi ve alaşımın ince taneli bir yapı

kazanmasına katkı sağlamasıyla bilinir. Bu özellik sayesinde hem sertlik hem de yüksek sıcaklık dayanımı artar. Paslanmaz çeliklerde ise yüzeyde koruyucu oksit tabakası oluşturarak oksidasyona karşı direnç kazandırır. Manganez (Mn), çeliklerin tokluk ve süneklik özelliklerini iyileştiren bir alaşım elementidir. Oksijen ve kükürt gibi istenmeyen elementlerle reaksiyona girerek zararlı etkilerini sınırlar, böylece malzemenin hem dayanımını hem de üretim kalitesini artırır. Ayrıca belirli oranlarda kullanıldığında korozyon direncine olumlu katkı sağlar. Fosfor (P), düşük oranlarda eklendiğinde işlenebilirliği artırır ve dökümde sıvı akışını kolaylaştırır. Ancak miktarının artması, çeliğin gevrekleşmesine neden olabileceği için dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Kükürt (S), genellikle istenmeyen bir safsızlık olarak değerlendirilir, çünkü gevrek kırılma davranışını artırabilir. Ancak belirli sınırlar içinde ve manganez ile birlikte bulunduğu, talaşlı imalat performansını artırıcı etki gösterebilir. Magnezyum (Mg), özellikle hafif alaşımlarda dayanım ve sertliği yükseltir. Döküm malzemelerde Mg ilavesi, birim ağırlık başına düşen mukavemetin artmasını sağlayarak yüksek performanslı ve düşük yoğunluklu yapıların elde edilmesine olanak verir. Krom (Cr), çeliklerin korozyon ve oksidasyon direncini güçlendiren temel bir elementtir. Paslanmaz çeliklerin karakteristik özelliklerini kazandırır ve yüksek sıcaklıklarda sertlik ile dayanımın korunmasına katkı sağlar. Nikel (Ni), çeliğe süneklik ve darbe dayanımı kazandıran, aynı zamanda düşük sıcaklıklarda tokluğu koruyan bir elementtir. Bu nedenle nikel içeren çelikler, hem korozyon direncinin hem de mekanik kararlılığın önemli olduğu uygulamalarda tercih edilir. Bakır (Cu) elementi ise alaşımların işlenebilirliğini ve korozyon dayanımını iyileştirir. Alüminyum esaslı malzemelerde sertlik ve dayanımı artırırken, çelik yüzeylerde oluşturduğu koruyucu oksit tabakası sayesinde atmosferik etkilere karşı koruma sağlar (Callister ve ark., 2021; Dieter, 1986; ASM International, 1990).

Bu çalışmada, farklı kimyasal bileşimlere sahip döküm numunelerinin mekanik özellikleri incelenmiş ve özellikle akma dayanımı (yield stress) ile sertlik değerlerinin, alaşım elementlerinin oranlarıyla olan ilişkisi değerlendirilmiştir. Metal alaşımların performansını ve dayanıklılığını belirleyen bu mekanik özellikler, malzemenin iç yapısındaki elementlerin oranlarına ve bu elementlerin birbirleriyle olan etkileşimlerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu kapsamda, Karbon (C), Silisyum (Si), Mangan (Mn), Fosfor (P), Kükürt (S), Magnezyum (Mg), Krom (Cr), Nikel (Ni) ve Bakır (Cu) elementlerinin oranları dikkate alınarak akma dayanımı ve sertlik ölçümleri karşılaştırılmıştır. Analizlerde, sanayi kuruluşundan temin edilen toplam 20 adet döküm çelik numunesine ait kimyasal bileşim verileri ve mekanik test sonuçları kullanılmıştır. Numunelerde %95 ve üzeri matris oranı ile %95 ve üzeri nodül sayısına sahip örnekler değerlendirmeye alınmıştır. “Matris”, malzemenin temel yapısal fazını veya mikro yapısal bileşenini temsil ederken; “nodül” terimi özellikle dökme demir gibi malzemelerde görülen küçük, yuvarlak taneleri ifade etmektedir. Nodül sayısı genellikle dökme demirlerdeki grafit nodüllerini veya ferrit-perlit fazlarına ait tanecikleri tanımlamak için kullanılmaktadır.

