

Teknik Bilimler Dergisi

e-ISSN: 3023-591X

Journal of Technical Sciences



EDİTÖR KURULU (EDITORIAL BOARD)

Baş Editör (Editor in Chief)

Prof. Dr. Ali Etem GÜREL, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Editör Yardımcıları (Editors)

Doç. Dr. Ümit AĞBULUT, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Yayın Danışma Kurulu (Editorial Advisory Board)

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Asif AFZAL, PA College of Engineering, India

Prof. Dr. B. DEEPANRAJ, Prince Mohammad Bin Fahd University, Saudi Arabia

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Günnur KOÇAR, Ege Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Hakan Fehmi ÖZTOP, Fırat Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Hitesh PANCHAL, Government Engineering College, India

Prof. Dr. İlhan CEYLAN, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. M.S. GAD, Fayoum University, Egypt

Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ, Gazi Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Onuralp ULUER, Gazi Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Prabhakar SHARMA, Delhi Skill and Entrepreneurship University, India

Prof. Dr. Resul KARA, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Suat SARIDEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. T. N. VERMA, Maulana Azad National Institute of Technology Bhopal, India

Alan Editörleri (Section Editors)

Bilgisayar Mühendisliği ve Bilimleri

Dr. Öğr. Üyesi Enver KÜÇÜKKÜLAHLI, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Muhammet Sinan BAŞARSLAN, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Türkiye

Biyomedikal Mühendisliği

Prof. Dr. Ali AKPEK, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Prof. Dr. Murat KARABACAK, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Yunus BİÇEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Sait Eser KARLIK, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin BAKIR, Doğu Üniversitesi, Türkiye

Endüstri Mühendisliği

Doç. Dr. Melike ERDOĞAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Enerji Sistemleri Mühendisliği

Doç. Dr. Alper Ergün, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Zafer CİNGİZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

İmalat Mühendisliği

Doç. Dr. Engin NAS, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Şenol ŞİRİN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Erman ZURNACI, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye

İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık

Doç. Dr. Ümit YURT, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Halil YILMAZ, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Türkiye

Mekatronik Mühendisliği

Doç. Dr. Ferzan KATIRCIOĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Otomotiv Mühendisliği

Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Cüneyt UYSAL, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Murat Kadir YEŞİLYURT, Bozok Üniversitesi, Türkiye

Tarım ve Ormancılık

Prof. Dr. Akif KETEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Filiz Dursun, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Teknik Editörler

Öğr. Gör. Dr. Seymen ÇİFTÇİ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Arş. Gör. Beyzanur YAVUZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

GENEL BİLGİLER (GENERAL INFORMATION)

Yayıncı (Publisher)

Düzce Üniversitesi/Düzce University

Web Sayfası (Web Page)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/duted>

Cilt (Volume)

2

Sayı (Issue)

1

Yıl (Year)

2024

Basım Tarihi (Date of Publication)

Haziran 2024/June 2024

Yayın Dili (Language)

Türkçe ve İngilizce/Turkish and English

Yayın Periyodu (Publication Period)

Yılda iki kez yayımlanır/Published two times in a year

Yayın Türü (Type of Publication)

Sürekli Yayın/Periodical

e-ISSN

3023-591X

Yazışma Adresi (Correspondence Address)

Düzce Meslek Yüksekokulu, Uzunmustafa Mahallesi, 81010, Merkez/Düzce

+90 380 524 00 98






duted@duzce.edu.tr

İÇİNDEKİLER

Sayfa	Araştırma Makalesi (Research Article)
1-12	Electrical Wiring Design and Development Studies of a Communication Satellite Emre KESKİN, Onur KARA, Sabri ÖZBEK, Samet Emre AYDIN ve Serdar DEMİRDAĞ
13-23	Fındık Türlerinin Kabuklu Yapısı Üzerinden Sınıflandırılması İçin Yeni Bir Makine Tasarım ve İmalatı Rabia KAYMAK ve FERZAN KATIRCIOĞLU
24-35	BODIPY-Lipit Bileşiğinden Yeni Lipozomların Sentezi ve PDT Özelliklerinin Araştırılması Muhammed Emre ÖZLER, Yasemin BOZKURT ve Fazlı SÖZMEN
36-48	Defects Detection at Additive Manufacturing by Convolutional Deep Learning Reza LOTFINEJAD ve Asghar ZAJKANI
49-58	Neovius ve Schwarz-P Üçlü Periyodik Minimal Yüzey Yapılarının Mekanik Özelliklerinin Sayısal Analizi Mehmet Çağrı TÜZEMEN
	Derleme Makalesi (Review Article)
59-69	Yeni Mühendislik Ortamında Ahşap Oyma Teknolojisinin İncelenmesi Tuğba GÜRER
70-79	Türkiye Hidrojen Enerji Stratejilerinin ve Geliştirilen Politikaların Araştırılması Gülbahar BİLGİÇ TÜZEMEN

Research Article

Electrical Wiring Design and Development Studies of a Communication Satellite

 Emre Keskin*,  Onur Kara,  Sabri Özbek,  Samet Emre Aydın,  Serdar Demirdağ

TAI, Space System, System Engineering, Ankara, Türkiye.

* Corresponding Author: sarar103@yahoo.com

Article Info:

Received: 10/05/2024, Received in revised form: 21/05/2024, Accepted: 21/05/2024.

ABSTRACT

In this study, information about a harness subsystem, connects signals and electrical power with 25 km of wiring and 1100 connectors, which is designed and developed for the communication satellite consisting of communication module and service module is given. Harness 3 dimensional layout is developed in NX computer aided design software, providing key design features i.e., minimum bend radius, easy installation and stress relief. A variety of design solutions are implemented in order to achieve electromagnetic compatible electrical wiring interconnecting system. Possible electromagnetic interference sources such as wire-to-wire coupling, electromagnetic field-to-wire coupling and structural current-to-wire coupling are eliminated. The electrical interfaces are developed in three phases: avionics architecture, pin to pin and connectivity design. As intermediate connectors are implemented to harness to provide physical separation which support system level modular design approach, also safe/arm connectors and umbilical connectors are implemented to satisfy functional and operational needs. "On panel" and "in panel" type connector brackets are developed for plug and receptacle connector mating. Harness components are chosen based on thermal ambient conditions and wires are sized according to current derating requirements.

Keywords: *Electrical Interface Design, Electrical Wiring Harness Design, Satellite Technologies.*

Bir Haberleşme Uydusunun Elektriksel Kablolama Tasarım ve Geliştirme Çalışmaları

ÖZET

Bu çalışmada, haberleşme ve servis modülünden oluşan haberleşme uydusu için tasarlanıp geliştirilen, sinyal ve güç hatlarının bağlantısını sağlayan, 25 km uzunluğunda ve 1100 adet konnektöre sahip kablolama alt-sistemi ile ilgili bilgiler verilmiştir. 3-boyutlu kablolama rota tasarımı, minimum büküm yarı çapı, montaj kolaylığı ve konnektör çıkışlarında stressiz büküm gibi kritik tasarım çözümlerini sağlamak üzere NX bilgisayar destekli tasarım yazılımında gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik uyuma sahip bir elektriksel kablo bağlantı sistemi elde edebilmek için çeşitli tasarım çözümleri uygulanmıştır. Kablolar arası etkileşim, elektromanyetik alan-kablo etkileşimi ve yapı üzerindeki akım-kablo etkileşimi gibi elektromanyetik etkileşim sorunlarına karşı önlemler alınmıştır. Elektriksel arayüz tasarımı üç aşamada gerçekleştirilmiştir: aviyonik mimari, uçtan uca bağlantı ve bağlanabilirlik tasarımı. Sistem seviyesi modüler tasarımı desteklemek amacıyla kablolamayı fiziksel olarak ayıran arayüz konnektörleri kullanılmış olup, fonksiyonel ve operasyonel ihtiyaçları karşılamak üzere güvenli/ateşle konnektörü ve göbek-bağı konnektörü kullanılmıştır. Sabit ve hareketli konnektörlerin montajı için "panel üstü" ve

“panel içi” tipte konnektör braketleri geliştirilmiştir. Kablolama malzemelerinin seçimi çevresel sıcaklık koşullarına göre gerçekleştirilmiş ve kablolar akım azaltım isterlerine göre boyutlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Elektriksel Arayüz Tasarım, Elektriksel Kablolama Tasarım, Uydu Teknolojileri.*

I. INTRODUCTION

Harness Subsystem is also known as electrical wiring interconnect system (EWIS), an assembly of electrical cables, used to connect electronic components (avionics), control units, sensors and actuators. Cables and/or wires which transmit signals and electrical power are bundled together and fitted with electrical contacts that are inserted to electrical connectors (Trommnau et al., 2019). The size of harness and the multitude of the interconnection requirements of on-board avionics make EWIS a highly complex system (Zhul et al., 2017). Harness contains various components i.e., wires, connectors, backshells, contacts, cable ties, electromagnetic interference (EMI) braids to provide electrical interfaces during all mission phases of the spacecraft.

A harness subsystem, with 25 km of wiring and 1100 connectors, is designed and developed for the communication satellite. Mass of EWIS, which includes power cabling (25 %), data transfer cabling (55 %) and mechanical components and shielding (25 %), is generally about 10 % of the dry mass of a spacecraft (Amini et al., 2006). Thus, during the development, minimizing complexity followed as a natural approach, which is just as important as the minimization of mass and volume (Junge et al., 2014). In order to achieve these design goals, main requirements are selected from NASA-STD 8739.4A and IPC/WHMA-A-620E standards (IPC, 2022) (NASA, 2022).

The newly developed communication satellite has at least 15 years operational lifetime. It is designed for operation in the geostationary orbit. Spacecraft is based on fully electric propulsion, which will enable all solutions including satellite subsystem design, orbit rising, station acquisition, station keeping maneuvers and ground segment operations to be compatible with this technology.

In general, a satellite platform consists of a satellite bus and a payload. While payload is responsible for the mission aspect of the satellite, the bus controls the satellite and provides support to the payload (Reda et al., 2023). As expected, new developed satellite is formed by communication module (CM) containing payload operating in Ka-band and service module (SM) including flight avionics, i.e. power conditioning unit, power distribution unit, battery, on-board computer and reaction wheels. Four multi-feed array Ka-band reflectors are placed in the West and East panels of the satellite. Satellite platform includes following subsystems:

- Structure and Mechanism Subsystem,
- Thermal Control Subsystem,
- Attitude and Orbit Control Subsystem,
- Power Control Subsystem,
- Electrical Propulsion Subsystem,
- On Board Data Handling Subsystem,
- Payload,
- Telemetry Command and Ranging Subsystem,
- Harness Subsystem.

II. LAYOUT DESIGN

Harness layout design also called as routing mainly relies on human experience and engineering constrains (Zhao et al., 2021). The most important initial step of EWIS routing design is to establish the design space (Gwozdecky, 2020). A 3 dimensional (3D) computer aided design (CAD) model of bundles is created in Siemens NX CAD software to maintain space allocation while integrating following key design features:

- Minimum bend radius of wires,
- Stress on bundles during installation,
- Stress relief on connectors,

- Electromagnetic compatibility (EMC) restrictions.

Figure 1 shows the 3D CAD model of the EWIS.

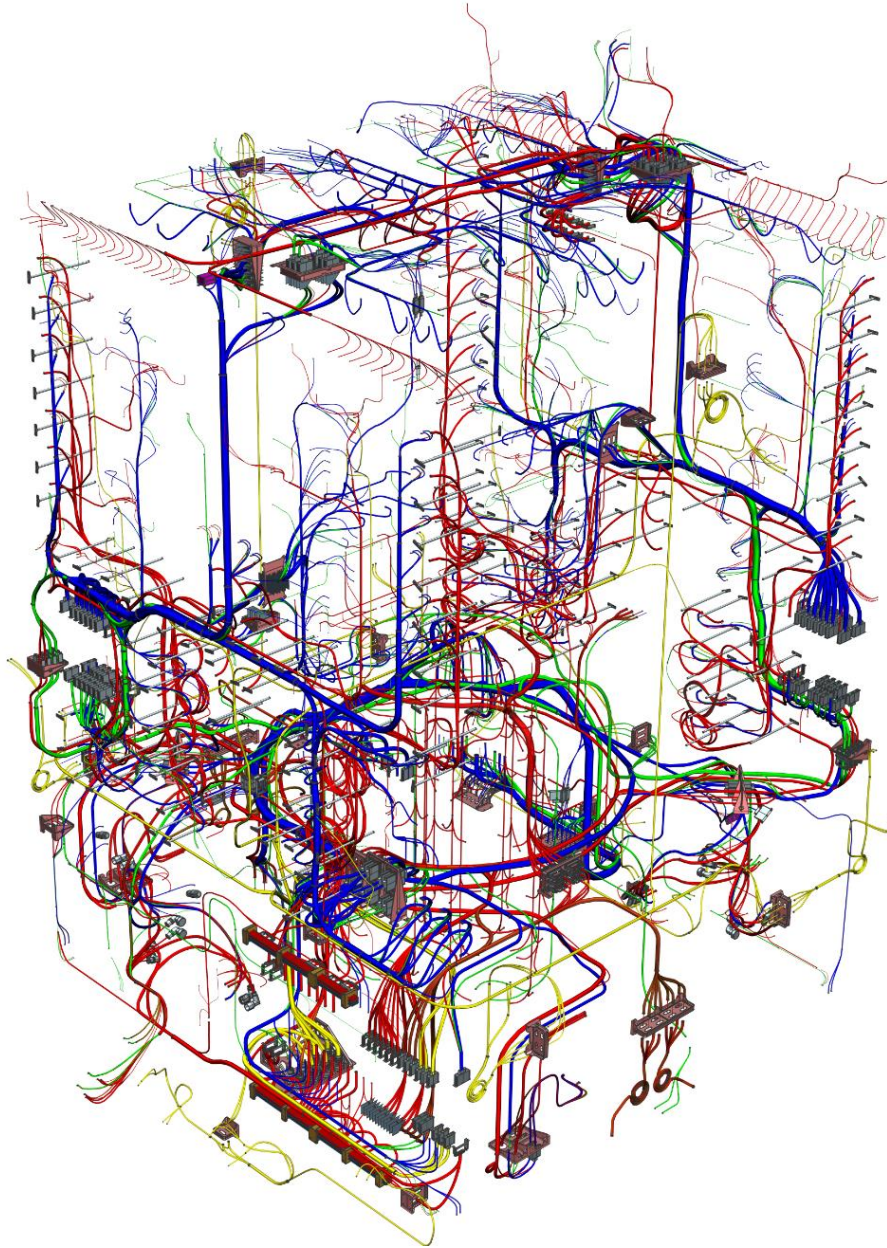


Figure 1. 3D CAD model of EWIS.

Due to absence of American wire gauge (AWG) 10 and smaller wires and coax cables inside wire bundles, the bend radius of bundles is limited to $3x$ (NASA, 2022). The automatic design features of NX CAD software are used during the development process to control bending of the bundles. In Figure 2, an example showing a proper bend radius practice of a cabled bundle is provided.

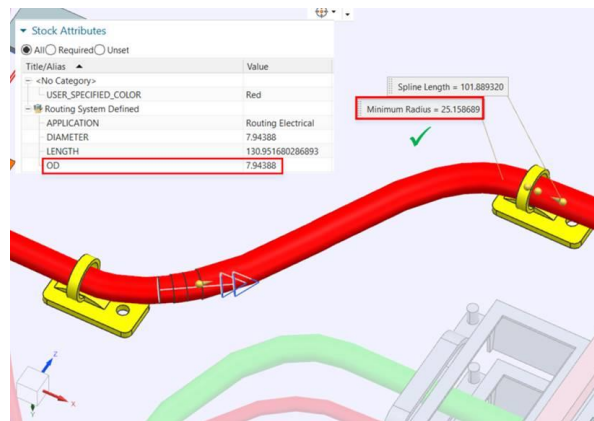


Figure 2. 3D CAD model of proper bend radius practice of a bundle.

In order to provide easy manufacturing, installation and integration in-line with modular design of the platform, harness is physically separated to CM and SM harnesses. Payload interface units, located on North and South CM panels, and intermediate connectors are used to connect CM harness to SM harness.

In contrast to traditional harness routing approach in SM, anti-earth deck is not used for harness routing and kept empty to maintain connector mating/de-mating operations during assembly, integration and test (AIT). As accessibility to connectors are analyzed in NX CAD software with a human model, no difficulty is foreseen for integration operations. Figure 3 shows the accessibility simulation performed in 3D CAD model.

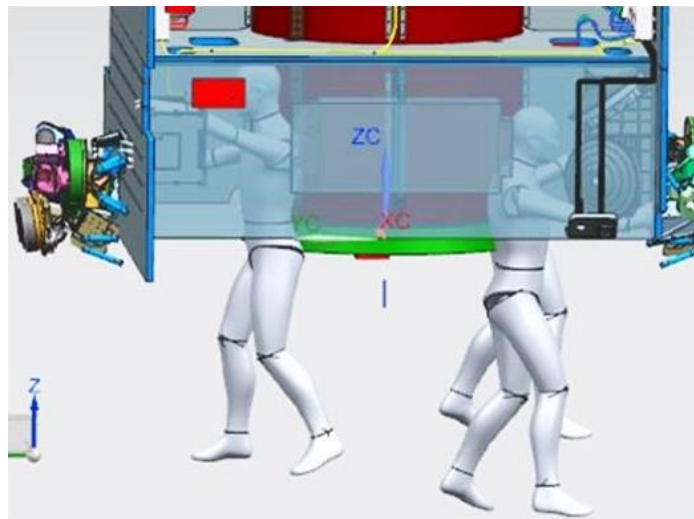


Figure 3. 3D CAD model of harness accessibility simulation.

Satellite is subjected to mechanical loads during various stages of the launch, i.e., static loads, dynamic loads and mechanical shocks (Reda et al., 2023). Harness is designed to withstand the mechanical loads that occur during launch. Bundles are fixed to structural panels with aluminum tie-bases with a maximum distance of 150 mm between each installation point.

Stress relief is the portion formed of a conductor providing sufficient length to minimize stress between terminations (NASA, 2022). Provision is made during routing design in order to provide sufficient stress relief for wires entering connectors from bundles. Each bundle layout is organized with smooth bends and sufficient stress relief such as in Figure 4 (NASA, 2002). In Figure 5, an example is provided which shows a proper design practice of a 3D routing of stress relief on back of the connectors.



Figure 4. Proper practice of stress relief.

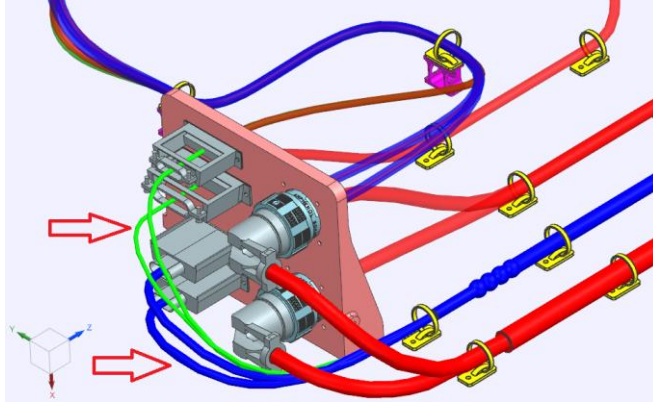


Figure 5. 3D CAD model of proper stress relief design practice of bundles.

Wires are bundled and routed respect to EMC categories of the electrical interfaces. In CAD model, different colors are used to clearly indicate EMC class of the bundles as defined in Table 1.

Table 1. Circuit type and colors used in CAD of the EMC categories.

EMC Category	Colors used in CAD model	Circuit Type
I	Red	Power Circuits
II	Blue	Digital Signals
III	Green	Analogue and Low Level Signals
IV	Yellow	Pyro Signals
V	Light Blue	RF Signals
VI	Pink	High Speed Signals

III. EMC DESIGN

EMC is one of the key design parameter for harness subsystem as EMI can be generated due to factors either created by satellite subsystems itself or generated by environmental factors such as launch vehicle or geostationary orbits electromagnetic environment. The possible EMI coupling sources can be wire-to-wire coupling, electromagnetic (EM) field-to-wire coupling and structural current-to-wire coupling (Dayashankara et al., 1997).

The reduction in wire-to-wire coupling can be achieved by proper choice of wires (shielded/unshielded) and by segregation of the wires according to EMC classes. Twisted cables are used for all power and signal circuits since inductive coupling is reduced by twisting the circuit with its return (Dayashankara et al., 1997). Based on electrical properties of the interfaces, bundles are categorized to different categories as listed in Table 1 (Air Force Space Command, 2009). Wires belonging to the same category are bundled together. Each bundle of different category is isolated from other bundles by maintaining a minimum separation of 30 mm distance (Air Force Space Command, 2009). In cases where this requirement is not practical due to insufficient free spacing, additional shielding is applied to prevent possible EM fields.

Based on the electrical properties of the interfaces, individually shielded cables or pre-woven overall shielding is used in EMI sensitive interfaces, as shielding reduces capacitive coupling (Dayashankara et

al., 1997). As shielding provide metallic enclosure, the weak point of Faraday cage is the connection of shield to chassis ground at connectors. Different shield connection methods are outlined in a handbook of the European Space Agency. Handbook indicates that shielding connection at both ends of shields rejects external interference and improper pigtail connections creates weak point for shielding (ECSS, 2012). Thus, all shielding is connected to ground at both ends.

By Arthur T. Bradley and Richard J. Hare, the effectiveness of various shield termination techniques are evaluated under two different noise injection methods; transverse electromagnetic (TEM) at 3 MHz – 400 MHz and bulk current injection (BCI) at 50kHz – 400 MHz. The 5 samples which contain shielded cables are tested under TEM and BCI, which are shown in Figure 6. The results presented in Table 2 show that all type of 360 terminations provide nearly identical shielding properties except the pigtail method (Bradley and Hare, 2009). The EMI backshell method is employed for cable to shield termination within new developed harness, considering that backshells also provide mechanical endurance during connector mating/de-mating operations. Details of method used in EWIS are presented in Figure 7 (Bradley and Hare, 2009).

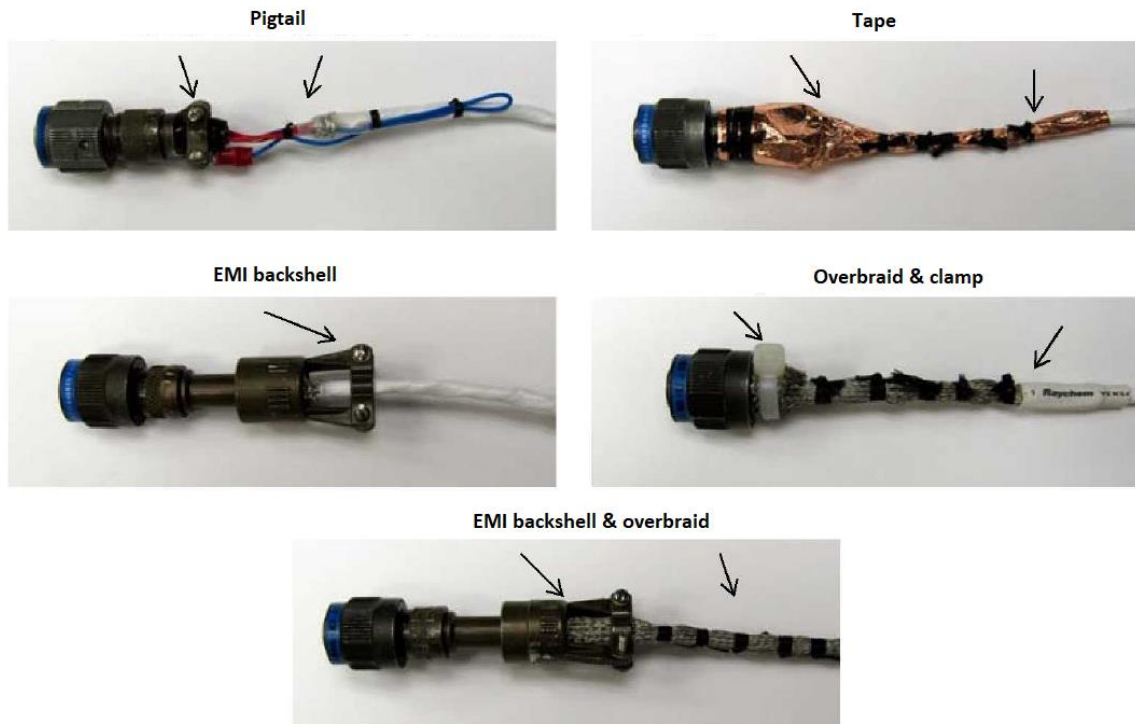


Figure 6. Tested different shield termination techniques.

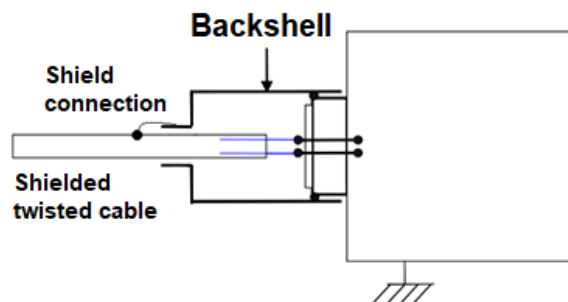


Figure 7. EMI Backshell shield termination technique.

Table 2. Test results of shield termination techniques.

Termination type	TEM (dB)	BCI (dB)
Pigtail	-7.10	1.26
EMI Backshell	-24.58	-17.68
EMI Backshell & overbraid	-25.31	-17.68
Overbraid & clamp	-24.47	-17.98
Tape	-24.24	-17.68

As Dayashankara and Hariharans (Dayashankara et al., 1997) EM field-to-wire coupling analysis shows, minimization of wire spacing or height above wires and ground plane leads to reduction of coupled voltage. Thus, all wires routed as close as possible to mechanical panels if no obstacle is present on the path.

A structural current caused by electrostatic discharge (ESD) may couple energy through cables exposed to space environment and entering into the interior of the satellite (Dayashankara et al., 1997). In order to avoid ESD risks, all wires routed outside of the satellite are protected with overall braid. When these bundles enter into the satellite, overall braid is connected to chassis ground.

IV. ELECTRICAL INTERFACE DESIGN

The electrical interfaces are developed in three phases: avionics architecture, pin to pin and connectivity design. Figure 8 shows electrical interface design flow chart followed during the EWIS design and development.

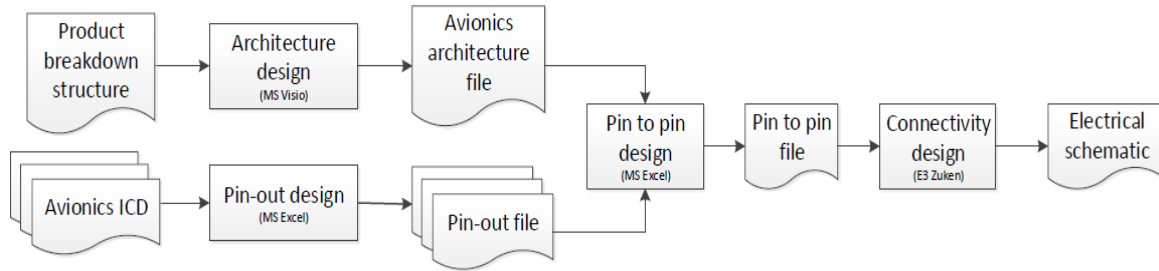


Figure 8. Electrical interface design flow chart.

As the type and number of avionics for each subsystem in product breakdown structure (PBS) are defined, an architecture design is done to create an avionics architecture file which defines electrical interfaces at very high level to show connection philosophy of the satellite. In the meantime, each avionics interface control document (ICD) is examined to perform the pin-out design. With this study, cable type, bundle category and definition of each electrical interface is defined in pin-out file including EMC category and cable type features. Table 3 lists the main electrical interfaces used in the satellite.

Table 3. Some of main electrical interfaces.

Signal Type	Description	EMC Category	Cable Type
PWR	Power	I	Twisted pair
BDM	Bi-level discrete status and telemetry monitoring	II	Twisted pair
HPC	High power pulse	II	Twisted shielded pair
1553	1553 Bus	II	Twisted shielded balanced pair
ASM	Analogue signal monitor	III	Twisted pair
TSM	Temperature sensor	III	Twisted pair
PYR	Pyrotechnic signals	IV	Twisted double shielded pair
RF	Radio frequency	V	Coax
SPW	Spacewire network	VI	Spacewire

With the study combining avionics architecture file and pin out files, pin to pin design is done and a complete pin to pin file that includes approximately 15000-line data with the following information is created:

- Signal – Name, type, description,
- Origin – Unit signal, subsystem, unit, module, in/out, from connector, from contact, connector type,
- Cable – AWG, shield, twist,
- Destination – Unit signal, subsystem, unit, module, in/out, from connector, from contact, connector type.

While this file contains all information regarding connection of the electrical interfaces, details belongs to manufacturability, i.e. harness definition, cable definition, connector definition are missing. Therefore, in order to define all connection details in schematics, connectivity design is shaped in E3 Zuken software. An example connectivity schematic is shown in Figure 9.

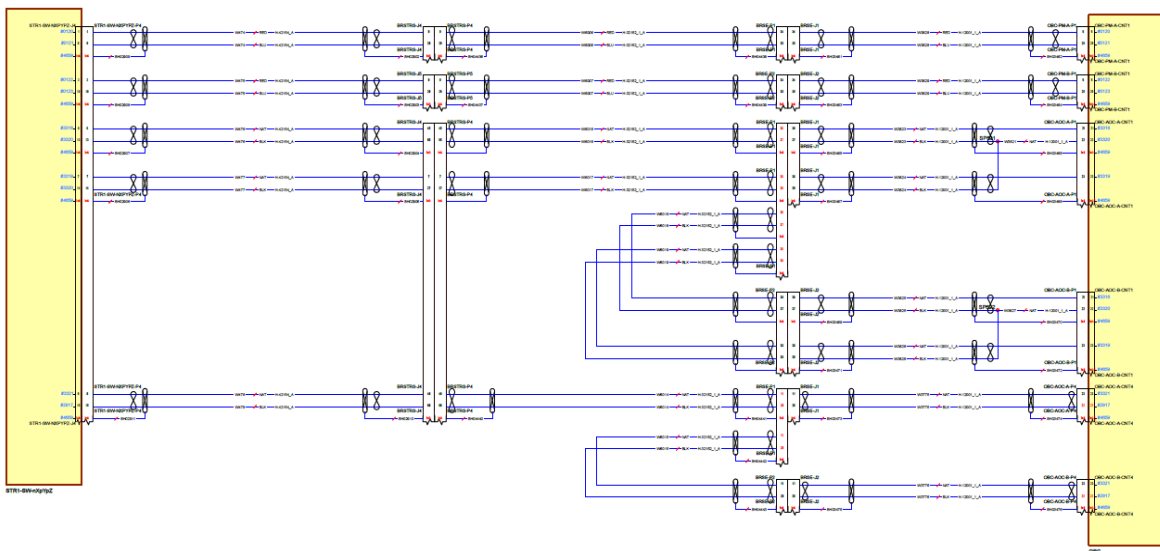


Figure 9. Example connectivity schematic from E3 Zuken software.

A. Intermediate Connectors

The intermediate connectors are implemented to harness to provide physical separation which support system level modular design approach. The “on panel” and “in panel” type interface brackets shown in Figure 10 are designed to provide mating plane for plug and receptacle type connectors. Functionally, following 5 different type interface connectors are used in the satellite:

- SM-CM Interface Connectors:
Physically separates SM and CM harnesses. After the integration of the CM to SM, electrical interfaces are finalized via SM-CM interface connector.
- CM-Earth Panel Interface Connectors:
Physically separates harnesses on Earth Panel. After the integration of Earth Panel, electrical interfaces are finalized via CM-Earth Panel interface connectors.
- Battery Interface Connectors:
Provides physical separation and test functions for battery electrical interfaces. After the integration of North and West SM panels, where batteries are located, electrical interfaces are finalized via battery separation connectors.
- Thermal Interface Connectors:
Provides physical separation of thermal components (heaters and thermistors) from main harness. After the integration of dedicated panel, electrical interfaces are finalized via thermal interface connectors.

- **Test Connectors:**
Provide test interfaces for on-board computer and electrical propulsion subsystem. After the integration of all satellite panels, test activities are carried out via these connectors located on the exterior surface of the satellite.

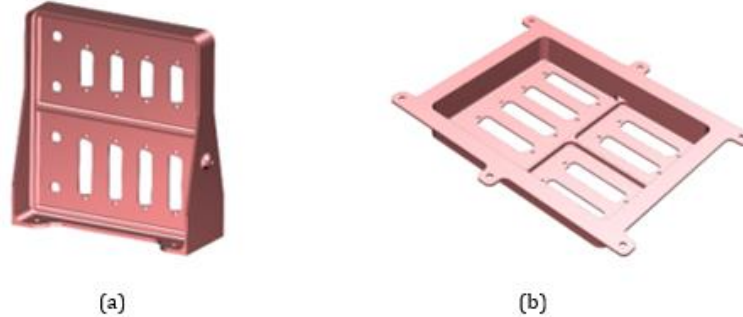


Figure 10. a) "on panel" type interface connector bracket, b) "in panel" type interface connector bracket.

B. Safe/Arm Connectors

The new developed satellite includes the electro-explosive devices (EEDs) used in solar panels, payload reflectors and electrical thrusters. According to the requirements defined in ECSS-E-ST-33-11C, the electrical interfaces of these devices are designed to prevent any unwanted firing during AIT operations (ECSS, 2017). Firing signals between driver unit and EEDs are physically separated by connectors which provide safe/arm functions. For connector mating, an interface bracket of "in panel" type is used.

- **Arm Receptacle:**
Physically separates and isolates EED electrical interfaces. It is located on the exterior surface of the satellite.
- **Arm Plug:**
Electrically connects driver and EED circuits when connected to arm receptacle. It is installed only just prior to launch operations of the satellite.
- **Safe Plug:**
When connected to arm receptacle, grounds driver and EED circuits. It is installed during AIT operations and replaced by the arm plug just prior to the launch.
- **Test Plug:**
When connected to arm receptacle, provides electrical connection between electrical ground support equipment and firing circuits. It is installed and used during the tests of EEDs.

C. Umbilical Connectors

Harness provides electrical interfaces between spacecraft and the launch vehicle via redundant umbilical connectors located on the anti-earth deck of the satellite. Umbilical connectors are equipped with ESCC 3401/008 push-pull type circular receptacles to provide high reliable disconnection during satellite separation.

V. THERMAL DESIGN

Thermal design of EWIS is based on two major design criteria i.e., component selection and current derating of the wires. Thermal control subsystem (TCS) comprises active and passive control elements to maintain the satellite components and structures including harness within a controlled temperature range (Sozbir et al., 2008). Satellite TCS assures a temperature limit from -30° C minimum to 45° C maximum inside the satellite. The thermal properties of each harness component, main ones defined below, are easily meeting ambient temperature limits.

- Connectors : -55° C /+120° C
- Backshell : -55° C /+120° C

- Wires/cables : -200° C /+200° C

Bundles routed outside the satellite are protected by multilayer insulation heat shield and wrapped with Kapton tape as an additional thermal protection layer.

ESCC No.3901/025 and ESCC No.3901/019 type wires are used in the satellite for power and signal wiring (ESCC, 2012) (ESCC, 2013). According to European Space Components Coordination (ESCC), allowable rated maximum current values (I_{max}) for different gauge wires are listed in Table 4.

Table 4. Maximum current rating for different wire gauges.

I_{max} (A)	Wire Gauge
1,5	28
2,5	26
3,5	24
5	22
7,5	20
13	16

Maximum allowable current for each wire is derated according to ESCC standards to prevent exceeding wire temperature limits due to resistive heat dissipation within the wires or wire bundles (Rickman and Iannello, 2016). As the wires of type ESCC No.3901/025 and ESCC No.3901/019 are used in design, derating rules defined in these specifications are applied. Maximum current for each wire used in a bundle is calculated with Eq.1 or Eq.2 (ESCC, 2012) (ESCC, 2013).

$$I_{Bmax} = I_{max} \times \frac{29-n}{28} \text{ (for } 1 < n < 15) \tag{1}$$

$$I_{Bmax} = \frac{I_{max}}{2} \text{ (for } n > 15) \tag{2}$$

The current flowing through the wires in a vacuum environment, according to ESCC specifications, generates a temperature rise (T_{rise}) of approximately 50 °C above ambient temperature (ESCC, 2012).

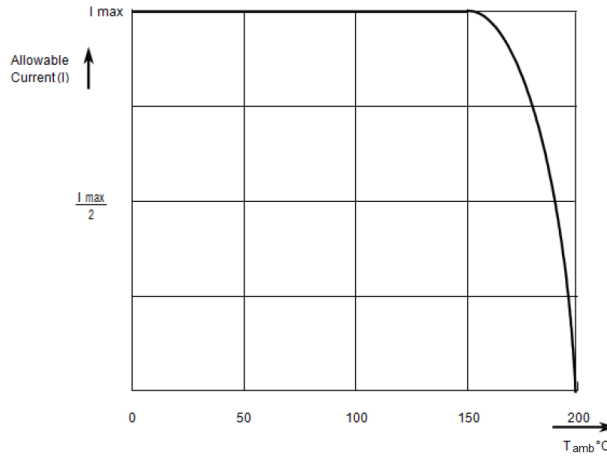


Figure 11. Allowable current versus temperature.

The corresponding graph given in Figure 11 shows that at ambient temperatures (T_{amb}) higher than 150 °C allowable maximum current (I_{max}) shall be reduced.

$$T_{wire} = T_{amb} + T_{rise} \tag{3}$$

Since total temperature (continuous operating temperature) of the wire calculated by Eq.3 in the satellite is below 150° C, no additional precaution taken to reduce allowable current (I_{max}).

Although bundle derating is performed according to the detailed specifications of the ESCC, the difference in derating rules is significant between the agencies i.e., National Aeronautics and Space Administration, Japan Aerospace Exploration Agency and European Space Agency because specifications are based on their own analyzes or test results. The ESCC standards are conservative in comparison to other international standards (Van Benthem et al., 2015). Therefore, an optimization for derating calculations is considered as a future study in the project which could lead to save a significant mass of

both the harness and connectors and facilitate spacecraft integration with smaller diameters and lower bend radius wiring (Van Benthem et al., 2015).

VI. CONCLUSIONS

Harness design is one of the most challenging phase of the satellite development due to the high complexity of EWIS with mass and volume optimization requirements. This article attempted to present a general view of harness design practices followed during a telecommunication satellite project answering both functional and operational needs. Based on the experience gained during the project, layout, EMC, electrical interface and thermal design of EWIS are explained.

Presently, project has completed its critical design review milestone. Future studies i.e., production drawings, bill of materials and integration procedures are not a part of the paper.

ACKNOWLEDGEMENT

We would like to express our sincerest gratitude to Turkish Aerospace Industries, Inc.