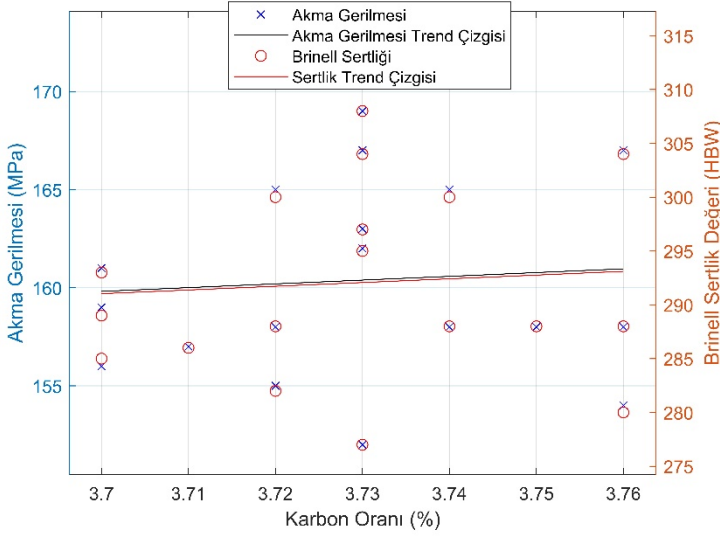
3. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında incelenen 20 adet kimyasal analiz, her bir element için ayrı ayrı sunulmuştur. Tablo 1, çalışmada kullanılan numunelere ait alaşım elementlerinin kimyasal analiz sonuçlarına göre veri aralıklarını göstermektedir.

Tablo 1. Alaşım elementlerinin veri aralıkları.

Sembol	İsim	Aralık (%)
C	Karbon	3.70 – 3.76
Si	Silisyum	2.60 – 2.68
Mn	Mangan	0.14 – 0.18
P	Fosfor	0.015 – 0.023
S	Kükürt	0.009 – 0.015
Mg	Magnezyum	0.043 – 0.053
Cr	Krom	0.035 – 0.049
Ni	Nikel	0.045 – 0.058
Cu	Bakır	0.035 – 0.052

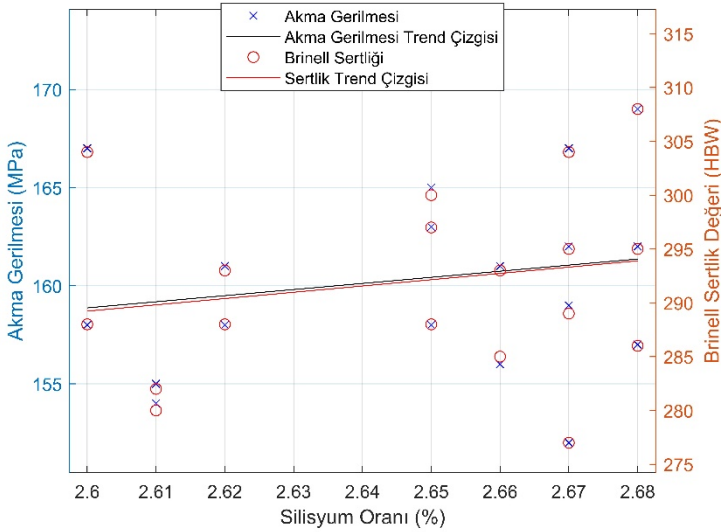
Karbon oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil-1’de sunulmuştur. Grafikte sol düşey eksen akma gerilmesine, sağ düşey eksen ise Brinell sertlik değerine karşılık gelmektedir. Noktalar deneysel ölçümleri, düz çizgiler ise ilgili veriler üzerinden elde edilen doğrusal trend çizgilerini temsil etmektedir.