REFERENCES

- Air Force Space Command. (2009). Space and Missile Systems Center Standard, Technical Requirements for Wiring Harness, Space Vehicle. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA633334>.
- Amini, R., Aalbers, G., Hamann, R., Jongkind, W., and Beethuizen, P. G. (2006). New Generations of Spacecraft Data Handling Systems: Less Harness, More Reliability. *57th International Astronautical Congress*, Valenica, Spain, 1-8.
- Bradley, A. T., and Hare, R. J. (2009). Effectiveness of Shield Termination Techniques Tested with TEM Cell and Bulk Current Injection. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Austin, USA.
- Dayashankara, K. S., Hariharan, V. K., Rao, M. N., Rajan, G. V. C., and Bokil, A. A. (1997). EMC Considerations in Spacecraft Harness Design. *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Beijing, China, 239-242.
- ECSS. (2012). ECSS-E-HB-20-07A, Space Engineering: Electromagnetic Compatibility Handbook. [Online]. Available: <https://ecss.nl/hbstms/ecss-e-hb-20-07a-electromagnetic-compatibility-handbook-5-september-2012/>.
- ECSS. (2017). ECSS-E-ST-33-11C Rev.1-Explosive Subsystems and Devices Standard. [Online]. Available: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-33-11c-rev-1-explosive-subsystems-and-devices/>.
- ESCC. (2013). Detailed Specification No. 3901/019, Polyimide Insulated Wires and Cables, Low Frequency, 600V, -200 to +200°C Based on Type SPL. [Online]. Available: <http://escies.org/escs-specs/published/3901019.pdf>.
- ESCC. (2012). Detailed Specification No. 3901/025, Lightweight, Extra Thin, Fluorthermoplastic / Polyimide Insulated Wires and Cables, Low Frequency, 600V, -200 to +200 °C Based on Type CSC. [Online]. Available: <http://escies.org/escs-specs/published/3901025.pdf>.
- Gwozdecky, K. (2020). Wiring Harness Design Methodologies and Assembly Integration and Test for a Modular Microsatellite Platform. *Master of Applied Science, Graduate Department of Institute for Aerospace Studies*, University of Toronto, Italy.
- IPC. (2022). IPC/WHMA-A-620-Revision E-Standard Only: Requirements and Acceptance for Cable and Wire Harness Assemblies. [Online]. Available: <https://shop.ipc.org/ipcwhma-a-620/ipcwhma-a-620-standard-only/Revision-e/english>.
- Junge, A., Wolf, J., Mora, N., Rachidi, F., and Pelissou, P. (2014). Electromagnetic Interference Control Techniques for Spacecraft Harness. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japanese, 840-843.
- NASA. (2002). Nasa Workmanship Standards, Picture of preferred discrete wire harnesses, book:4, section:4.01, page:2. [Online]. Available: <https://workmanship.nasa.gov/lib/insp/2%20books/links/sections/files/401.pdf>.
- NASA. (2022). Technical Standard NASA-STD 8739.4A, Workmanship Standard for Crimping, Interconnecting Cables, Harnesses, and Wiring. [Online]. Available: <https://standards.nasa.gov/standard/NASA/NASA-STD-87394>.
- Reda, R., Ahmed, Y., Magdy, I., Nabil, H., Khamis, M., Refaey, A., Eldabaa, N., Elmagd, M. A., Lila, M. A., Ergawy, H., Elgarf, H., and Abed, G. (2023). Basic Principles and Mechanical Considerations of Satellites: A Short Review. *Transactions on Aerospace Research*, 272(3), 32-54.
- Rickman, S. L., Iannello, C. J. (2016). Heat Transfer Analysis in Wire Bundles for Aerospace Vehicles. *14th International Conference on Simulation and Experiments in Heat Transfer and its Applications*, Ancona, IT.
- Sozbir, N., Bulut, M., Oktem, M. F., Kahrman, A., and Chaix, A. (2008). Design of Thermal Control Subsystem for TUSAT Telecommunication Satellite. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Systems Engineering*, 2(7), 1370-1373.

- Trommnau, J., Kühnle, J., Siegert, J., Inderka, R., and Bauernhansl, T. (2019). Overview of the State of the Art in the Production Process of Automotive Wire Harnesses, Current Research and Future Trends. *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Ljubljana, Slovenia, 387-392.
- Van Benthem, R. C., Doctor, F., Malagoli, M., and Bonnafous, B. (2015). Derating Standards and Thermal Modelling Tools for Space Harness Designs. *45th International Conference on Environmental Systems*, Bellevue, Washington, 1-8.
- Zhao, Y., Liu, J., Ma, J., and Wu, L. (2021). Multi.Branch Cable Harness Layout Design Based on Genetic Algorithm with Probabilistic Roadmap Method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33(34), 1-11.
- Zhu1, Z., La Rocca1, G., and Van Tooren, M. J. L. (2017). A Methodology to Enable Automatic 3D Routing of Aircraft Electrical Wiring Interconnection System. *CEAS Air & Space Conference*, Delft, Netherlands, 287-302.

Araştırma Makalesi

Fındık Türlerinin Kabuklu Yapısı Üzerinden Sınıflandırılması İçin Yeni Bir Makine Tasarım ve İmalatı

 **Rabia Kaymak^{a,*}**,  **Ferzan Katırcıoğlu^b**

^aDüzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.

^bDüzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.

* Sorumlu Yazar: rabiakaymak22@gmail.com

Makale Bilgileri:

Geliş: 24/04/2024, Revizyon: 27/05/2024, Kabul: 03/06/2024.

ÖZET

Fındık dünya genelinde üretimi ve tüketimi oldukça fazla olan besin maddelerindedir. Fındık meyvesinin endüstrideki kullanım alanı oldukça geniştir. Fındığın büyük bir oranı çikolata, bisküvi, tatlı, dondurma ve şekerleme imalatında kullanılmaktadır. Fındık aynı zamanda fındık ezmesi şeklinde de satışa sunulmaktadır. İhracatta kullanılmayacak durumda olan fındıklar ise yağlık olarak kullanılmaktadır. Ayrıca başka ürünler içerisinde yan ürün olmadan çerez olarak da tüketilmektedir. Fındık türleri, iç oranı, protein, ham selüloz, oleik asit gibi değer parametreleri yönünden ve K, P, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu ve Zn mineralleri açısından, türler arasında değişkenlik göstermektedir. Besin değerlerine göre endüstriyel alanlara uygun fındık cinslerinin tercih edilmesi, üretilen ürünün kalitesinin artırılabilceği düşünülmektedir. Ayrıca endüstriyel ortamlarda fındıkların cinsine göre sınıflandırılma yapılmadığı, yalnızca kırık, dolu, boş, çürük, delik gibi özelliklerine bakıldığı görülmüştür. Bu çalışmada fındıklar sahip oldukları yağ, protein, mineral gibi değerlerine göre, uygun kullanım alanlarında kullanılmak üzere cinsine göre kabuktan sınıflandırma işlemi yapılması amaçlanmaktadır. Fındık türlerini kabuktan sınıflandırmak için görüntü işleme tabanlı sınıflandırma makinası tasarımı ve imalatı önerilmektedir. Benzerlerinden farklı olarak, konveyör üzerinde her bir fındık görüntüsü alınıp, konveyör sonunda vakumlu ayırma işlemi yapılmaktadır. Vakumlu sınıflandırma işlemi de vakum yollarının açma-kapama mantığı ile özgünlük sağlamaktadır. Cihaz ile bütünleşik bir bilgisayarda Matlab GUI yazılımı ile kontrol ve sınıflandırma karar sistemi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Fındık Türleri, Makine Tasarımı, Vakumlu Ayırıcı.*

Design and Manufacturing of A New Machine for Classification of Hazelnut Species Based on Their Shell Structure

ABSTRACT

Hazelnuts are one of the foods that are produced and consumed in high amounts throughout the world. Hazelnut fruit has a wide range of uses in industry. A large proportion of hazelnuts are used in the production of chocolate, biscuits, desserts, ice cream and confectionery. Hazelnuts are also sold in the form of hazelnut paste. Hazelnuts that cannot be used for export are used as oil. It is also consumed as a snack in other products without any by-products. Hazelnut species vary among species in terms of value parameters such as kernel ratio, protein, crude cellulose, oleic acid and minerals such as K, P, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu and Zn. It is thought that choosing hazelnut types suitable for industrial areas according to their

nutritional values can increase the quality of the produced product. In addition, it has been observed that in industrial environments, hazelnuts are not classified according to their type, only their characteristics such as broken, full, empty, rotten and holes are examined. In this study, it is aimed to classify hazelnuts according to their values such as oil, protein and minerals, according to their type and shell to be used in appropriate areas of use. The design and manufacturing of an image processing-based classification machine is recommended to classify hazelnut species from the shell. Unlike its counterparts, each hazelnut is imaged on the conveyor and vacuum separation is performed at the end of the conveyor. The vacuum classification process also provides originality with the on-off logic of the vacuum paths. The control and classification decision system was implemented with Matlab GUI software on a computer integrated with the device.

Keywords: *Hazelnut Types, Machine Design, Vacuum Separator.*

I. Giriş

Fındık dünya genelinde üretimi ve tüketimi oldukça fazla olan ve insan yaşamında oldukça önemli bir yeri olan besin maddelerindedir. 100 g fındıkta 634 kalorilik enerji bulunmaktadır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Fındık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü; Savran, 2023). Organik asit olarak en çok oleik asit bulunmaktadır (Özdemir ve diğ., 1998). İç fındığın protein içeriği %10 ile %24 arasında değişiklik göstermektedir. 100 g iç fındıkta bulunan protein miktarı bir insanın günlük ihtiyacı olan protein miktarının %22'sini karşılamaktadır. Selülozik bileşiklerin oranı ise %1-3 civarındadır. İçeriğinde bulunan Fe, Mg, Cu, Mn, K, P, Zn ve Ca mineralleri açısından da zengindir. Fındık yağı içerisinde bulunan E vitamini açısından diğer bitkisel yağlardan sonra en iyi ikinci kaynaktır. 100 g fındık, günlük E vitamini ihtiyacının %24'ünü karşılayabilmektedir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Fındık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü; Savran, 2023) Fındık çeşitlerine ait değer parametreleri Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Bazı fındık çeşitlerine ait değer parametreleri bulunmaktadır (Özdemir ve diğ., 1998)

Çeşitler	İç Oranı (%)	Protein (%)	Ham Selüloz (%)	Yağ (%)	Oleik Asit (%)18:1	K (mg/kg)	P (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Tombul	54,6	16,13	3,59	62,8	74,5881	6651	3453	1926	1712	51,6	30,9	33	24,7
İkiz	51,9	18,48	2,96	61,9	70,8527	6626	3346	183	1680	67,2	30,7	34,4	24,7
Sivri	53,8	17,67	3,39	62,7	72,2891	5875	3307	1830	1637	52,8	32,3	29,1	25,5
Palaz	53,7	16,98	3,06	63,3	73,0672	6219	3034	1751	1728	54,3	37,7	28,8	25
Geç	54,8	16,62	3,68	61,7	70,4201	6387	3072	1566	1727	94,6	40,2	22,5	29,5
G. Karası	54,3	13,45	2,67	66,5	72,5928	5559	2973	1634	1708	38,6	33,6	23,8	23,8
Yağlı	54,8	15,36	2,33	66,2	65,7887	6138	3472	2323	1728	46,3	35,5	30,5	27,5

İçeriğinde bulunan kimyasal bileşenlerden ötürü sağlıklı beslenme açısından bu meyvenin önemi büyüktür. Fındık kalp ve damar sistemini olumlu yönde etkilemekle birlikte kolesterol yükselmesini engelleyerek kalp ve damar hastalıklarına karşı koruyucu etki oluşturmaktadır. (Acıbadem Hastanesi 2022). Fındık, bademden sonra dünyada yetiştiriciliği en yaygın yapılan sert kabuklu meyve konumundadır. Dünya'da özellikle 36-41 kuzey enlemlerinde uygun iklim koşullarında yetiştirilebilen fındığın üretiminde önemli yeri olan başlıca ülkeler Türkiye, İtalya, İspanya ve ABD'dir (Aktaş ve diğ., 2016). Dünya fındık üretimi, 1960'lı yıllarda yaklaşık 250 bin ton iken son yıllarda 1 milyon tonu geçmiştir. Dünya fındık üretiminin yaklaşık %62'sini gerçekleştiren Türkiye'yi sırasıyla İtalya, Gürcistan ve Azerbaycan takip etmektedir. Dünyada son 5 yılda gerçekleştirilen fındık ve mamulleri ihracatına konu olan ürünlerin kabuklu fındık olarak karşılığı ortalama 742 bin ton olup bunun %72'si ülkemiz tarafından gerçekleştirilmektedir (Toprak mahsulleri Ofisi Genel Müdürlüğü, 2021). Fındık meyvesinin endüstrideki kullanım alanı oldukça geniştir. Fındığın %80'i çikolata sanayiinde bisküvi, tatlı pasta, dondurma ve şekerleme imalatında kullanılmaktadır. Çikolatalı ürünlerin temel unsuru fındık unudur. Fındık aynı zamanda fındık ezmesi şeklinde de satışa sunulmaktadır. İç piyasada ya da ihracatta kullanılmayacak durumda olan fındıklar yağlık olarak kullanılmaktadır. Rafine edilerek yemeklik yağlarda, temizleyici/

nemlendirici ürünlerde, gres yağı üretiminde, ilaç ve kozmetik endüstrisinde, el ve lastik eldivenlerin dezenfeksiyonunda, sanayide yüzey aktif maddesi/ yağlama/ metal kesme yağları/ metal temizleme işlemlerinde, sağlık sektöründe yaraların pansumanı ya da bazı hastalıklarda antiseptik olarak fındık ham yağı kullanılmaktadır. Yağı çıkarıldıktan sonra elde kalan küspe hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak başka ürünler içerisinde yan ürün olmadan çerez olarak da tüketilmektedir. Fındık içi alındıktan sonra fındık kabuğu bazı yörelerde yakacak olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda boya sanayiinde de kullanılabilir. En son elde kalan fındık yaprakları da tabii gübre olarak fındık bahçelerine ya da tarım alanlarına geri gönderilir (Giresun Ziraat Odası, 2022). Türkiye’de fındık hasadının yapılmasının ardından fındıkları ayrıştırmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi patoza vermedir. Kabuklu fındıklar içerisinde boş ve hasarlı olanlar el ile ayrıştırıldıktan sonra fındık içinin doluluk oranına göre randımanı belirlenerek endüstriyel ortamda işleme alınmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Fındık Meyvesi Hasat Süreci



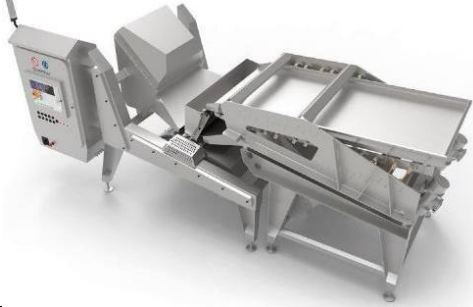



Mevcut durum göz önünde bulundurulduğunda fındıkların endüstriyel ortama sürülmeden ya da ihrac aşamasına geçilmeden hemen önce yani henüz hasat işlemi sona ermeden, cinslerine göre sınıflandırma işlemi yapabilecek makine imalatı çalışmasının yapılması gerekli görülmüştür. Bu çalışma sayesinde fındıklar sahip oldukları yağ, protein, mineral gibi değerlerine bakılarak uygun kullanım alanlarında kullanılmak üzere cinsine göre sınıflandırılacaklardır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Fındık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü; Savran, 2010). Yapılan bu sınıflandırma işlemi gerçekleştirildiği takdirde ihrac pazarında ya da iç pazarda kullanım alanlarına göre daha kaliteli içeriğe sahip ürünler elde edilebilir, mineral ve yağ değerleri daha düşük olan fındık cinsleri alt endüstriyel alanlarda kullanılarak değerlendirilebilir. Söz konusu olan sınıflandırma işlemi yapabilecek makine tasarımı ve imalatı ile ilgili dünya genelinde yapılan literatür taraması sonucunda;

Yapılan çalışmada hazneden boşaltılan fındık içlerinin metal plakaya çarptıklarında çıkarttığı sesleri darbe akustik sinyali ile işleyebilecekleri bir sistem tasarımı geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri sistem modelinde fındık içlerini boş-gelişmemiş, kabuğu çatlamış-tam gelişmiş ve normal kabuklu-tam gelişmiş olmak üzere 3 grupta sınıflandırmayı başarmışlardır (Kalkan ve Yardimci, 2006). Başka bir çalışmada fındık boyutlandırmaya yönelik makine imalatı geliştirmişlerdir. Çalışmalarında yatay bantlı konveyör sistemi tasarlamış olup fındıkları büyük, orta ve küçük olmak üzere 3 gruba ayırmışlardır. Çalışmalarında yalnızca makine ile boyut sınıflandırması yapmışlardır (Kermani ve Koorvand, 2016). Bir diğer çalışmada ürün kalitesini arttırmak ve raf ömrünü uzatabilmek adına fındıkları sınıflandırabilecekleri makine imalatı geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada hazneden aşağı doğru bırakılan fındıklar çelik malzemeden imal edilmiş döner bir diske çarparak belirli bir tonda ses üretmektedir. Üretilen bu ses bir mikrofon aracılığıyla kayda alınıp daha sonra Matlab programında Yapay Sinir Ağları kullanılarak analiz edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda fındıkların diske çarptıklarında çıkardıkları seslerden yola çıkarak fındıkların boyutlarına ve boş-dolu olma durumlarına göre sınıflandırmışlardır (Farhadi ve diğ., 2020). Başka bir çalışmada boş fındıkları tespit edebilmek için oluşturulan prototip sistemde, fındıkların konveyör banttıan düşürülerek çelik bir plakaya çarptığında ürettiği akustik sinyal işlenmiştir. Bu çalışmada kabuklu fındıklar yalnızca dolu veya boş olmak üzere sınıflandırılmıştır (Person ve diğ., 2005).

Yapılan literatür çalışmalarının yanı sıra sektörde kullanılan makine imalatları da incelenmiştir. Bu doğrultuda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2. a'da gösterilen makine imalatında (Makinaturkiye.com, 2023) fındıklar toz, toprak ve taşlarından temizlenmekle birlikte boyutlarına göre sınıflandırılmaktadır. Burada yalnızca boyut sınıflandırılması yapılmakta olup herhangi bir tür sınıflandırması yapılmamaktadır. Şekil 2. b'de görülen makine imalatında (Grotech Colour Sorter, 2017) iç fındıklar üzerine sınıflandırma çalışmaları yapılmıştır. İç fındıklar renklerine göre sınıflandırılarak ürün kalitesinin artırılması hedeflenmektedir. Şekil 2. c'de görülen makine imalatında (Fibex Mühendislik, 2021) serbest düşümlü hareket sistemi tasarlanmış olup lazer, görüntü işleme ve sensör teknolojisinden yararlanılmıştır. Fındıklar renk, doku ve boyut özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Şekil 2. d'de görülen makine imalatında (Made-in-China, 2023) taşıyıcı raflı bant tasarımı görülmektedir. Bu makine fındıkları öncelikle büyük, küçük ve orta olmak üzere boyutlarına göre sınıflandırır. Ardından kabuk kırma işlemi gerçekleştirilerek fındık içi ve fındık kabukları birbirinden ayrıştırılır. Daha sonra fındık içleri ıslatılarak kabuklarından ayrıştırılır ve son olarak paketlenir. Şekil 2. e'de görülen makine imalatında (AMD Color Sorter,2020) fındıklar konveyör bant üzerinde hareket ettirilirken INGAAS (Indium Gallium Arsenide) sensörleri tarafından fındıkların yüzeyindeki renk tonları ve desenlerin algılanması ile sınıflandırma işlemi yapmaktadır. Bu sayede üzerinde leke bulunan hasarlı fındıkları ayrıştırmaktadır. Şekil 2. f'de görülen makine imalatında (Hasatsan, 2020) fındık randımanını düşürebilecek boş-çürük fındık, yarı dolu fındık, taş ve toprak vb. ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Sistem tasarımı merdaneler üzerinde dönen özel tasarım konveyör bant üzerinde dönerken içeriğinde bulunan titreşimli elek ve hava akımı sayesinde fındıklar boyut ve ağırlık farklarına göre ayrıştırılır. Titreşimli elek ürünleri boyutlarına göre ayrıştırırken hava akımı hafif yabancı maddeleri üfleyerek ayırır.