Şekil 1. Karbon oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Şekil 1’de karbon oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, hem deneysel veriler hem de eğilim çizgileri karbon oranındaki artışla birlikte artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Verilerin büyük kısmının

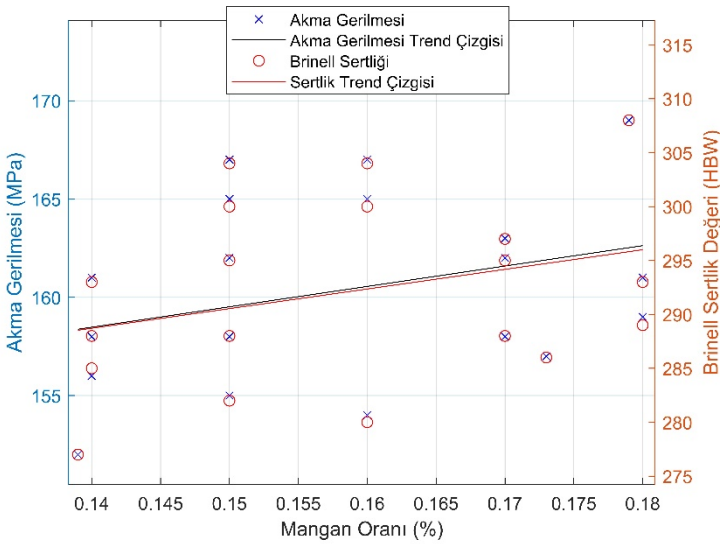
%3.71–%3.74 aralığında yoğunlaştığı görülmekte olup, bu bölgede akma gerilmesi ve sertlik değerlerinin paralel bir dağılım sergilediği anlaşılmaktadır. Trend çizgilerinin pozitif eğimli olması, karbon miktarının artmasının malzeme dayanımına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, karbonun metal matris içerisinde karbür fazlarının oluşumunu teşvik etmesi ve dislokasyon hareketini sınırlandırmasıyla ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak, karbon oranı ile mekanik dayanım arasındaki pozitif yönlü bu ilişki, karbonun alaşımın mukavemet karakteristiğini belirleyen başlıca elementlerden biri olduğunu göstermektedir. Şekil-2’de Silisyum oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2. Silisyum oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Silisyum oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, her iki mekanik özelliğin de artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Eğilim çizgilerinin pozitif yönde olması, silisyumun katı çözelti sertleşmesine katkı sağlayarak malzemenin deformasyona karşı direncini artırabileceğini göstermektedir. Silisyum, ferritik-perlitik

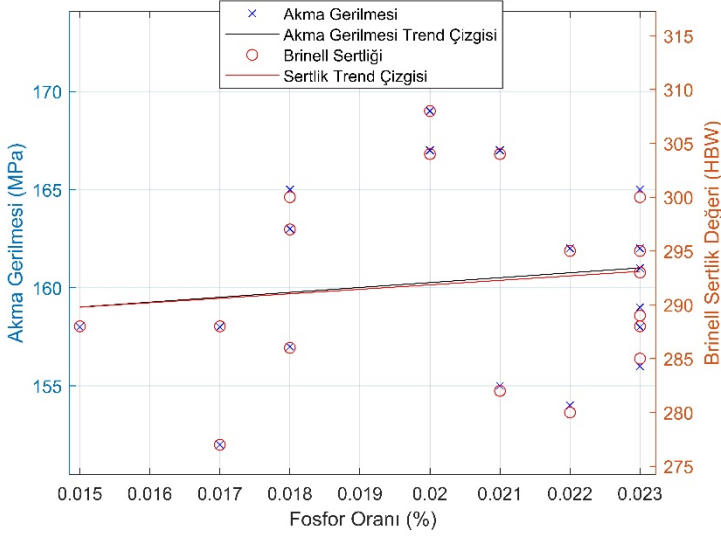
yapılarda çözünürlüğü sınırlı olmakla birlikte, mevcut kompozisyon aralığında dislokasyon hareketini kısmen engelleyerek hem akma gerilmesinin hem de sertliğin artış yönünde eğilim göstermesine neden olmaktadır. Bu sonuç, silisyumun alaşımın mekanik dayanımını destekleyen bir element olarak rol oynadığını ortaya koymaktadır. Şekil-3'te, Mangan oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki sunulmuştur.



Şekil 3. Mangan oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

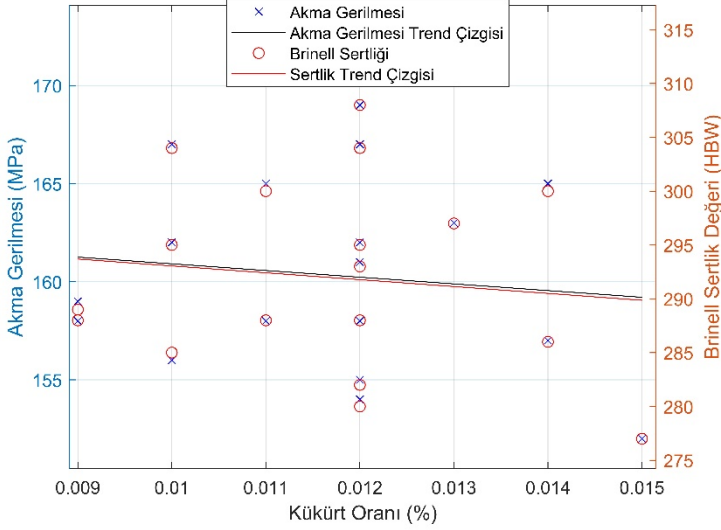
Mangan oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, her iki mekanik özelliğin de artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Manganın ferrit matrisinde çözünürlük sağlaması ve dislokasyon hareketini kısmen kısıtlaması, bu pozitif eğilimin temel nedenlerinden biridir. Eğilim çizgilerinin paralel bir şekilde yükselmesi, manganın hem plastik deformasyon direnci hem de yüzey sertliği üzerinde benzer etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu durum, manganın çelik esaslı alaşımlarda dayanımı artıran katkı elementlerinden biri olduğunu ve mevcut kompozisyon

aralığında mekanik özellikler üzerinde kararlı bir güçlendirici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Şekil-4'te Fosfor oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki verilmiştir.



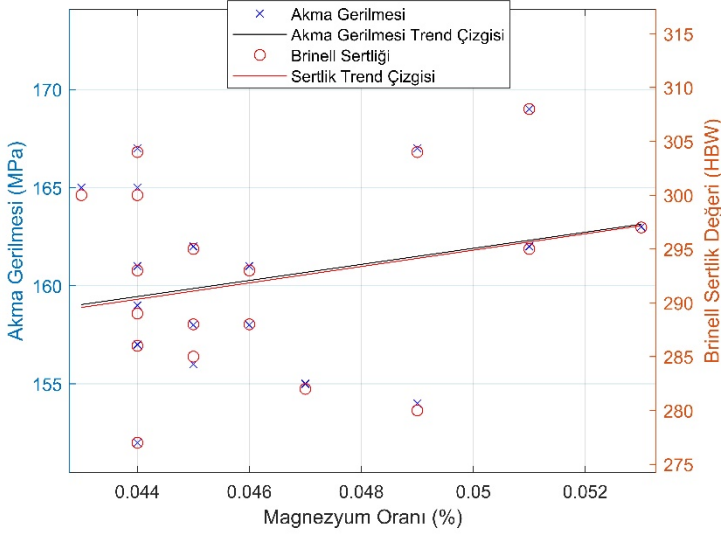
Şekil 4. Fosfor oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Fosfor oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, her iki mekanik özelliğin de artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Fosforun tane sınırlarında segregasyon eğilimi göstermesi, düşük oranlarda mukavemeti artırıcı bir etki yaratmasına neden olmaktadır. Trend çizgilerinin pozitif eğimli olması, fosforun mevcut kompozisyon aralığında hem akma gerilmesi hem de sertlik üzerinde dayanımı destekleyen bir rol oynadığını göstermektedir. Şekil-5'te, Kükürt oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki gösterilmektedir.