Yukarıda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, fındık sınıflandırma işlemi yapabilecek makine imalat tasarımı çalışmalarının yetersiz olduğu, endüstride kullanılan benzer makine imalatları incelendiğinde ise genel sınıflandırma işlemlerinin çoğunlukla boyut, doluluk ve hasar oranlarına göre gerçekleştirildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalarda ve tasarlanan makine imalatlarında kullanılan sınıflandırma yöntemlerinin, ürün kalitesini artırma noktasında eksik kaldığı tespit edilmiştir. Kullanılan yöntemler ve sistem tasarımları için daha yenilikçi ve daha kaliteli ürün performanslarının elde edilebileceği yeni bir makine imalat tasarımı gerekliliği öngörülmüştür. Tasarlanan sistem sayesinde endüstriyel üretimde ürün kalitesi artırılması ve fındıkların konveyör bant üzerinde çeşitlerine göre sınıflandırma işlemlerinin insan eli değmeden otonom bir şekilde gerçekleştirilmesi beklenmektedir.

	
a. Kuruyemiş Eleme Makinesi	b. Grotech Fındık Renk Ayırıcı Makinesi
	
c. Ventus Gıda Ayıklama Makinesi	d. Fındık Soyma Makinesi Badem İşleme Hattı
	
e. AMD Kayış Tipi InGaAs Fındık Renk Ayırma Makinesi	f. Hasatsan H1221 Randıman Makinesi

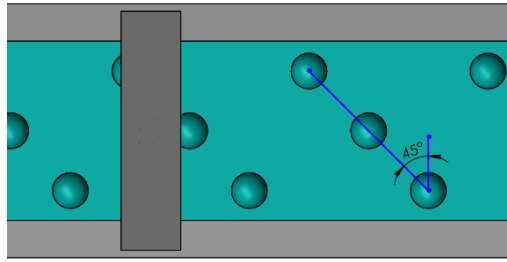
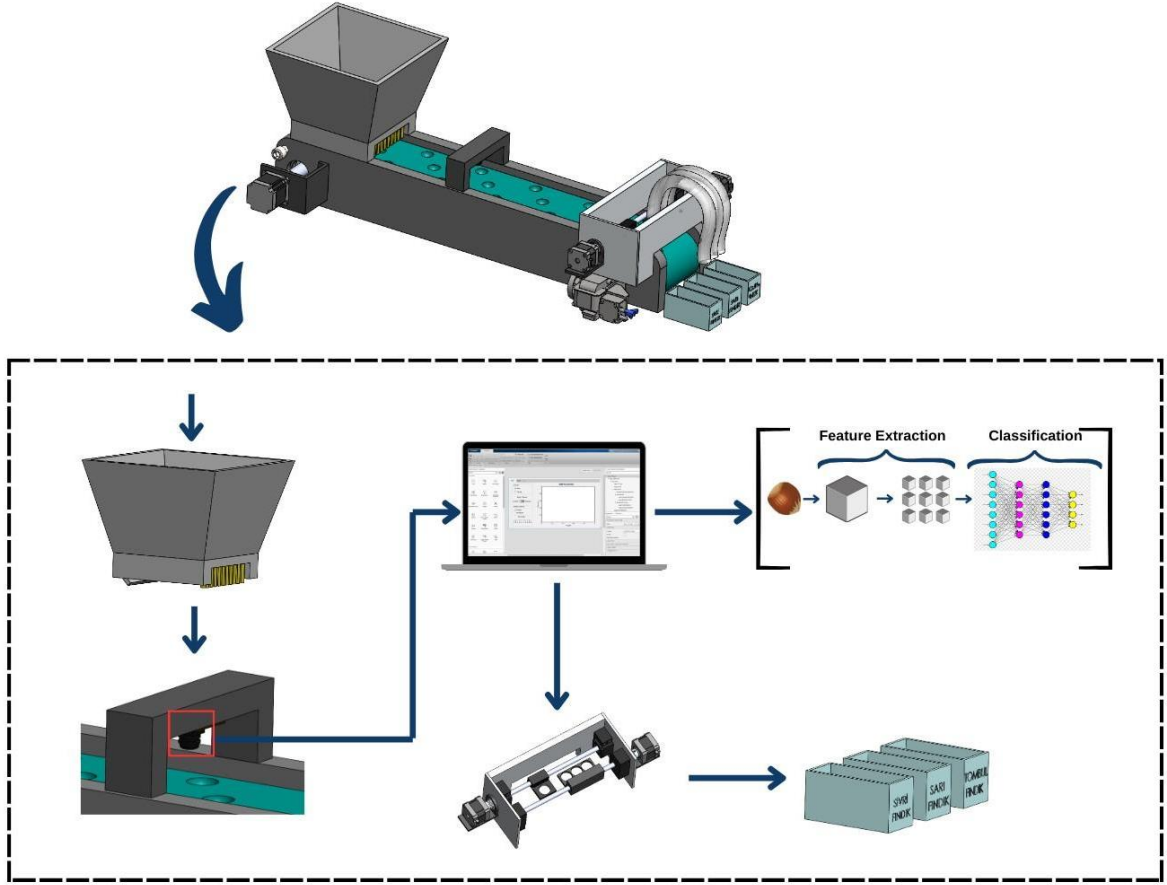
Şekil 2. Sektörde kullanılan makine imatları

II. MATERYAL METOT

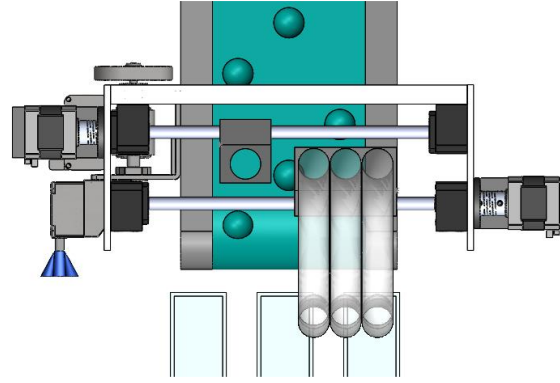
Önerilen çalışmada fındık türlerinin kabuklu yapısı üzerinden sınıflandırma yapmak için tasarlanan makinenin sistem mimarisi Şekil 3'te verilmiştir.

Proje için tasarlanan prototip modeli 3 temel gruptan oluşmaktadır. İlk bölüm fındık haznesinin olduğu kısımdır. Burada hazne içi 3 bölüme ayrılmıştır bu sayede fındıklar bant üzerindeki yuvaya yığılmadan hazne içinde bekletilmektedir. Hazne çıkışına tozluk eklenerek bant ilerlerken yuvaya yerleşmeyen fındıkların bant üzerinden süpürülerek hazne içinde tutulmasını sağlamaktadır. Konveyör bant Şekil 4'te gösterildiği gibi aynı doğrultuda 45 derecelik açı ile birbirini takip eden 25 mm çapında 20 mm derinliğinde yuvalardan oluşmaktadır. Bu sayede fındıklar bant üzerinde belirlenen konumlardaki oyuklar içerisinde hareket edecektir.

Prototip olarak oluşturulan sistemde hazneden dökülüp bant yuvalarına yerleşen fındıklar, step motorun 23 adımlık hareketinden sonra durmaktadır. Adım sayısı, bant hareket etmeye başladıktan sonra aynı anda 3 yuvanın da kamera açısına girmesiyle step motor durdurularak hesaplanmıştır. Bu esnada fındıklar üzerinden görüntü alınması için web kamerasının hizasına gelmektedir. Bant yuvalarına yerleştirilen 3 adet fındığın aynı anda görüntüleri alınır ve 0,5 ms süre içerisinde makine öğrenmesi algoritmaları ile cinsleri tespit edilmektedir. Her yuvadaki fındıkla ilgili vakum sistemine ilgili haznenin konum bilgisi sistem tarafından yönlendirilir. Web kamerasından sonra bant tamburunu döndüren step motorun yaklaşık 250 adımlık motor hareketinden sonra fındıklar vakum sistemine ulaşarak ayrıştırma işlemleri tamamlanmaktadır.

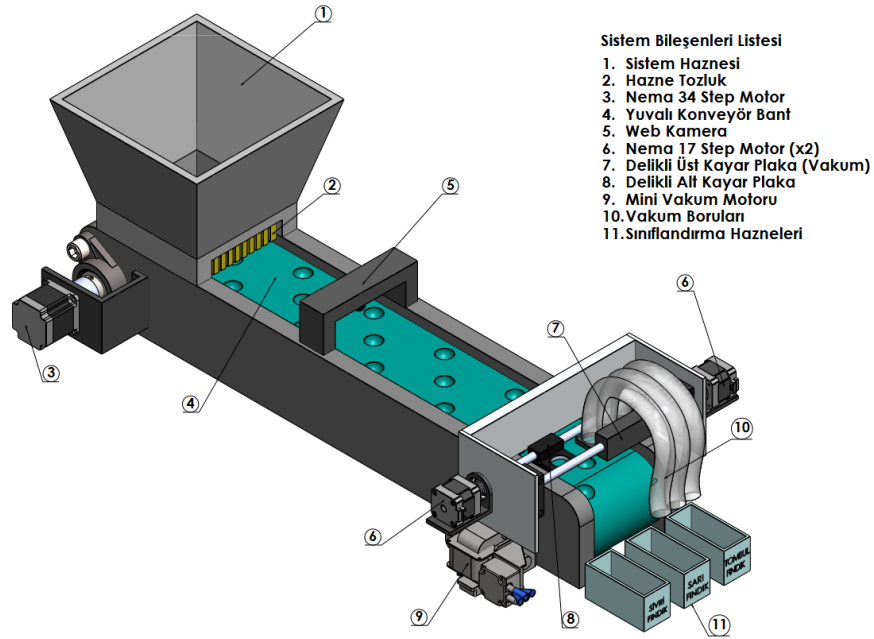


Prototip modelin ikinci bölümünde web kamera sistemi bulunmaktadır. Web kamera sayesinde bant üzerindeki fındıkların görüntüsü alınacak ve sınıflandırma işlemi yapılarak fındıkların hangi türe ait olduğu tespit edilecektir (Şekil 4). Buradan alınan bilgilere göre ilgili yuvadaki fındığın hangi hazneye bırakılacağı belirlenerek vakum borularına konum bilgisi verilecektir.



Şekil 5. Vakum sistemi ve kayar plaka sistemi tasarımı

Prototip modelin son kısmı projenin özgün ve yenilikçi kısmıdır. Burada sınıflandırma işlemini yapmak için vakum sistemi kullanılmaktadır. Tespit edilen fındık çeşitlerinin Matlab GUI arayüzünde yazılan kodlar ile hangi hazneye bırakılması gerektiği belirlenmektedir. Ardından step motorlar gerekli konumlara gelerek vakumlama işlemi ile fındıkları hazneye bırakacaktır. Burada vakum boruları kayar plakalara yerleştirilir, kayar plakaların hareketleri step motorlar ile gerçekleştirilir. Vakum sisteminin görüntüsü Şekil 5'te belirtilmiştir.



Şekil 6. Prototip tasarımında kullanılan makine elemanları

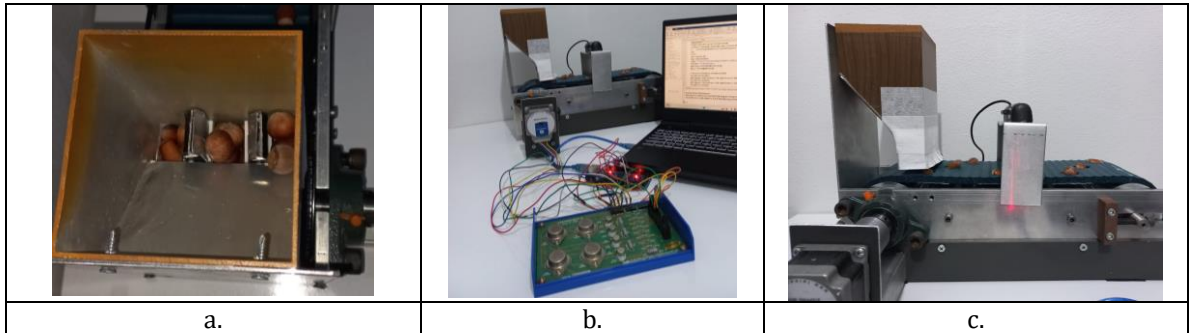
Şekil 6'da prototip tasarımı ve imalatında kullanılan makine elemanları numaralandırılarak belirtilmiştir. Kullanılan bu elemanların teknik kısa tanımları maddeler halinde sunulmuştur.

- 1. Nema 17 Step Motoru:** Nema 17 step motoru genellikle 3D yazıcı, CNC makineleri ve benzer endüstriyel cihazlarda kullanılan motor türüdür. Belirli bir açıda dönerek her adımı belirli bir miktar döndürür. Motor torku 0,4 Nm ile 0,6 Nm arasında bir değere sahiptir. Motor boyutları olarak 42 mm x 42 mm'dir. Nema 17 step motoru özelliklerinden ötürü vakum bölümünde kullanılan kayar plakaların hareketlendirilmesi için kullanılacaktır.
- 2. Nema 34 Step Motoru:** Nema 34 step motoru genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan büyük ve güçlü bir step motorudur. Büyük ve ağır yüklerin taşınması için idealdir. Tork değeri 3 Nm ile 12 Nm arasında değere sahiptir. Motor boyutları 86 mm x 86 mm'dir. Nema 34 step motoru

özelliklerinden ötürü konveyör bant sisteminin hareketi için kullanılacaktır. Konveyör bandın tambur silindirlerini döndürmektedir.

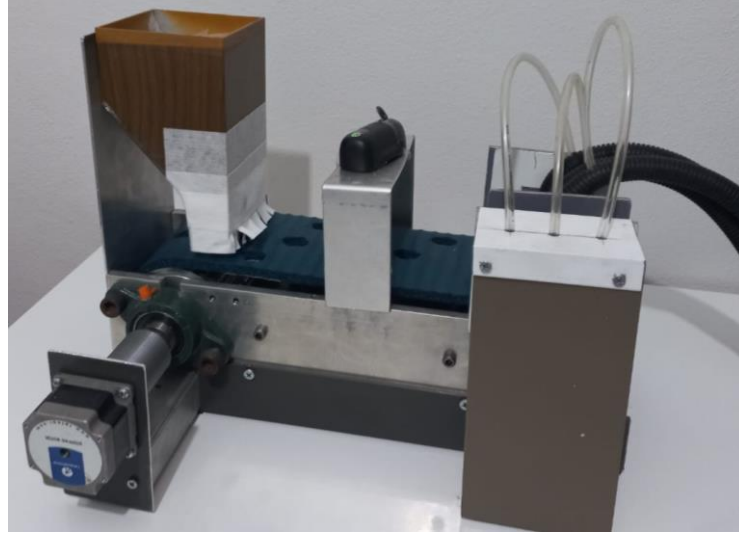
3. **ESA IF-STEP Motor Sürücüsü:** Endüstriyel step motorların hassas kontrolü için kullanılan, yüksek hız ve torklarda çalışabilen motorlara uygun bir sürücüdür. Güvenlik açısından motorların aşırı akım, aşırı ısınma ve aşırı gerilim gibi durumlardan motoru korumaktadır. Esa If-Step motor sürücüsü, motorların Arduino kart ile arasında güç aktarımı yapmak için kullanılacaktır.
4. **D2028 Vakum Motoru:** D2028 vakum motoru endüstriyel ve ticari uygulamalarda kullanılan güçlü bir vakum motorudur. Genellikle endüstriyel temizlik makineleri, vakumlu taşıma sistemleri ekipmanlarında kullanılır. 65 KPa güce sahiptir, 0-16 Hg vakum aralığındadır. Teknik özelliklerinden ötürü vakum sisteminde vakum motoru olarak kullanılacaktır.
5. **Web Kamera:** 1920x1080 çözünürlüklü video ve net görüntüler sunan bir web kamerasıdır. USB bağlantılı olması, otomatik odaklama ve yakınlaştırma özelliklerine sahip olduğu için tercih edilmiştir. Bant üzerinden görüntü almak için kullanılacaktır.
6. **Arduino Mega Kart:** Arduino Mega kartı I/O sayısı, pin sayısı ve bellek kapasitesinden ötürü karmaşık projeler için kullanılan bir mikrodenetleyici kartıdır. Özellikle robotik otomasyon ve daha büyük sensör ağlarına sahip uygulamalarda tercih edilir, step motorların adım ve hız kontrollerini yapmak için kullanılacaktır.
7. **Yaylı Kaplin:** Yaylı kaplinler iki mil arasında tork aktarımını sağlamak için kullanılır. Hafif eksenel, radyal ve açılabilir hataların engellenmesi noktasında esneklik sağlayan bir bağlantı elemanıdır. Yaylar tork aktarımı sırasında esneklik sağlar ve makinelerin titreşimlerini sönmüleyerek mil hareketlerini sorunsuz gerçekleştirir. Yaylı kaplinler vakum bölümünde kullanılan kayar plakaların hareketinde kullandığımız step motorlar ve miller arasında yataklama işlemi yapmak için kullanılacaktır.
8. **İki Cıvatalı Flanş Rulman FRM CJT 05:** Step motorların sabitlenmesi için iki cıvatalı flanş rulmanlar kullanılmaktadır. Rulmanlar step motorun montaj delikleri ile uyumlu deliklere sahiptir. Step motorun sağlam bir şekilde sabitlenmesi ve titreşimlerinin sönmülenmesine yardımcı olmaktadır. Konveyör bandın hareket ettirilmesinde kullanılacak step motorların yataklama işlemini yapmak için kullanılmıştır.

Tasarım çalışmalarından sonra önerilen makinanın imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.a'da hazne içerisine yapılan bölmeler sayesinde fındıkların konveyör bandına akışı gösterilmektedir. Şekil 7.b'de prototip model konveyör sisteminin step motor ile hız ve hareket çalışmaları Şekil 7.c'de ise fındık yuvalarına yerleşen fındıkların detaylı görünümü yer almaktadır.



Şekil 7. Önerilen çalışmanın çeşitli evrelerinde imalat görüntüleri

Son olarak, Şekil 8’de vakum motoru ve vakum borularının prototipe eklenmiş versiyonu verilmiştir.



Şekil 8. Vakum motoru ve vakum borularının prototipe eklenmiş versiyonu

Sistemde kullanılan kritik bileşenlerin performans değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Sistemde kullanılan kritik bileşenlerin performans değerlendirmeleri

Sistem Bileşeni	Tork / Güç Değeri	Teknik Ölçüler	Performans Değerlendirmesi
Nema 17 Step Motor	0.4Nm - 0.6 Nm	42mm x 42mm	Kayar plakaların yatay düzlemde hareketlerinin gerçekleştirilmesi için tek yönde hareketini maksimum 200 adım olacak şekilde sorunsuz bir şekilde gerçekleştirmektedir.
Nema 34 Step Motor	3Nm - 12Nm	86mm x 86mm	Tüm bant sistemini tam bir turda 273 adım olacak şekilde sorunsuz bir şekilde döndürebilmektedir.
D2028 Vakum Motoru	65 kPa vakum gücü	-	Sınıflandırma verilerine göre ayrıştırma işlemini yaparken yeterli miktarda çekim gücü göstermektedir. Bir adet fıncığın vakumlanarak ilgili hazneye iletilmesi yaklaşık 3 sn içerisinde gerçekleşmektedir.
Web kamera	-	-	Saniyede 30 frame değerinde hareketli görüntü aktarımı sağlayabilmesinden ötürü sistemin çalışma performansını yeterli miktarda etkilemektedir. Alınan görüntünün 0.5 ms içerisinde sınıflandırma işlemi yapılmaktadır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmamızda endüstriyel ortamda fıncıkların çeşitlerine göre sınıflandırma işlemi yapacak makine tasarımının prototip modeli imalatı yapılmıştır. Tasarlanan prototip modelde bulunan vakum bölümü sayesinde türü belirlenen fıncıkların ilgili haznelere yönlendirilmesi insan eli değmeden tamamen otomasyon sistemi ile gerçekleştirilecektir. Bant üzerinden alınan görüntüdeki fıncığın, 0.5 ms içerisinde türü tespit edilmektedir. Türünün tespit edilmesinin ardından vakumlama sistemi ile vakumlanarak ilgili hazneye bırakılması ise 30 saniye içerisinde hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Böylece imalatı yapılan prototip modelin, elde ettiği sınıflandırma verileri sonucunda başarılı ve hızlı bir şekilde türlerine göre ayrıştırma işlemi yaptığı tespit edilmiştir.