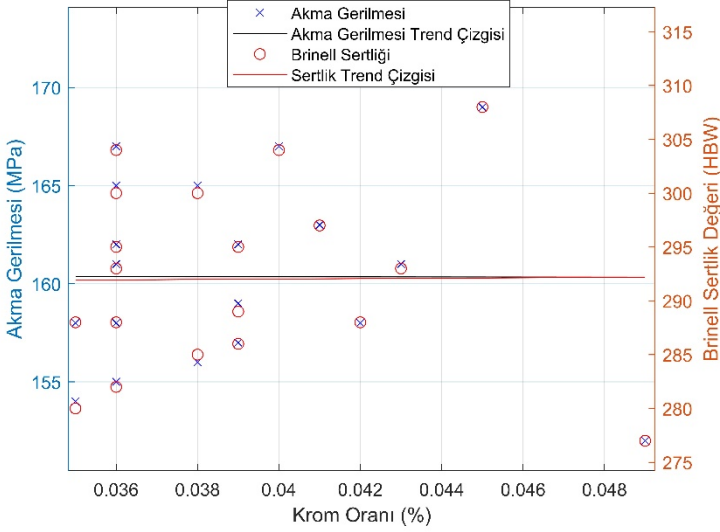
Şekil 5. Kükürt oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Kükürt oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, her iki mekanik özellikte de azalış eğilimi gözlenmektedir. Eğilim çizgilerinin negatif eğimli olması, kükürdün malzemenin deformasyon davranışını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Kükürt, çeliklerde sülfür bileşikleri oluşturarak tane sınırlarında segregasyona neden olur ve bu durum hem sünekliği azaltır hem de gevrekleşme eğilimini artırır. Bu nedenle, elde edilen azalış eğilimi kükürdün dayanım ve sertlik üzerinde beklenen olumsuz etkisini doğrular niteliktedir. Ancak eğimin düşük olması, mevcut kompozisyon aralığında kükürdün makro ölçekte belirgin bir etkiden ziyade, mikro yapısal düzeyde lokal zayıflamalara yol açtığını düşündürmektedir. Şekil-6'da, Magnezyum oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki gösterilmektedir.



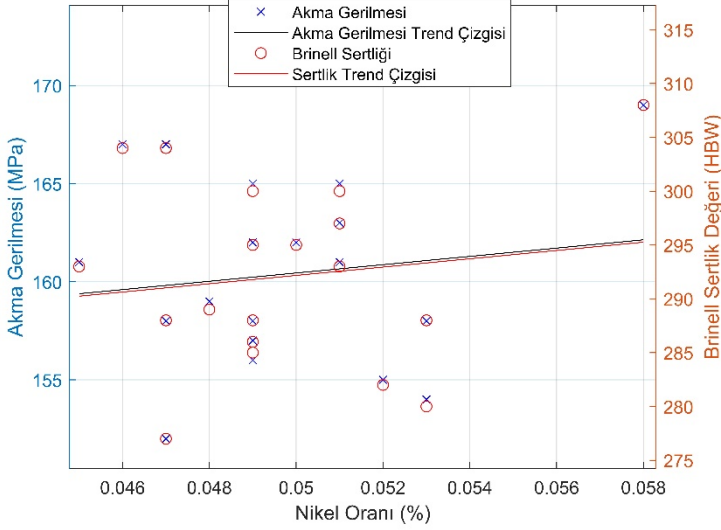
Şekil 6. Magnezyum oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Şekil-6 incelendiğinde, magnezyum oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, her iki mekanik özelliğe de artış eğilimi gözlenmektedir. Pozitif eğimli trend çizgileri, magnezyumun çökelti sertleşmesine katkı sağlayarak malzemenin deformasyona karşı direncini artırdığını göstermektedir. Bu etki, magnezyumun dislokasyon yoğunluğunu yükseltmesi ve matris fazında dayanımı artıran çökeltilerin oluşumuna neden olmasıyla açıklanabilir. Eğimin sınırlı kalması ise mevcut kompozisyon aralığında magnezyumun çözünürlük kapasitesine yaklaşılmış olabileceğini ve bu nedenle artış etkisinin belirli bir konsantrasyonun ötesinde kararlı bir seviyede seyrettiğini düşündürmektedir. Şekil-7’de, krom oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki verilmiştir.



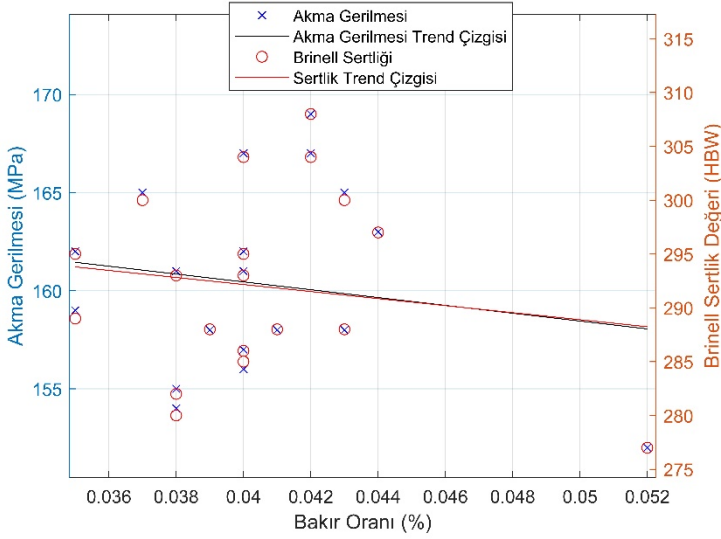
Şekil 7. Krom oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Şekil 7’deki krom oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, her iki mekanik özellikte de belirgin bir değişim eğilimi gözlenmemektedir. Trend çizgilerinin yataya yakın seyretmesi, kromun incelenen kompozisyon aralığında mekanik dayanım üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Krom, genellikle yüksek oranlarda sertlik, korozyon direnci ve yüzey dayanımını artıran bir element olarak bilinse de, mevcut düşük konsantrasyonlarda bu etkilerin mikro yapıda belirgin hale gelmediği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu sonuçlar, kromun bu alaşım sisteminde elastik-plastik davranışı doğrudan etkilemediğini, ancak olası yüzeysel dayanım artışlarının daha yüksek oranlarda ortaya çıkabileceğini düşündürmektedir. Şekil-8’de, Nikel oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki sunulmuştur.



Şekil 8. Nikel oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Nikel oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği arasındaki ilişki incelendiğinde, her iki mekanik özellikte de pozitif bir eğilim gözlenmektedir. Eğilim çizgilerinin benzer şekilde artış göstermesi, nikelin alaşımın mekanik dayanımını artırıcı yönde etkide bulunduğunu ortaya koymaktadır. Nikel, çelik ve dökme demir sistemlerinde tane sınırlarını stabilize eden ve dislokasyon hareketini zorlaştırarak dayanım artışı sağlayan bir elementtir. Bu durum aynı zamanda sünekliğin belirli ölçüde korunmasına da olanak tanır. Elde edilen veriler, nikel oranının incelenen aralıkta düşük olmasına rağmen malzemenin deformasyon direncine katkı sunduğunu, ancak bu etkinin mikro yapısal dönüşümler açısından sınırlı kaldığını göstermektedir. Şekil-9'da, bakır oranı ile malzemenin akma gerilmesi ve Brinell sertlik değeri arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 9. Bakır oranı ile akma gerilmesi ve Brinell sertliği ilişkisi