Geliştirilen bu makine sayesinde sınıflandırmanın daha kısa sürede, daha etkin ve pahalı cihazlara ihtiyaç duymadan gerçekleştirilmesinin önünü açılmıştır. Fıncık sektöründe seri üretim yapan sanayi

kuruluşları ve araştırmacılar için daha az zaman, daha kolay iş sonuçlandırma ve pahalı cihazlara gerek duyulmadan görüntü ile cinslere göre sınıflandırılması üzerine çalışma yapmalarına zemin hazırlanmıştır. Bu yöntem ciddi bir maliyet tasarrufudur.

IV. SONUÇLAR

Önerilen çalışma kapsamında tasarlanıp üretilen kabuktan fındık cinslerini sınıflandırma makinası, endüstriyel makinalardan farklı olup, olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Endüstriyel mekanik temelli makinalardaki sistemlere ihtiyaç duyulmadan yapay zekâ temelli bilim camiasına ve endüstrisine ayırma işlemini tek başına yapabilme özelliği ile dünya ekonomisine kazandırılmıştır. Uzaktan algılama sayesinde de iş güvenliğinin yükseltilmesi, kullanım kolaylığı sağlaması yeni ve çok kullanılacak yapay zekâ temelli oluşu ticarileştirme noktasında aday olabileceği söylenebilir.

Tasarlanan vakum sisteminde tercih edilen motorun çekim gücü yeterli bulunmuştur. Vakum sisteminde kayar plakaların hareketi için tercih edilen motorların kayar plakaları hareket ettirmek için yeterli olduğu ve kaplinler aracılığıyla yapılan yataklama işlemi sayesinde motor hareketlerinin kusursuz olduğu tespit edilmiştir.

Bu makalede, yapılan çalışmanın sistem tasarımı ve imalatının performansı hakkındaki sonuçlar elde edilmiş ve paylaşılmıştır. Daha sonra makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak fındık cinslerinin ayrıştırılması için çalışmalara yer verilecektir.

KAYNAKLAR

- Acıbadem Hastanesi (2022). Çiğ fındığın sağlığınıza kattığı 10 fayda. [Online]. Erişim: <https://www.acıbadem.com.tr/hayat/cig-findigin-sagliginize-kattigi-10-fayda>.
- Aktaş A., Öztürk E., Hatırlı S. (2016). Dünya Fındık Piyasasında Türkiye'nin Rolü. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 1(1), 36-54.
- AMD, (2020), Kayış Tipi InGaAs Fındık Renk Ayırma Makinesi. [Online]. Erişim: https://tr.amdsortex.com/belt-type-ingaas-nuts-color-sorter-machine_p71.html
- Farhadi, M., Y Abbaspour-Gilandeh, Y. Mahmoudi, A. Mari Maja J. (2020). An integrated system of artificial intelligence and signal processing techniques for the sorting and grading of nuts. *Applied Sciences*, 10(9), 2020
- Fibex Mühendislik (2021). Ventus Gıda Ayıklama Makinesi. [Online]. Erişim: <https://www.fibex.com.tr/urun/ventus-gida-ayiklama-makinesi>
- Giresun Ziraat Odası. (2022). Fındığın kullanım alanları. [Online]. Erişim: <https://www.giresunziraatodasi.org.tr/findigin-kullanim-alanlari>
- Grotech Colour Sorter. (2017). Fındık Renk Ayırma Makinesi. [Online]. Erişim: https://www.grotechcolorsorter.com/hazelnuts-color-sorter-machine_p36.html
- Hasatsan, (2020). H1221 Taş, Toprak Ayıklama Randıman Makinesi. [Online]. Erişim: <https://www.hasatsan.com.tr/h1221-tas-toprak-ayiklama-randiman-makinesi>
- Kalkan, H. ve Yardimci Y. (2006). Classification of hazelnut kernels by impact acoustics. *16th IEEE Signal Processing Society Workshop on Machine Learning for Signal Processing*. IEEE, 325-330.
- Kermani M. ve Koorvand Ş. (2016). Design, construction and evaluation of sizing machine for hazelnuts. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47(2), 197-392.
- Made-in-China. (2023). Fındık Soyma Makinesi Badem İşleme Hattı. [Online]. Erişim: https://tr.made-in-china.com/co_gelgoog/product_Large-Factory-Hazelnut-Shelling-Husking-Machine-Almond-Processing-Line_uooeoessyg.html
- Makinaturkiye.com. (2023). 150 Kg/Saat Vibrasyonlu Kuruyemiş Eleme Makinası. [Online]. Erişim: <https://www.makinaturkiye.com/150-kg-saat-vibrasyonlu-kuruyemis-eleme-makinasi-p-185030>
- Onaran, I., Dulek, B., Pearson, T.C., Yardimci, Y., & Cetin, A.E. (2005). Detection of empty hazelnuts from fully developed nuts by impact acoustics. *2005 13th European Signal Processing Conference*, 1-4.
- Özdemir F., Topuz A., Doğan Ü., Karkacier M. (1998). Fındık Çeşitlerinin Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri. *Gıda*, 23(1), 37-41.
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Fındık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü., Savran E. (2023). Gıda Olarak Fındığın Değeri. [Online]. Erişim: <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/findik/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=29>

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Fındık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Savran E. (2010). Fındıkta Harman Teknolojisi. [Online].
Erişim: <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/findik/Sayfalar/Detay.aspx?Sayfalid=33>

Toprak mahsulleri Ofisi Genel Müdürlüğü. (2021). 2020 Yılı Fındık Sektör Raporu Ankara, 2021. [Online]. Erişim:
<https://www.tmo.gov.tr/Upload/Document/sektorraporlari/findik2020.pdf>

Araştırma Makalesi

BODIPY-Lipit Bileşiğinden Yeni Lipozomların Sentezi ve PDT Özelliklerinin Araştırılması

 Muhammed Emre Özler^{a,*},  Yasemin Bozkurt^b,  Fazlı Sözmen^a

^aSivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nanoteknoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sivas/Türkiye.

^bSivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sivas/Türkiye.

*Sorumlu Yazar: memreozler@gmail.com

Makale Bilgileri:

Geliş: 25/04/2024, Revizyon: 04/06/2024, Kabul: 09/06/2024.

ÖZET

Kemoterapi, radyoterapi, cerrahi müdahale gibi geleneksel kanser tedavi yöntemlerinin yüksek toksisite, ilaç direnci ve enfeksiyon gibi çeşitli yan etkilerinden dolayı, fotodinamik terapi (PDT), fototermal terapi (PTT) veya sonodinamik terapi (STT) gibi invaziv olmayan nispeten daha az yan etkilere sahip kanser tedavi yöntemlerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu non-invaziv terapi yöntemleri içerisinde de PDT sahip olduğu özelliklerinden dolayı literatürde en çok çalışılan terapi yöntemlerinden biridir. Bu ve benzeri terapi yöntemleri çalışılırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususlardan biri fizyolojik koşullardır. Bu nedenle yapı bakımından hücre zarına benzeyen lipozomal yapılar ilaç taşıyıcı sistemler başta olmak üzere yaygın bir şekilde araştırılmaktadırlar. Genellikle nano boyutta sentezlenen lipozomal yapılar kolloidal kararlılıkları, biyoyumlu olmaları, toksik olmamaları ve etkili bir şekilde hedeflenebilmeleri gibi özellikleri nedeniyle de son derece ilgi görmektedirler. Bu çalışmada PDT özelliğine sahip BODIPY bazlı yeni lipozomal yapıların sentezlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle BODIPY türevi bir bileşik fotoduyarlaştırıcı olarak sentezlenip karakterize edilmiştir. Daha sonra, serbest karboksil grubu içeren bu BODIPY (4,4-Difloro-4-bora-3a, 4a-diaza-s-indasen) türevi, lizofosfatidilkolin ile esterleşme reaksiyonu vasıtasıyla konjuge edilmiştir. Elde edilen BODIPY-Lipit konjugatı kullanılarak ince film hidratlama yöntemiyle nano boyutta lipozomal yapılar sentezlenmiştir. Son olarak yapılarında bir fotoduyarlaştırıcı bileşik bulduran bu lipozomal yapıların PDT özellikleri 530 nm dalga boyundaki LED ışığı kullanılarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: BODIPY, Fotodinamik Terapi, Lipozom.

Synthesis of New Liposomes from BODIPY-Lipid Compound and Investigation of PDT Properties

ABSTRACT

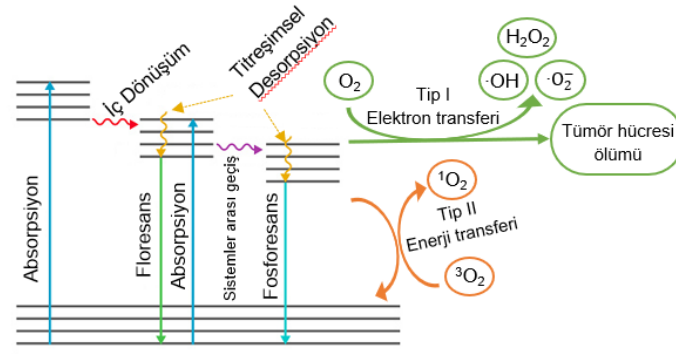
Due to the various side effects of traditional cancer treatment methods such as chemotherapy, radiotherapy and surgical intervention, such as high toxicity, drug resistance and infection, non-invasive methods such as photodynamic therapy (PDT), photothermal therapy (PTT) or sonodynamic therapy (STT) have relatively fewer side effects and interest for them in these cancer treatment methods is increasing. Among these non-invasive therapy methods, PDT is one of the most researched therapy methods in the literature due to its features. One of the most important issues to consider when researching this and similar therapy methods is physiological conditions. For this reason, liposomal

structures, which are resemble in structure to the cell membrane, are widely researched, primarily as drug delivery systems. Liposomal structures, which are generally synthesized in nanoscale, attract great attention due to their colloidal stability, biocompatibility, non-toxicity and are effective targeted. In this study, it was aimed to synthesize new BODIPY-based liposomal structures with PDT properties. For this purpose, firstly, a BODIPY-derived compound was synthesized and characterized as a photosensitizer. Then, via an esterification reaction, this BODIPY derivative which had a free carboxyl group was conjugated with lysophosphatidylcholine. Nanoscale liposomal structures were synthesized by the thin film hydration method using the obtained BODIPY-Lipid conjugate. Finally, utilizing LED light with a wavelength of 530 nm, the PDT characteristics of these liposomal structures which include a photosensitizer component in their structure were determined.

Keywords: *BODIPY, Photodynamic, Therapy, Liposome.*

I. Giriş

İyi huylu ve kötü huylu tümörlerin tedavisinde tercih edilen yöntemlerin başında kemoterapi, radyoterapi, cerrahi yöntemler ve çeşitli fototerapi uygulamaları gelmektedir. Kemoterapi, radyoterapi ve cerrahi müdahale gibi yöntemlerin sebep olduğu yan etkiler, yüksek maliyet ve zorlu tedavi süreçleri nedeniyle alternatif yöntemlerin geliştirilmesine gösterilen ilgi artmaktadır. Fototerapi, genellikle görünür bölge, ultraviyole (UV) veya yakın infrared (NIR) bölgesindeki ışığın tedavi amaçlı kullanıldığı yöntemlere verilen genel isimdir. Fotodinamik terapi (PDT) ise uzun bir süredir kullanılmasına rağmen yeni yaygınlaşan en önemli fototerapi yöntemlerinden biridir (Robertson ve ark., 2009). Antik çağ uygarlıkları sedef hastalığı ve cilt kanseri gibi çeşitli hastalıkları tedavi etmek amacıyla güneş ışığını kullanmışlardır. 18. Yüzyıl başlarında Finsen'in lupus vulgaris adlı cilt hastalığının tedavisinde güneş ışığının veya ısı filtreli bir karbon ark lambasından gelen ışığın kullanılabileceğini bildirmesi modern fototerapinin başlangıcı olmuştur (Correia ve ark., 2021). PDT cilt lezyonları, akne, göz de oluşan damar tümörleri ve kanser gibi hastalıkların tedavisinde kullanılan, vücut bütünlüğünde herhangi bir bozulmaya sebep olmayan bir çeşit terapi yöntemidir (Sun ve ark., 2023). PDT seçici olarak hedef dokuda biriken, ışığa duyarlı fotoduyarlaştırıcı (PS) maddenin, moleküler oksijen varlığında, uygun dalga boyundaki ışığa maruz bırakılması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde PDT bileşenlerinden olan ışık ve PS tek başına sitotoksik etki oluşturmamaktadır. Ancak ortamda bulunan moleküler oksijen gibi bileşiklerin varlığında bir araya geldiklerinde gerçekleşen fotokimyasal reaksiyon sonrası ışığın geldiği dokularda sitotoksik etkiler göstermektedirler. PDT'de gerçekleşen fotofiziksel mekanizma genellikle Jablonski diyagramı üzerinde gösterilir (Şekil 1). PDT mekanizmasının Tip I ve Tip II olmak üzere genellikle iki tip reaksiyon üzerinden gerçekleştiği belirtilir (Kamkaew ve ark., 2013, Ion, 2000). PDT'de kullanılan fotoduyarlaştırıcı maddeler, oksijen moleküllerinden reaktif oksijen türleri üretmek için uygun dalga boyundaki ışık varlığında aktive olabilen bileşiklerdir. Bu bileşiklerden hematoporfirin türevi olan Photofrin (HpD), modifiye edilmiş porfirinler, klorinler, ftalosiyeninler ve BODIPY türevleri gibi birçok fotoduyarlaştırıcı madde, PDT uygulamalarında kullanılmaktadır. Fotoduyarlaştırıcı madde olarak BODIPY boyar maddeleri sahip oldukları fotofiziksel özellikleri, kararlılıkları ve birçok farklı pozisyondan kolay fonksiyonlandırılmaları gibi öne çıkan özellikleri nedeniyle PDT'de çokça tercih edilmektedirler.



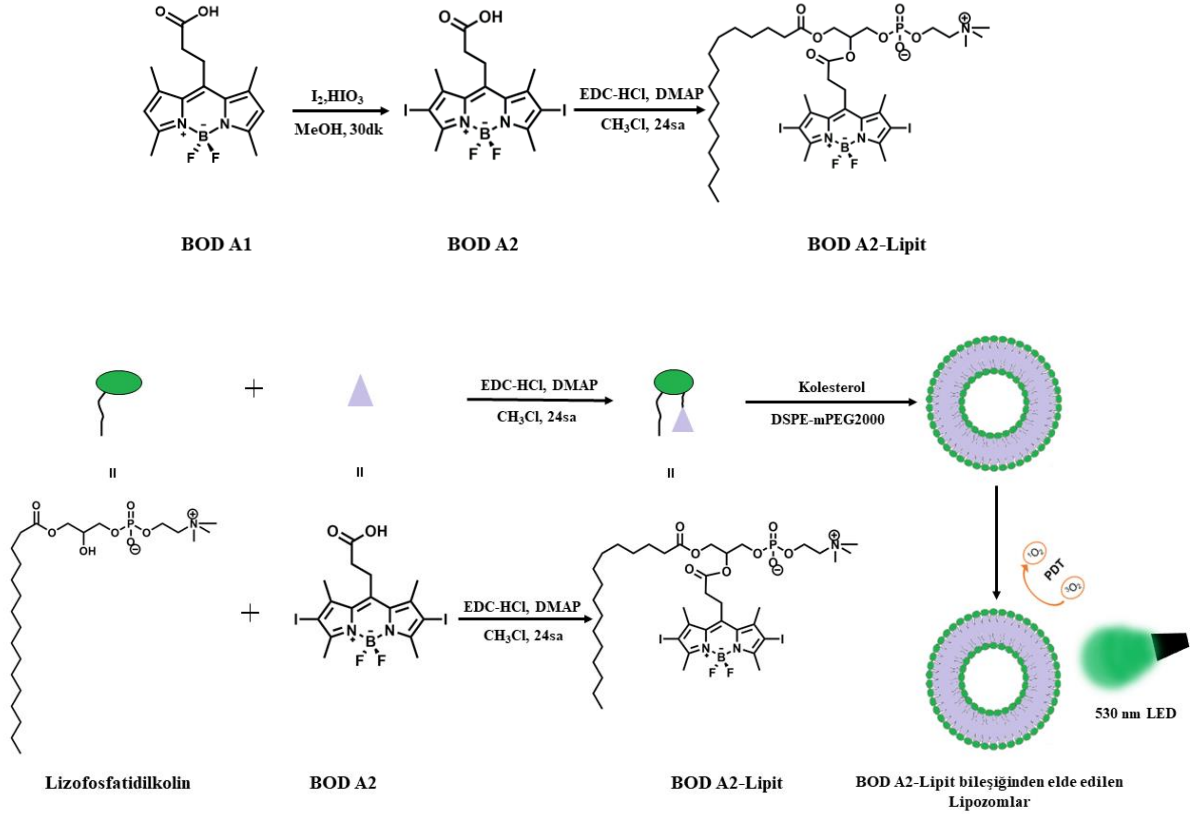
Şekil 1. PDT'de gerçekleşen fotofiziksel süreçleri gösteren Jablonski diyagramı.

BODIPY bileşiği ilk olarak 1960'lı yılların sonlarında Treibs ve Kreuzer'in çalışmaları sonucunda elde edilmiştir (Treibs ve Kreuzer, 1968). İlk çalışmalardan sonra çok çeşitli BODIPY türevleri sentezlenmiş ve başta biyolojik görüntüleme ve etiketleme gibi biyolojik uygulamalar olmak üzere sensör uygulamaları ve PDT uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar (Loudet ve Burgess, 2007). BODIPY türevi bileşiklerin bir PS'ye dönüştürülmesi amacıyla bu bileşikler genellikle Ir, Pd, Pt, Br, I gibi çeşitli ağır atomlarla modifiye edilirler. Ancak literatürde ağır atom içermeyen PS özellik gösteren farklı BODIPY türevleri de vardır (Çakmak ve ark., 2011). PDT'de kullanılan PS'lerin sulu ortamlarda kullanılabilir olması hem biyoyoumluluk açısından hem de PS'lerin genellikle biyolojik ortamlarda kullanılması sebebiyle son derece önemlidir (Li ve ark., 2020). Ps'lerin biyoyoumlu olması ve biyolojik ortamlarda kullanılabilmesi amacıyla çeşitli taşıyıcı sistemler ile birlikte kullanılması son zamanlarda sıklıkla tercih edilmektedir (Simões ve ark., 2020, Abrahamse ve Hamblin 2016). PS'lerin taşıyıcı yapıya bağlanması ya da yüklenmesiyle tümör dokulara seçici olarak taşınması ve PDT etkinliğinin biyolojik ortamlarda artırılması ile ilgili çeşitli çalışmalar son derece ilgi görmektedir. Bingham'ın 1960'lı yıllarda yaptığı çalışmalarla bu taşıyıcı sistemlerden biri olan lipozomlar keşfedilmiştir (Nsairat ve ark., 2022). Taşıyıcı sistemler olarak lipozomlar, lipofilik, hidrofilik ve amfilik karakterdeki farklı bileşenleri taşıyabilme kapasitelerinden dolayı çokça tercih edilmektedir (Nsairat ve ark., 2022). Son zamanlarda, lipozomal taşıyıcı sistemlerin nanotıp uygulamaları içerisinde kullanımında artış gözlemlenmektedir (Lombardo ve Kiselev, 2022). Genellikle bir çift lipit tabakadan oluşan lipozomların, membran lipitlerinin sulu bir ortama konulmasıyla küresel bir formda lipit bileşenlerin kendiliğinden bir araya gelmesiyle oluştuğu görülmektedir. Küresel yapıda olan lipozomların sulu ortamda hidrofilik baş kısmının su ile temas halinde dışa doğru olduğu ve hidrofobik kuyrukların ise sulu ortamdan kaçınacak şekilde birbirlerine doğru yönlenecek şekilde çift lipit tabakasını oluşturdukları bilinmektedir (Watson, 2015). Lipozomlar temel yapı bileşeni olan fosfolipitlerin modifikasyonu ile çeşitli formlarda sentezlenebilmektedir. Bu modifikasyonlar hidrofilik baş grubu ile sağlanacağı gibi hidrofobik yan zincirin işlevselleştirilmesiyle de gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada BODIPY bazlı yeni lipozomal yapıların sentezi, karakterizasyonu ve PDT özelliklerinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla sentezlenen lipozomal yapılar, bir PS olan BODIPY bileşiğinin lipozomal yapılara doğrudan yüklenmesi yoluyla değil, BODIPY bileşiği ile bir lipit bileşiğinin konjuge edilmesiyle sentezlenen BODIPY-Lipit konjugatı kullanılarak elde edilmişlerdir. Bu şekilde sentezlenen lipozomal yapıların sayısı literatürde oldukça sınırlıdır (Lombardo ve Kiselev, 2022).