Şekil-9'a göre her iki mekanik özellikte de azalma eğilimi gözlenmektedir. Negatif eğimli trend çizgileri, bakır oranındaki artışın malzeme dayanımına doğrudan katkı sağlamadığını ve aksine plastik deformasyon direncini bir miktar düşürebileceğini göstermektedir. Bakır, düşük oranlarda katı çözelti sertleşmesine katkı verebilse de, artan oranlarda tane sınırlarında segregasyona neden olarak mukavemeti olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durum, yüksek difüzyon kabiliyetine sahip bakırın mikro yapıda lokal zayıflamalara yol açabilmesiyle açıklanabilir. Dolayısıyla, incelenen aralıkta bakırın mekanik özellikler üzerindeki etkisi zayıf ve kısmen olumsuz yönde seyretmektedir.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, alaşımların kimyasal bileşimi ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler, özellikle akma gerilmesi ve Brinell sertliği açısından incelenmiştir. Grafikselsel analizlerden elde edilen bulgular, her bir alaşım elementinin malzeme matrisi içindeki

metalurjik rolüne bağlı olarak farklı yön ve büyüklükte etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

İncelenen elementler arasında fosfor (P) ve nikel (Ni), hem akma gerilmesi hem de sertlik üzerinde hafif bir artış eğilimi göstermiştir. Bu durum, söz konusu elementlerin katı çözelti sertleşmesi ve tane sınırı güçlendirmesi yoluyla mukavemet artırıcı etkileriyle uyumludur. Mangan (Mn) ve magnezyum (Mg) da benzer şekilde pozitif ancak sınırlı bir etki oluşturmuş, bu da incelenen bileşim aralığında etkilerinin kısıtlı kaldığını göstermiştir. Buna karşılık, kükürt (S) ve bakır (Cu) elementlerinin artışı, hem akma gerilmesi hem de sertlik değerlerinde hafif bir azalma eğilimi yaratmıştır. Bu eğilim, bu elementlerin tane sınırlarında segregasyona veya yumuşak faz oluşumuna yol açma eğilimleriyle açıklanabilir. Krom (Cr) ise incelenen oranlarda belirgin bir değişim göstermemiş, mekanik özellikler üzerinde nötr bir etki sergilemiştir.

Genel olarak, sonuçlar alaşım elementlerindeki küçük oran değişimlerinin malzemenin mekanik davranışında ölçülebilir ancak sınırlı düzeyde değişimlere neden olduğunu ortaya koymaktadır. Trend çizgilerinin düşük eğimleri, incelenen bileşim aralığının kararlı bir bölgeye karşılık geldiğini ve element oranlarının daha fazla artırılmasının yalnızca sınırlı düzeyde iyileşme sağlayacağını göstermektedir.

Elde edilen bulgular, önceki çalışmalarda elde edilen çekme gerilmesi ve süneklik ilişkileriyle birlikte değerlendirildiğinde, alaşım dayanımının sünekliği azaltan ve artıran faktörler arasındaki karmaşık bir dengeyle belirlendiğini göstermektedir. Bu nedenle, malzemenin kimyasal bileşiminin optimize edilmesi sürecinde, her bir elementin katkı oranının dikkatle ayarlanması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak mikro yapı incelemeleri ve çevresel performans testleri (örneğin yüksek sıcaklık veya korozyon koşulları altında) bu bulguların

mekanizmasını daha ayrıntılı biçimde açıklayarak mühendislik uygulamalarında bileşim optimizasyonu için değerli bilgiler sağlayabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya sağladıkları veri desteğiyle katkıda bulunan Maren Industrial firmasına teşekkür ederiz.

REFERENCES

- Abdelaziz, M. H., Samuel, A. M., Doty, H. W., Valtierra, S. ve Samuel, F. H. (2019). Effect of additives on the microstructure and tensile properties of Al-Si Alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2255–2268. doi:10.1016/j.jmrt.2019.03.003
- ASM International. (1990). *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection—Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
- Beroual, S., Boumerzoug, Z., Paillard, P. ve Borjon-Piron, Y. (2019). *Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys*. *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 1026–1035. doi:10.1016/j.jallcom.2018.12.365
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2021). *Materials science and engineering: An introduction* (10. baskı). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical metallurgy*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Gholami, M., Vesely, J., Altenberger, I., Kuhn, H.-A., Janecek, M., Wollmann, M. ve Wagner, L. (2017). *Effects of microstructure on mechanical properties of CuNiSi alloys*. *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 201–212. doi:10.1016/j.jallcom.2016.11.233
- Gönenli, C. ve Duymazlar, O. (2024). *Investigation of tensile stress and percentage elongation relationships in alloys depending on the alloy elements*. In *Makine Mühendisliği* (ss. 116–133). Afyonkarahisar: Yaz Yayınları. e-ISBN: 978-625-6104-66-2

- Li, G., Guo, M., Wang, Y., Zheng, C., Zhang, J. ve Zhuang, L. (2019). *Effect of Ni addition on microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu–Zn alloys with a high Mg/Si ratio. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 26(6), 740–751. doi:10.1007/s12613-019-1778-9
- Salleh, M. S., Omar, M. Z. ve Syarif, J. (2015). *The effects of Mg addition on the microstructure and mechanical properties of thixoformed Al–5%Si–Cu alloys. Journal of Alloys and Compounds*, 621, 121–130. doi:10.1016/j.jallcom.2014.09.152
- Sreeja Kumari, S. S., Pillai, R. M., Rajan, T. P. D. ve Pai, B. C. (2007). *Effects of individual and combined additions of Be, Mn, Ca and Sr on the solidification behaviour, structure and mechanical properties of Al–7Si–0.3Mg–0.8Fe alloy. Materials Science and Engineering: A*, 460–461, 561–573. doi:10.1016/j.msea.2007.01.082
- Ueki, K., Yanagihara, S., Ueda, K., Nakai, M., Nakano, T. ve Narushima, T. (2021). *Improvement of mechanical properties by microstructural evolution of biomedical Co–Cr–W–Ni alloys with the addition of Mn and Si. Materials Transactions*, 62(2), 229–238. doi:10.2320/matertrans.mtm2020300
- Wang, E. R., Hui, X. D. ve Chen, G. L. (2011). *Eutectic Al–Si–Cu–Fe–Mn alloys with enhanced mechanical properties at room and elevated temperature. Materials & Design*, 32(8–9), 4333–4340. doi:10.1016/j.matdes.2011.04.005
- Wang, E. R., Hui, X. D., Wang, S. S., Zhao, Y. F. ve Chen, G. L. (2010). *Improved mechanical properties in cast Al–Si alloys by combined alloying of Fe and Cu. Materials Science and Engineering: A*, 527(29–30), 7878–7884. doi:10.1016/j.msea.2010.08.058

- Wu, X., Guan, Z.-P., Yang, Z.-Z., Wang, X., Qiu, F. ve Wang, H.-Y. (2023). *Effect of Cu content on central-segregation composition and mechanical properties of Al–Mg–Si alloys produced by twin-roll casting*. *Materials Science and Engineering: A*, 869, 144782. doi:10.1016/j.msea.2023.144782
- Yu, X., Song, Y., Wang, C., Gu, K., Zheng, L., Qiu, W. ve Li, Z. (2023). *Effect of Mg content on the microstructure and properties of high strength, high conductivity Cu–Fe–Cr–Si–Mg alloy*. *Materials Science and Engineering: A*, 883, 145510. doi:10.1016/j.msea.2023.145510

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

DEĞERLENDİRMELERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com