II. MATERYAL METOT

Bu çalışma kapsamında kullanılan kimyasallar ve çözücüler aşağıda da verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan, 2,4- dimetilpirol, ve süksinik anhidrit, magnezyum sülfat ($MgSO_4$), hekzan, etil asetat (EtOAc), 1-etil-3-3-dimetilaminopropil karbodiimid (EDC), 4-dimetilamino piridin (DMAP), diklorometan (DCM), kloroform, sodyum klorür (NaCl) ve 9,10-Anthracenediyl-bis(methylene)dimalonic acid (ABDA) Sigma Aldrich'den, metanol (MeOH) ve bortriflorürün dietileter kompleksi ($BF_3 \cdot OEt_2$) Merck'den, toluen,

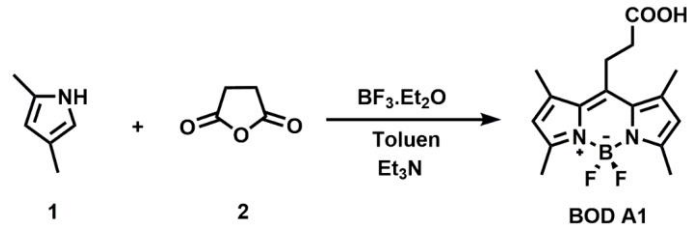
triethylamin (Et_3N) ve iyot (I_2) Carlo Erba'dan, iyodik asit (HIO_3) Acros Organic'den, kolesterol, 1,2 distearoil-sn-glisero-3-fosfoetanolin-n-methoxy polietilen glikol-2000 (DSPE mPEG-2000) ve lizofosfatidilkolin (1-palmitoyl-2-hidroksi-sn-glisero-3-fosfokolin) Avanti'den temin edilmiştir. Tüm kimyasallar analitik saflıkta ve alındığı gibi kullanılmıştır.



Şema 1. BOD A2-Lipit konjugatının ve lipozomal yapıların sentezi ve çalışma prensibi.

A. BOD A1 Bileşiğinin Sentezi

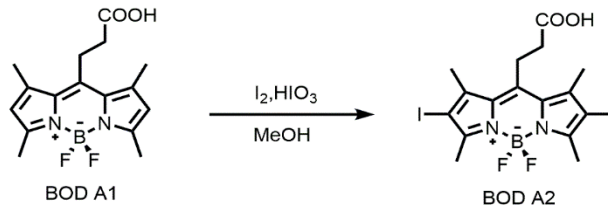
BOD A1 bileşiğinin sentezi literatüre göre yapılmıştır (Lim ve ark., 2010, Niu ve Aisa, 2017, Ambroz ve ark., 2019). 40 mL toluen içerisinde 2,4-dimetilpirol (1.0 mL, 10 mmol) ve süksinik anhidrit (400 mg, 4.0 mmol) eklenerek reaksiyon karışımı 80°C 'ye ısıtılmıştır. Daha sonra, argon atmosferinde 5 saat karışmaya bırakılmıştır. Ardından, oda sıcaklığına gelmesi beklenmiş ve reaksiyona sırayla $\text{BF}_3 \cdot \text{OEt}_2$ (5 mL, 40 mmol) ve trietilamin (Et_3N) (10 mL, 80 mmol) eklenerek oda sıcaklığında 16 saat karıştırılmaya devam edilmiştir. Sonrasında 0.1 M HCl sulu çözeltisi ile reaksiyon durdurulmuş ve reaksiyon karışımı DCM ile ekstrakte edilmiştir. Son olarak DCM evaporatörde uzaklaştırılmış ve elde edilen karışım kolon kromatografisiyle etil asetat/hekzan (v/v) çözücü sistemi kullanılarak ürün saflaştırılmıştır (%27) (Şekil 2). $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): δ 6.06 (2H, s), 3.30 (2H, t), 2.63 (2H, t), 2.51 (6H, s), 2.43 (6H, s) (Şekil 6). MS HRMS (TOF-ESI): m/z hesaplanan: 321.1586; bulunan: 321.1580 $[\text{M}+\text{H}]^+$, $\Delta = 1.8$ ppm (Şekil 7).



Şekil 2. BOD A1 bileşiğinin sentez şeması.

B. BOD A2 Bileşiğinin Sentezi

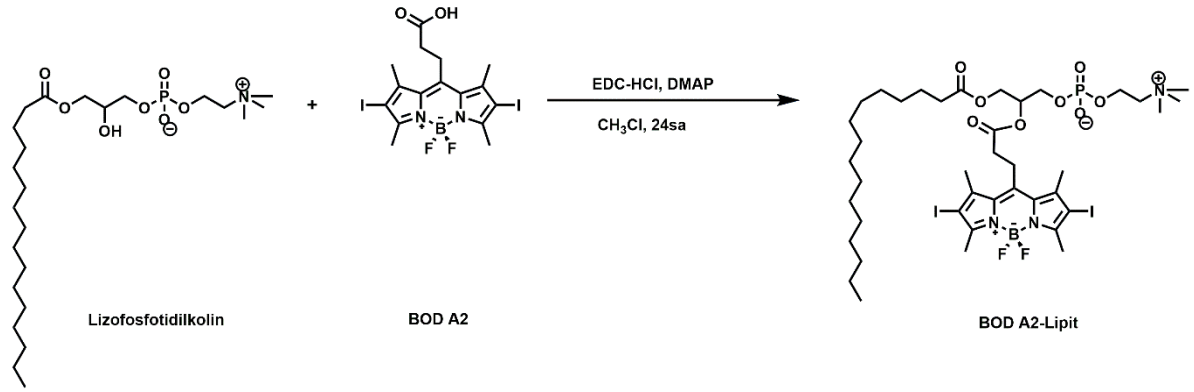
BODIPY A1 (600 mg, 1.87 mmol) bileşiği, 50 mL MeOH içerisinde çözülmüştür. Sonrasında çözeltiye sırasıyla iyot (I_2) (1.24 g, 4.87 mmol) ve iyodik asit (HIO_3) (660 mg, 3.75 mmol) ilave edilmiştir. Daha sonra karışım oda sıcaklığında 30 dk karışmaya bırakılmıştır. Ardından MeOH evaporatörde uzaklaştırılmış, BODIPY A2 bileşiği flaş silika kolon kromatografisi kullanılarak saflaştırılmıştır (Etil Asetat/Hekzan, v/v) (Şekil 3) (Lim ve ark., 2010). 1H -NMR (400 MHz, $CDCl_3$): δ H 3.38 (2H, t), 2.64 (2H, t), 2.60 (6H, s), 2.49 (6H, s) (Şekil 8). ^{13}C -NMR (100 MHz, $CDCl_3$): δ C 174.12, 156.44, 142.54, 142.38, 131.26, 87.03, 34.50, 29.78, 24.34, 19.13, 16.29 (Şekil 9). MS HRMS (TOF-ESI): m/z hesaplanan: 570.9362; bulunan: 570.9523 [M-H]⁻, Δ = 28.2 ppm (Şekil 10).



Şekil 3. BOD A2 bileşiğinin sentez şeması.

C. BOD A2-Lipit Konjugatının Sentezi

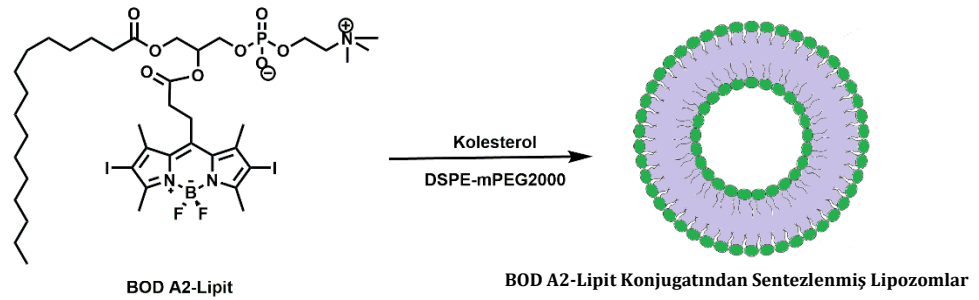
1 mL kloroform içine, 100 nmol Lizofosfatidilkolin, 100 nmol BOD A2, 50 nmol 1-etil-3-(3-dimetilaminopropil) karbodiimid (EDC) ve 25 nmol 4-dimetilamino piridin (DMAP) sırayla eklenmiş ve 24 saat argon atmosferinde karıştırmaya bırakılmıştır. Daha sonra organik solvent indirgenmiş basınç altında uzaklaştırılmıştır. Son olarak BOD A2-Lipit konjugatı diol modifiyeli silika kolonu kullanılarak saflaştırılmıştır (%1, %5 ve %10 MeOH/DCM, v/v) (Şekil 4) (Lovell ve ark., 2011, Cheng ve ark., 2019). 1H -NMR (400 MHz, $CDCl_3$): δ H 4.56- 4.33 (2H, m), 4.32- 4.05 (2H, m), 4.03-3.89 (2H, m), 3.86-3.68 (2H, m), 3.66-3.46 (1H, m), 3.38-3.22 (11H, m), 2.63-2.53 (8H, m), 2.51- 2.45 (6H, s), 2.32-2.23 (2H, m) 1.62- 1.50 (2H, m), 1.32-1.17 (24H, m), 0.90- 0.81 (3H, m) (Şekil 11a). ^{13}C -NMR (100 MHz, $CDCl_3$): δ C 173.63, 170.76, 156.29, 142.95, 87.01, 70.66, 63.46, 62.75, 54.84, 39.05, 35.30, 34.21, 32.01, 29.79, 29.64, 29.61, 29.44, 29.30, 24.99, 24.58, 22.77, 19.15, 16.28, 14.21) (Şekil 11b). MALDI-TOF: m/z hesaplanan: 1049.266; bulunan: 1049.878 [M]⁺, Δ = 583.2 ppm (Şekil 12).



Şekil 4. BOD A2-Lipit konjugatının sentez şeması.

D. BOD A2-Lipit Konjugatından Lipozomların Sentezi

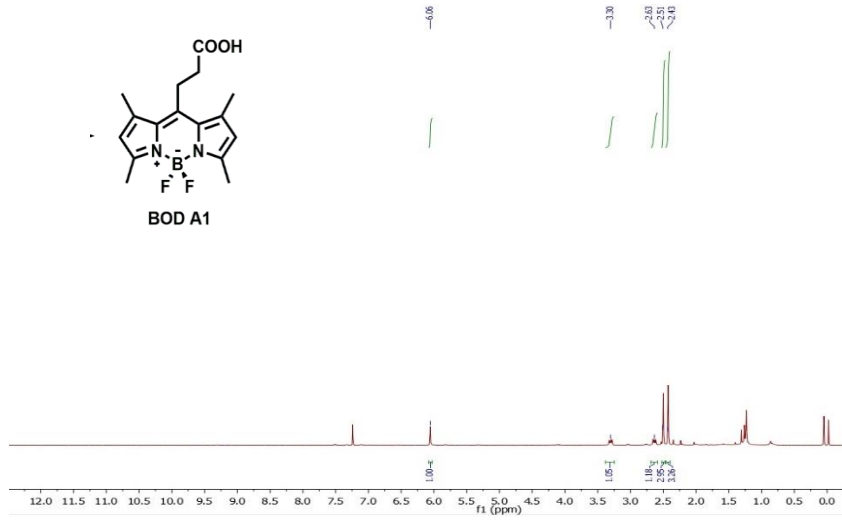
Öncelikle BOD A2-Lipit konjugatı, kolesterol ve DSPE mPEG-2000'nin her biri ayrı ayrı kloroform içerisinde çözülmüştür. Ardından, yüzde birleşim oranları olarak sırasıyla %90, %5 ve %5 olacak şekilde karıştırılmışlardır. Karışım vorteks ile iyice dispersiyeye edilmiş ve ardından, lipit film oluşturmak amacıyla organik solvent evaporatörde uzaklaştırılmıştır. Lipit film hidratlanana kadar inert gaz atmosferinde -20 °C'de saklanmıştır. Daha sonra lipit filme PBS tamponu (pH 7.4) eklenerek hidratlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Lipozom yapılarını elde etmek amacıyla hidratlanmış karışım, sıvı azot içerisinde tamamen dondurulup daha sonra 65 °C hızlıca yeniden ısıtılmış ve bu işlem seri biçimde tekrarlanmıştır (minimum 5 defa). Yapıların düzenli bir şekilde oluşumunu sağlamak için ayrıca karışıma sonikasyon uygulanmıştır. Lipozom yapılarını oluşturmak için 65°C'de ısıtılan manyetik karıştırıcı üzerinde içerisinde 200 nm'lik bir polikarbonat membran bulunan mini-extruder kullanılarak karışım 10 defa ekstrüde edilmiştir. Sonrasında elde edilen lipozomlar argon atmosferinde +4 °C saklanmıştır (Şekil 5) (Liu ve ark., 2010, Jin ve Lovell, 2013, Jin, 2015).



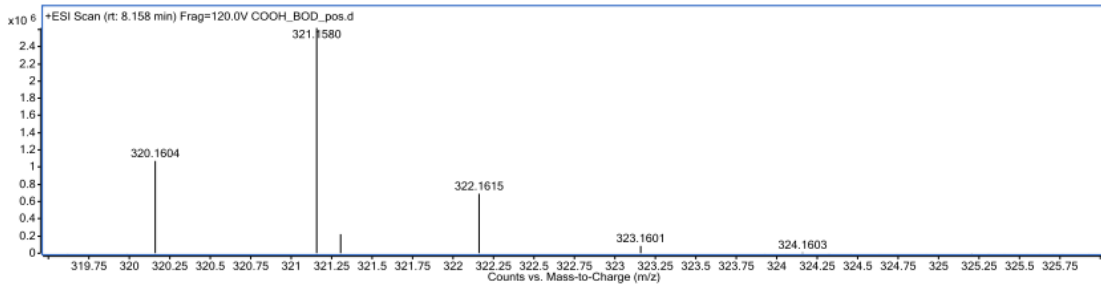
Şekil 5. BOD A2-Lipit konjugatından lipozomların sentezi.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın ilk aşamasında sentezlenen BOD A1 bileşiği ¹H-NMR spektroskopisi (Şekil 6) ve yüksek çözünürlüklü kütle spektroskopisi (HRMS) (Şekil 7) kullanılarak karakterize edilmiştir. İlgili sonuçlar materyal metot kısmında verilmiştir. ¹H-NMR spektrumu ve kütle spektroskopisinin sonuçları BOD A1 bileşiğinin başarılı bir şekilde sentezlendiğini göstermektedir.

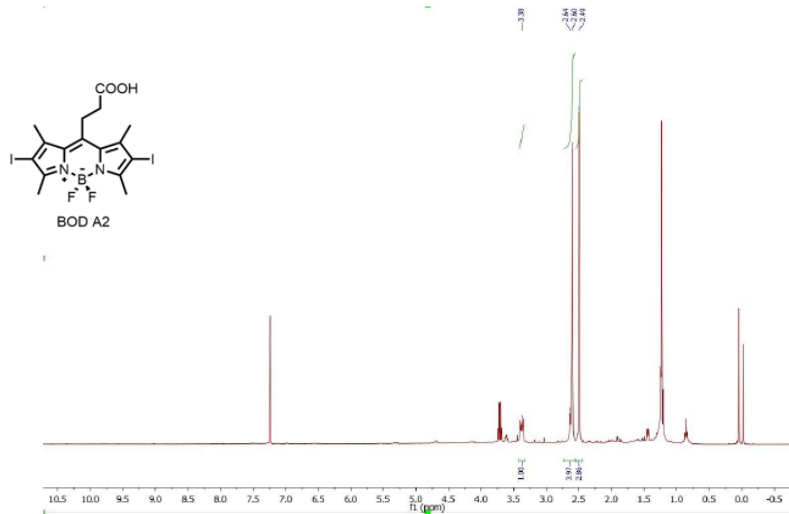


Şekil 6. BOD A1 bileşiğinin ¹H-NMR spektrumu.

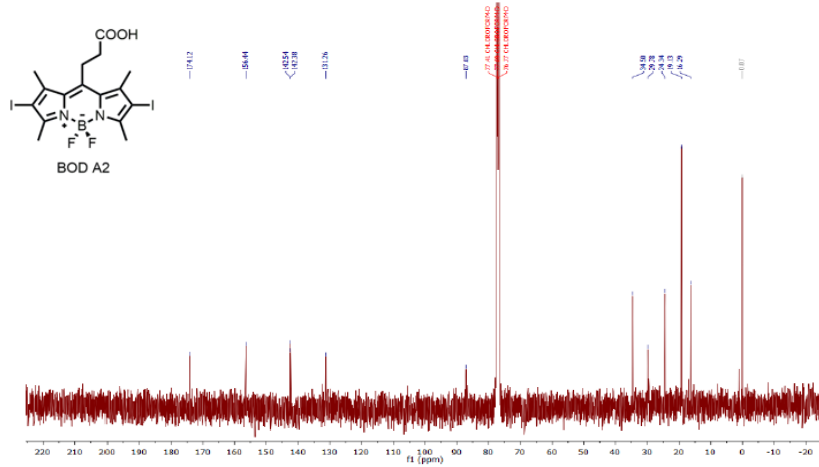


Şekil 7. BOD A1 bileşiğinin kütle spektrumu.

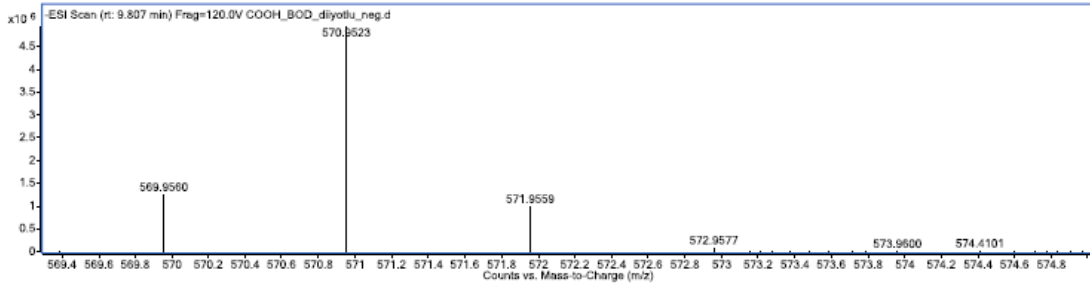
BOD A1 bileşiği bu şekliyle singlet oksijen üretmez ancak bileşiğe iyot gibi bir element eklenirse ağır atom etkisi nedeni ile elde edilen bileşik singlet oksijen üretebilir. Bu yöntem çoğu zaman BODIPY türevi bileşikleri bir PS' e dönüştürmek için sıklıkla tercih edilir. Bu nedenle BOD A1 bileşiğine iyot bağlanarak BOD A2 bileşiği sentezlenmiştir. Bu şekilde sentezlenen BOD A2 bileşiği de yine ¹H-NMR, ¹³C-NMR (Şekil 8, Şekil 9) ve yüksek çözünürlüklü kütle spektroskopisi (HRMS) (Şekil 10) ile karakterize edilmiştir. İlgili sonuçlar materyal metot kısmında verilmiştir. Buna göre BOD A2 bileşiği de başarılı bir şekilde sentezlenmiştir.



Şekil 8. BOD A2 bileşiğinin ¹H-NMR spektrumu.

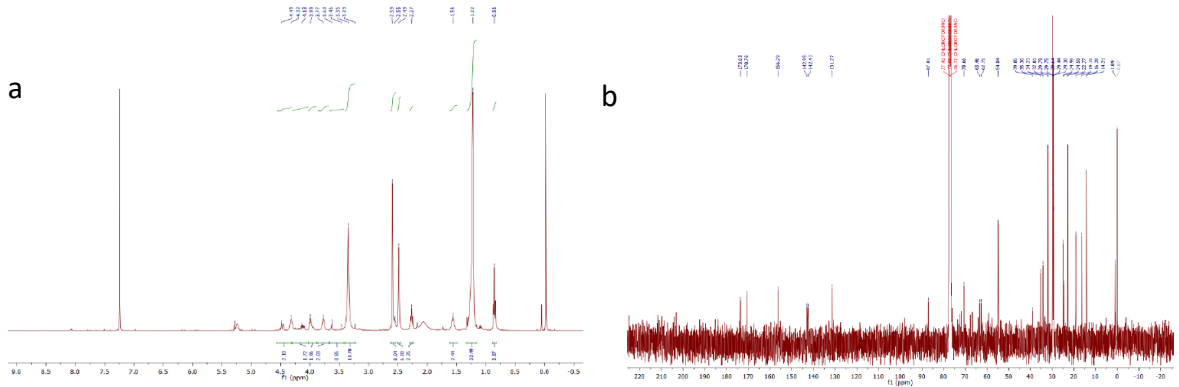


Şekil 9. BOD A2 bileşiğinin ¹³C-NMR spektrumu.



Şekil 10. BOD A2 bileşiğinin kütle spektrumu.

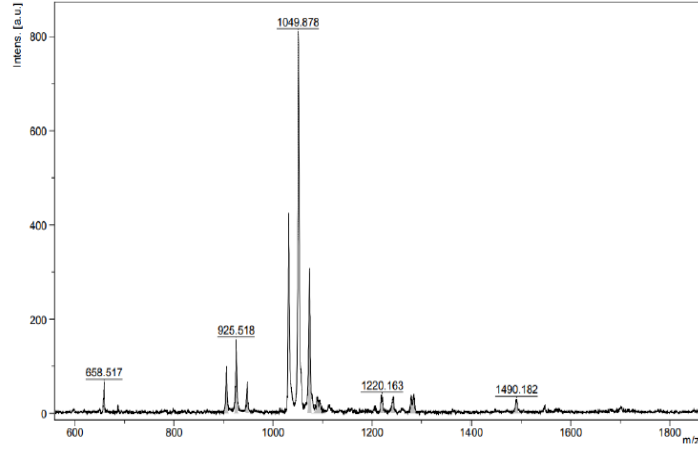
Bu çalışmada PS'lerin sentezlenmesi planlanan lipozomları oluşturan lipit bileşenlerinin bir parçası olarak, lipozomlar tarafından taşınması hedeflenmiştir. Bu amaçla karboksilik asit fonksiyonel grubu taşıyan BOD A2 bileşiği ile EDC, DMAP varlığında lizofosfatidilkolinin hidroksil grubu arasında meydana gelen eşleşme (coupling) reaksiyonu üzerinden bir ester yapısı oluşturularak BOD A2-Lipit konjugatı sentezlenmiştir. BOD A2-Lipit konjugatı da, ¹H-NMR, ¹³C-NMR, MALDI-TOF kütle spektrometresi ve FT-IR spektroskopisi kullanılarak karakterize edilmiştir. İlgili sonuçlar materyal metot kısmında verilmiştir ve BOD A2-Lipit konjugatının ¹H-NMR ve ¹³C-NMR spektrumları literatür ile uyumludur (Cheng ve ark., 2019) (Şekil 11).



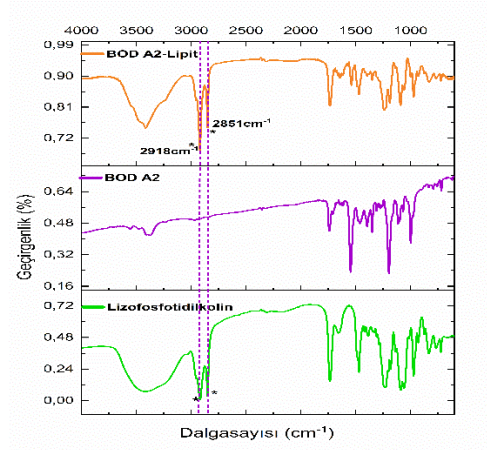
Şekil 11. BOD A2-Lipit konjugatının ¹H-NMR (a), ¹³C-NMR (b) spektrumları.

Yine BOD A2-Lipit konjugatına ait MALDI-TOF kütle spektrumu da (Şekil 12) BOD A2-Lipit konjugatının sentezlendiğini teyit etmektedir. Ayrıca konjugata ait FT-IR spektrumu (Şekil 13) incelendiğinde de BOD A2-Lipit konjugatının, konjugatı oluşturan tüm bileşiklere ait piklerin neredeyse

tamamını içerdiği görülmektedir. Bu sonuçlardan BOD A2-Lipit konjugatının başarılı bir şekilde sentezlendiği anlaşılmıştır.

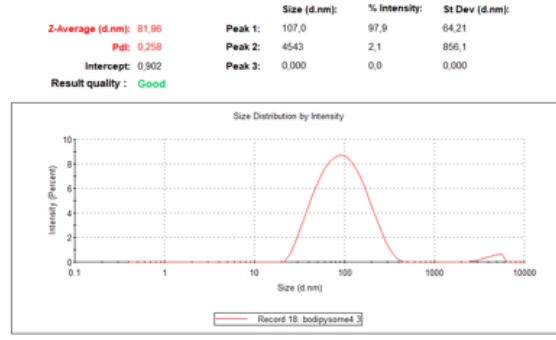


Şekil 12. BOD A2-Lipit konjugatının MALDI-TOF kütle spektrumu.

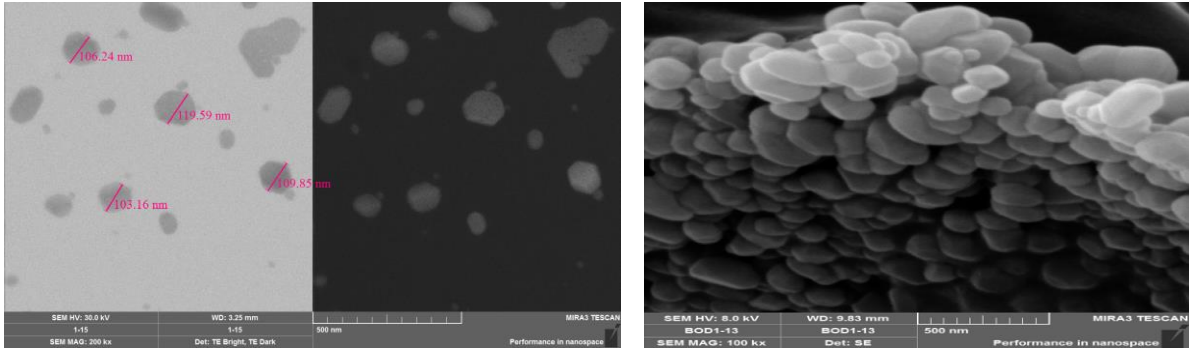


Şekil 13. BOD A2-Lipit konjugatının FT-IR (b) spektrumu.

Çalışmanın nihai hedefi olarak BOD A2-Lipit konjugatından lipozomal yapılar ince film hidrasyon yöntemi kullanılarak sentezlenmişlerdir. Bu lipozomal yapılar sentezlenirken, kullanılan BOD A2-Lipit konjugatı, kolesterol ve DSPE mPEG-2000 bileşiklerinin yüzde oranları ve reaksiyon koşulları çeşitli denemeler yapılarak materyal metot kısmında verildiği gibi optimize edilmiştir. BOD A2-Lipit konjugatından sentezlenmiş olan bu lipozomal yapıların DLS analizi (Şekil 14) lipozomal yapıların ortalama 107 nm boyutunda olduklarını göstermiştir. Ayrıca bu yapıların S-TEM görüntüleri sentezden hemen sonra lipozomlar %2 uranil asetat çözeltisiyle boyanarak alınmış ve lipozomal yapıların oluşumu gözlenmiştir (Şekil 15). Daha sonra bu lipozomlar, bozulmadan saklanması amacıyla sükröz varlığında liyofilize edilerek kurutulmuşlardır. Elde edilen toz haldeki bu lipozomların SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 15). SEM görüntülerinden de lipozomların sentezlendiği açıkça görülmektedir.

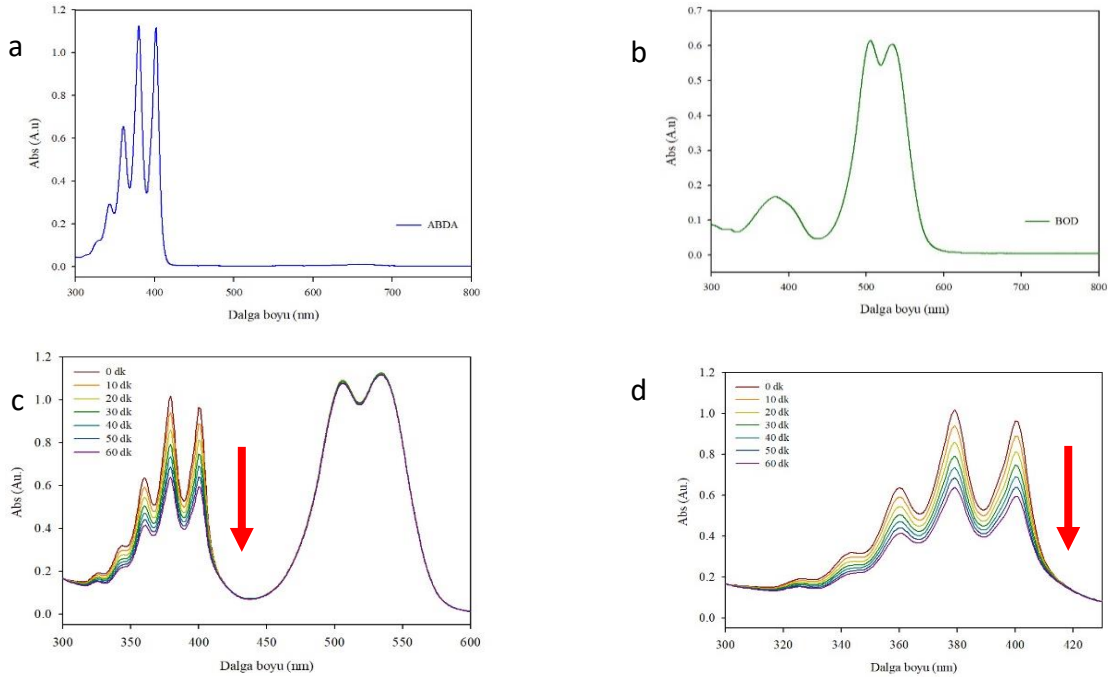


Şekil 14. BOD A2-Lipit konjugatından sentezlenmiş lipozomların DLS analizi.



Şekil 15. BOD A2-Lipit konjugatından sentezlenmiş lipozomların S-TEM ve SEM görüntüleri.

Son olarak BOD A2-Lipit konjugatından sentezlenmiş lipozomların PDT özellikleri araştırılmıştır. Bir tuzak molekülü (ABDA) kullanılan çalışmada, lipozomlar tuzak molekülü varlığında belirli süreler boyunca 530 nm dalga boyundaki LED ışığına maruz bırakılarak tuzak molekülün spesifik absorpsiyon piklerindeki düşüş UV-Vis spektrumunda izlenmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. ABDA tuzak molekülünün (a), BOD A2-Lipit konjugatından sentezlenmiş lipozomların (b) UV-Vis spektrumları. BOD A2-Lipit konjugatından sentezlenmiş lipozomların 10 dk aralıklarla 530 nm dalga boyundaki LED ışığına maruz bırakıldıktan sonra tuzak molekülün absorpsiyondaki düşüşü (c) ve (c) 'de ki spektrumun 300-450 nm dalgaboyu aralığını (d) gösteren UV-Vis spektrumları.

BOD A2-Lipit konjugatından elde edilen lipozomal yapılar bu çalışma ile ilk defa sentezlenmiş ve PDT özellikleri incelenmiştir. PDT özelliğine sahip lipozomlarla ilgili literatürde yapılan çalışmalar sınırlıdır (Derycke ve de Witte, 2004). Bu çalışmada bir PS olan BOD A2 bileşiği ile bir lipit bileşiği konjuge edilmiş ve böylece elde edilen BOD A2-Lipit konjugatından sentezlenen lipozomlar, taşıyıcı bir sistem olarak kullanılmak yerine, kendi PDT özelliğine sahip lipozomal yapılar olarak sentezlenmişlerdir. Böylece lipozomların biyolojik koşullarda göstermiş oldukları avantajları sürdüren ve PS'lerini bünyesinde taşıyan, PDT özelliklerine sahip lipozomlar elde edilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen lipozomlara ait PDT sonuçları değerlendirildiğinde, lipozomların sulu ortamda 530 nm dalga boyundaki LED ışığına maruz kaldıklarında singlet oksijen oluşturarak PDT özelliğine sahip oldukları belirlenmiştir. Genellikle PDT'de kullanılan PS'ler ile ilgili başlıca sorunlardan biri de bunların fizyolojik koşullarda çalışmaması veya düşük verime sahip olmalarıdır. İlk defa BOD A2-Lipit konjugatından elde edilen lipozomların sulu ortamda PDT özelliklerine sahip oldukları da belirlenmiştir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada BODIPY türevi bir PS ile fonksiyonlandırılmış yeni bir lipit konjugatı sentezlenmiş ve bu lipit konjugatından da lipozomal yapılar elde edilmiştir. Ayrıca sentezlenen BODIPY-Lipit konjugatı bu çalışma ile ilk kez sentezlenmiştir. Böylece bu BODIPY-Lipit konjugatlarından elde edilen lipozomlar da BODIPY türevi bir PS'yi taşıyan lipit bileşiklerinden sentezlendikleri için son derece özgündürler. Ayrıca bu lipozomlar PDT uygulamaları ile birlikte ilaç taşıyıcı sistemler olarak da yeniden tasarlanabilirler. Bu bakımdan bu çalışma ile elde edilen lipozomların son derece umut verici özelliklere sahip oldukları düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı 121Z810 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abrahamse, H., & Hamblin, M. R. (2016). New photosensitizers for photodynamic therapy. *Biochemical Journal*, 473(4), 347-364.
- Ambroz, F., Donnelly, J. L., Wilden, J. D., Macdonald, T. J., & Parkin, I. P. (2019) Carboxylic acid functionalization at the meso-position of the bodipy core and its influence on photovoltaic performance. *Nanomaterials*, 9(10), 1346.
- Cakmak, Y., Kolemen, S., Duman, S., Dede, Y., Dolen, Y., Kilic, B., Kostereli, Z., Tatar Yildirim, L., Dogan, A. L., Guc, D. & Akkaya, E. (2011). Designing excited states: theory-guided access to efficient photosensitizers for photodynamic action. *Angewandte Chemie-International Edition*, 50(50).
- Cheng, M. H., Harmatys, K. M., Charron, D. M., Chen, J., & Zheng, G. (2019) Stable J-Aggregation of an aza-BODIPY-Lipid in a Liposome for Optical Cancer Imaging. *Angewandte Chemie - International Edition*, 58(38), 13394–13399.
- Correia, J. H., Rodrigues, J. A., Pimenta, S., Dong, T., & Yang, Z. (2021). Photodynamic therapy review: principles, photosensitizers, applications, and future directions. *Pharmaceutics*, 13(9), 1332.
- Derycke, A. S., & de Witte, P. A. (2004). Liposomes for photodynamic therapy. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 56(1), 17-30.
- Ion, R. M. (2000). Porphyrins for tumor destruction in photodynamic therapy. *Current Topics in Biophysics*, 24(1), 21-34.
- Jin, C. S. (2015). Porphyrin-based Nanostructure-Dependent Photodynamic and Photothermal Therapies, PhD Thesis, University of Toronto, Canada.
- Jin, C. S., Lovell, J. F. & Zheng, G. (2013). One minute, sub-one-watt photothermal tumor ablation using porphyrins, intrinsic multifunctional nanovesicles. *Journal of Visualized Experiments*, (79), 1–6.
- Kamkaew, A., Lim, S. H., Lee, H. B., Kiew, L. V., Chung, L. Y., & Burgess, K. (2013). BODIPY dyes in photodynamic therapy. *Chemical Society Reviews*, 42(1), 77-88.
- Li, Q., Li, Y., Min, T., Gong, J., Du, L., Phillips, D. L., ... & Tang, B. Z. (2020). Time-dependent photodynamic therapy for multiple targets: a highly efficient AIE-active photosensitizer for selective bacterial elimination and cancer cell ablation. *Angewandte Chemie*, 132(24), 9557-9564.
- Lim, S. H., Thivierge, C., Nowak-Sliwinska, P., Han, J., van den Bergh, H., Wagnieres, G., ... & Lee, H. B. (2010). In vitro and in vivo photocytotoxicity of boron dipyrromethene derivatives for photodynamic therapy. *Journal of Medicinal Chemistry*, 53(7), 2865–2874.
- Liu, X. Y., Ruan, L. M., Mao, W. W., Wang, J. Q., Shen, Y. Q., & Sui, M. H. (2010). Preparation of RGD-modified long circulating liposome loading matrine, and its in vitro anti-cancer effects. *International Journal of Medical Sciences*, 7(4), 197–208.

- Lombardo, D., & Kiselev, M. A. (2022). Methods of liposomes preparation: Formation and control factors of versatile nanocarriers for biomedical and nanomedicine application. *Pharmaceutics*, 14(3), 543.
- Loudet, A., & Burgess, K. (2007). BODIPY dyes and their derivatives: syntheses and spectroscopic properties. *Chemical Reviews*, 107(11), 4891-4932.
- Lovell, J. F., Jin, C. S., Huynh, E., Jin, H., Kim, C., Rubinstein, J. L., ... & Zheng, G. (2011). Porphysome nanovesicles generated by porphyrin bilayers for use as multimodal biophotonic contrast agents. *Nature Materials*, 10(4), 324– 332.
- Niu, C. & Aisa, H. A. (2017). Upregulation of melanogenesis and tyrosinase activity: potential agents for vitiligo. *Molecules*, 22(8), 1303.
- Nsairat, H., Khater, D., Sayed, U., Odeh, F., Al Bawab, A., & Alshaer, W. (2022). Liposomes: Structure, composition, types, and clinical applications. *Heliyon*, 8(5).
- Robertson, C. A., Evans, D. H., & Abrahamse, H. (2009). Photodynamic therapy (PDT): a short review on cellular mechanisms and cancer research applications for PDT. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 96(1), 1-8.
- Simões, J. C., Sarpaki, S., Papadimitroulas, P., Therrien, B., & Loudos, G. (2020). Conjugated photosensitizers for imaging and PDT in cancer research. *Journal of Medicinal Chemistry*, 63(23), 14119-14150.
- Sun, B., Lovell, J. F., & Zhang, Y. (2023). Current development of cabazitaxel drug delivery systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 15(2), e1854.
- Treibs, A., & Kreuzer, F. H. (1968). Difluorboryl-komplexe von di-und tripyrrylmethenen. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 718(1), 208-223.
- Watson, H. (2015). Biological membranes. *Essays in Biochemistry*, 59, 43-69.

Research Article

Defects Detection at Additive Manufacturing by Convolutional Deep Learning

 Reza Lotfinejad,  Asghar Zajkani*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

* Corresponding Author: zajkani@eng.ikiu.ac.ir

Article Info:

Received: 01/05/2024, Received in revised form: 03/06/2024, Accepted: 09/06/2024.

ABSTRACT

Additive manufacturing technologies present a wide array of benefits, including the capacity to manufacture components with complex geometric forms, reduced production expenses, minimized material usage, and time efficiency. This research constitutes a significant effort to pinpoint geometric defects and dimensional irregularities as well as surface quality imperfections in the Fused Deposition Modeling process through the development of a deep learning model utilizing multi-scale convolutional neural networks. The proposed methodology encompasses three distinct scales, each capable of identifying defects of varying dimensions. The model underwent extensive hybridizing procedures for precisely training through diverse datasets, and the training process is repeated numerous times until the desired level of accuracy was attained. A sufficiently extensive image datasets are employed to train the models, leading to the precise calibration of the network. As a result, the necessity for prolonged time and intricate computations to identify large-scale defects is eliminated. The highest validation accuracy for defect detection in this study reached 94%.

Keywords: Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Multiscale Convolutional Neural Network, Deep Learning, Defect Detection.

Katkı Üretiminde Evrimsel Derin Öğrenme ile Kusur Tespiti

ÖZET

Eklemeli üretim teknolojileri, karmaşık geometrik formlara sahip bileşenleri üretme kapasitesi, azaltılmış üretim giderleri, minimum malzeme kullanımı ve zaman verimliliği dahil olmak üzere çok çeşitli avantajlar sunar. Bu araştırma, çok ölçekli evrimsel sinir ağlarını kullanan bir derin öğrenme modelinin geliştirilmesi yoluyla Erimiş Biriktirme Modelleme sürecindeki geometrik kusurların ve boyutsal düzensizliklerin yanı sıra yüzey kalitesi kusurlarının tespit edilmesi için önemli bir çaba oluşturmaktadır. Önerilen metodoloji, her biri farklı boyutlardaki kusurları tanımlayabilen üç farklı ölçeği kapsamaktadır. Model, çeşitli veri kümeleri aracılığıyla hassas bir şekilde eğitilebilmesi için kapsamlı hibridizasyon prosedürlerinden geçirildi ve eğitim süreci, istenen doğruluk düzeyine ulaşıncaya kadar birçok kez tekrarlandı. Modelleri eğitmek için yeterince kapsamlı bir görüntü veri kümeleri kullanılır ve bu da ağın hassas kalibrasyonuna yol açar. Sonuç olarak, büyük ölçekli kusurları tespit etmek için uzun süreye ve karmaşık hesaplamalara duyulan ihtiyaç ortadan kalkar. Bu çalışmada kusur tespiti için en yüksek doğrulama doğruluğu %94'e ulaştı.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli Üretim, Birleştirilmiş Biriktirme Modelleme, Çok Ölçekli Evrimsel Sinir Ağı, Derin Öğrenme, Kusur Tespiti.

I. INTRODUCTION

Today, the demand for systems capable of autonomous decision-making has increased significantly due to technological advancements. However, this challenge has proven to be quite formidable for humans, who have been diligently working to address it for many years. While researchers have made notable strides in automation, developing systems with the capacity for human-like logical decision-making has remained a formidable task. As a result, the emulation of neural processes has served as a source of inspiration, leading to the advancement of artificial intelligence (AI) within the scientific community. Concurrently, given the critical importance of producing complex industrial components and the limitations of additive manufacturing (AM) in certain instances, there has been a heightened emphasis on the utilization of Machine learning (ML) for in-situ defect detecting and controlling (Gunasegaram et al., 2024; Westphal and Seitz, 2021; Qin et al., 2022). Additive printing is defined as a group of layer-by-layer manufacturing processes controlled by a CAD model (Kawalkar et al., 2022; Gibson, 2015). Despite the progress made in this field, it continues to face inherent shortcomings and deficiencies, which, despite its numerous advantages, have hindered its widespread adoption in certain industries. In essence, these limitations have restricted the application of additive printing within specific industrial sectors. Consequently, addressing these challenges has the potential to significantly expand the scope of this scientific field and offer solutions to numerous industrial problems (Jin et al., 2021). ML optimizes a performance measure by using a software platform and information that obtained in the past (Alpaydm, 2014).

It is clear that low geometric accuracy and low quality surface are ignorable defects of additive printing parts (Grasso and Colosimo, 2017). These geometric defects hindered the applications of additive printing in several industries such as aerospace and medical industries (Mahesh et al., 2004). In this case, machine learning models can identify geometric defects, measure the geometric deviation and carry out geometric error compensation (Francis and Bian, 2019; Gui et al., 2022; Feng et al., 2022). The basic CAMP-BD model using the convolutional neural network and artificial neural network was introduced to predict additive printing using big data (Francis and Bian, 2019). Decision trees (Quinlan, 1986) are a common type of machine learning algorithm for classification tools. Support vector machines are designed to deal with binary classification problems (Cortes and Vapnik, 1995), but they can also be generalized to multi-class problems (Hsu and Lin, 2002). The neural network known as convolutional neural network is designed to deal with problems with images (Krizhevsky et al., 2012). Meanwhile, regularization is a process that simplifies a machine learning model by adding information during training (Bühlmann and Van De Geer, 2011; James et al., 2023).

Petsiuk et al. have produced an 88x88 mm printing plate with 8 rows and 8 columns to serve as a reference frame for the camera. Their model includes a feature that stops printing if critical deviations are detected and applies corrective measures in G-code if the printing process can be rectified. Their research has shown that the calculated position of the camera enables a one-to-one correlation between the Euclidean points recorded in G-code or in the STL model and the planar image points captured by the camera through image transfers. Their Python-developed software analyzes the G-code from the source, segments it into layers, and partitions the extruder paths into various branches, such as the filling portion, outer layer, inner walls, and support, to effectively manage the printing process. The categorization of G-code paths depends on the software algorithm used. Discrepancies within the STL model can extend to several millimeters, rendering it unreliable for this purpose, improved this problem with G-code coordinates as a reference point for positioning (Petsiuk and Pearce, 2020).

Alternately, reinforcement learning deals with teaching how to map situations to actions to maximize the value of a numerical reward signal (Xu et al., 2018), in applications such as chess games and self-driving cars. Articles have been published regarding recent applications of machine learning in additive printing (Qi et al., 2019; Patel, 2019).

Nevertheless, the utilization of a reduced number of cameras, as long as they are capable of supporting multi-view capture, leads to a decrease in computational load, eliminates the need to synchronize two images, and reduces hardware costs. At the same time, the determination of discrepancies between the real external surface and the reference boundary lines is accomplished by employing MTM and ICP algorithms. Rui Li et al. introduced a model that involved the real-time capture of images by a camera and subsequent generation of point clouds corresponding to the printed layer. These point clouds were then compared with those generated from the 3D mesh of the original design file using the ICP method, thereby enabling the identification of differences and error values. In cases where the error value surpassed the predefined threshold, the printing process was halted. The model was trained using hemispherical defects of approximately 2 mm in diameter,

which were applied to defect-free areas, and an AI algorithm was employed to compare healthy and defective segments (Li, 2022).

Petsiuk and Pearce also used a camera to record images during the printing process. In that research, each image was divided into smaller areas and cells, and a gradient histogram of directions was created for the pixels inside each cell. To improve the accuracy of the model, the generated histograms were normalized to the contrast mode by calculating a value to normalize all the cells within the block. This normalization results in better invariance for changes in brightness and shading. Each histogram bar is associated with an image gradient slope angle ranging from 0 to 180 degrees. The amount of deviation is determined by comparing the histogram of the image taken from the part being printed and the reference histogram. In this model, 70% of the deviation threshold value is considered permissible (Petsiuk and Pearce, 2022).

Ero et al. proposed a machine learning-based approach using optical tomography data to identify lack of fusion and keyhole porosity. Our method employs a self-organizing map and a custom U-Net model to predict porosity effectively across different process parameters, validated through experiments and CT scanning. This approach effectively predicts porosity caused by lack of fusion or keyhole, demonstrating its potential for in-situ monitoring and quality assurance (Ero et al., 2023).

Minetola et al. placed a camera perpendicular to the build plane. By capturing images of each layer and meticulously comparing them with reference images at the pixel level, defective layers can be identified. The slicer then generates the G-code file for standard operation based on the layer thickness and print parameters, without the need for process monitoring. Subsequently, the MATLAB program parses the G-code file, processing each line and command. It is worth noting that while this model adheres to economic principles, it may not deliver the highest levels of accuracy and speed (Minetola et al., 2022). Decker and Huang employed triangular mesh data to utilize machine learning for predicting geometric accuracy in additive printing. Specifically, the 8 predictor variables computed for each vertex on the triangular mesh facilitate a direct correlation between the predictor variables and Y deviation at each vertex. The model was trained using three shapes, while a geometrically distinct shape was employed for validation. The calculation of the distance between each corner in the triangular mesh and the scanned 3D point cloud, along with the utilization of the Iterative Closest Point (ICP) method, serves as a means to compute shape deviation. Ultimately, within the dimensional accuracy range of [-0.15, 0.15], the model achieved an accuracy rate of 83.7% (Decker and Huang, 2019).

Brion and Pattinson have made significant strides in the realm of generalizable 3D printing error detection and correction through the utilization of neural networks. Their work involved the development of an extensive dataset comprising 1.2 million images, with a focus on 192 distinct parts labeled with specific print parameters. The model captured images of the nozzle tip at predetermined intervals, considering four crucial parameters: flow rate (printing), lateral speed of extruder, vertical distance of nozzle from printing bed, and material heating temperature. Furthermore, the method facilitates the connection and control of 3D printers through a network, fostering diverse data collection and collaborative learning. Notably, the adoption of the Resnet network architecture has yielded an accuracy of 82.1% in this model (Brion and Pattinson, 2022). Huang et al. have developed a non-contact instantaneous 3D laser profilometer system for visual surface defect monitoring. In their research, the 3D point cloud is initially transformed into a 2D topographical image. Subsequently, surface defects are discerned through pixel classification using the Support Vector Machine (SVM) algorithm. Beyond identifying surface bumps and depressions, the proposed methods also accurately detect small pore defects at the pixel level. This is a significant advancement for automatic quality assessment and process control in wire arc additive manufacturing (Huang et al., 2022).

In this research, the problem of dimensional accuracy, appearance and geometry of 3D printer parts has been solved by using multi-scale deep learning method. Due to the use of multiple scales and the definition of suitable pixels of the desired scale as input image, we can achieve the appropriate dimensional and geometric accuracy. On the other hand, the definition of a comprehensive dataset, in which all the appearance and dimensional defects are taken into account, has made the accuracy of the present research reach a very suitable value. Therefore, the presented model has the ability to detect defects of printed parts with high accuracy.

II. RESEARCH METHOD

In our model has been used conv-net architecture and optimized by Keras tuner. This model has been created using the complete dataset, which consists of about 33,000 images, half of which are the image of the healthy part and the other half of the defective part.

In other words, by presenting a multi-scale model compared to the researches done by others in this field, the process of detecting defects has been done by optimizing time, according to the dimensions of the desired defect. These defects detect by DL model created that trained by strong dataset.

If this model is implemented on a 3D printer, the images received from the part being printed will be entered into this model. Then these images are passed through convolutional filters by the appropriate scale according to the size of the desired defect. The trained model detects the desired defect and stops the printing process by giving an alarm if it exceeds the considered tolerance range.

The following research introduces a multi-scale AI model designed to identify printing defects in additive manufacturing parts. The design parameters of the generated model are set by the Keras Tuner library. This model is trained by using a combination of three categories of dataset. Finally, after training, this model will be able to recognize the defects shown in Table 1.

Table 1. Types of printing defects

Type of defect	Defect
Surface Defects	surface roughness
	Stringing
	Separation of layers
	Extra bump on the surface
	Holes on the surface
Internal Defects	Low density and irregular appearance of infill
Geometrical Defects	Distortion
	Deformation

According to the desired level of accuracy in detecting defects, the corresponding input batch size is used. In this way, defects with larger dimensions would be detected in less time. Training the model to detect defects with larger dimensions will take less time.

If the software model is implemented on the Raspberry Pi board, it will imbue the 3D printer with intelligent capabilities. Subsequently, as depicted in Figure 1 and Figure 2, the camera captures images of the item being printed, and the model assesses whether it is flawed or sound. In the event of a defect, the printing process is halted.

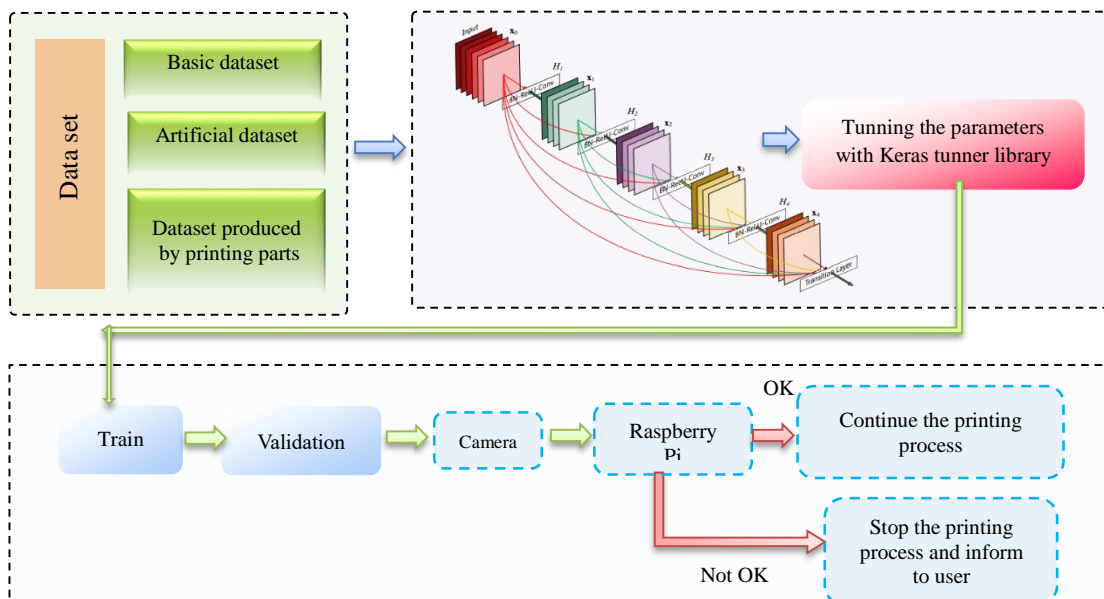


Figure 1. The overall defect detection process

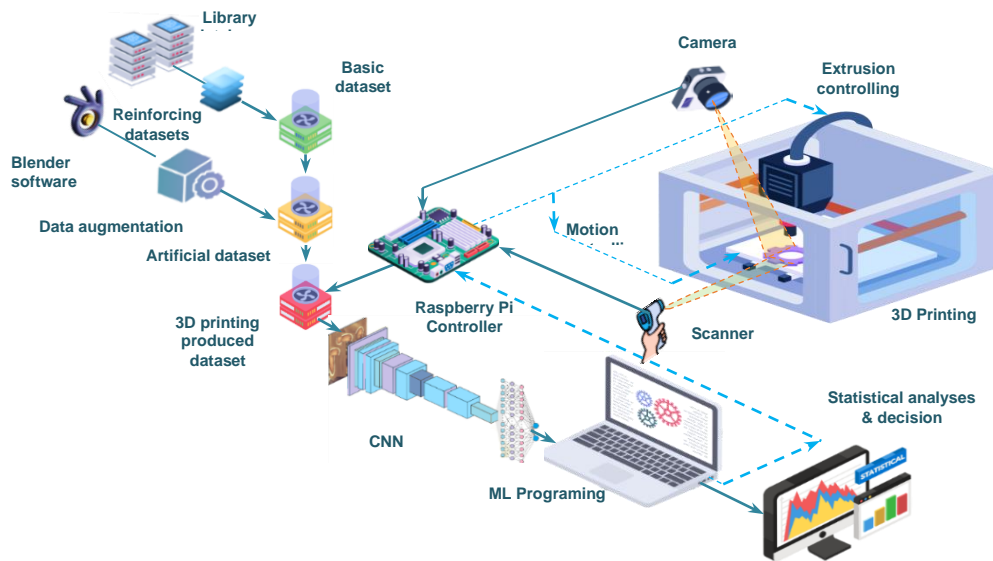


Figure 2. The illustration of defect detection process by means of a multi-scale convolutional deep learning model; dash lines in the flowchart contribute the feedback directions and controlling paths

In this study, a supercomputer was utilized for model training. The coding process involved the use of Python programming language and AI libraries such as Keras and Keras tuner for the optimal configuration of hyperparameters. The model was trained using Conv-net convolutional neural network with image dataset. Upon achieving the desired level of training and high accuracy in the validation process, the model was subsequently presented.

III. DATA SET GENERATION

The dataset comprises approximately 33,000 photos and incorporates data augmentation techniques. These methods enable the model to uphold its diagnostic performance across various conditions, while also saving time and resources. Essentially, through the implementation of these methods, a substantial dataset is generated with minimal model iterations, ensuring optimal training of the desired model. The dataset is structured into three distinct parts:

- a) Basic dataset:

It is helpful to use the dataset of research conducted by other researchers in this field. In this research, in order to make the generated dataset more powerful and to be able to recognize the model more accurately, a series of reinforcement datasets from other researches have been used [29]. This data set is shown in Figure 3.

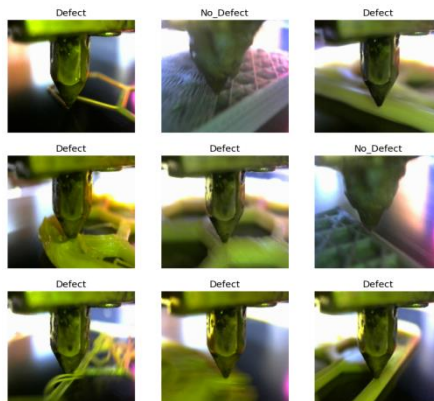


Figure 3. Basic dataset (Brion and Pattinson, 2022)

- b) Artificial dataset:

In this approach, models are constructed using sophisticated software designed for the creation of 3D models and artificial datasets. The research utilizes Blender, a widely recognized software tool that has been employed by other researchers for dataset generation. The Figure 4 shows some of these models that were created by Blender software.

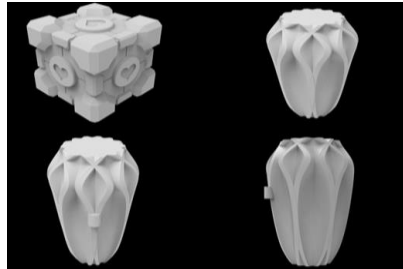


Figure 4. Some models created by the Blender software to make the data more powerful

A set of these models has been created and has made the basis of research data more powerful. Some of defects added to these models so they created the defective part of the dataset. In this way, some defects have been trained to the model.

- c) Dataset produced by printing parts:

The third portion of the generated dataset is acquired through the utilization of imaging during the printing of parts, and employing the data augmentation method to enhance the quantity of captured images shown in Figure 5.

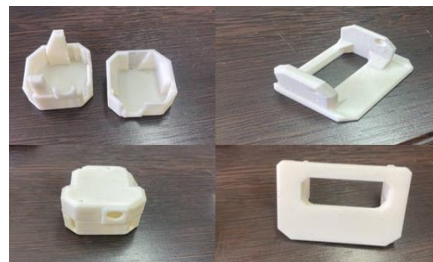


Figure 5. Some of printed parts that used for dataset generation

One of the techniques employed involves the utilization of data augmentation methods. These methods enable the model to sustain its diagnostic performance across various conditions. Furthermore, the implementation of these methods results in time and cost savings.

Multi-scale model

In this section, we will introduce multi-scale models designed to enhance detection capabilities across various scales and to reduce the computational burden of AI models. By employing filters and kernels of varying sizes, multi-scale models efficiently extract relevant features from images, irrespective of their distance from the camera frame, dimensions, and other characteristics. The model under review is segmented into three sections with input dimensions of 25x25, 75x75, and 180x180. To more accurately assess the merits of the proposed design, each scale is individually scrutinized through the calculation of accuracy metrics for defect detection.

*Model with input size of 25*25*

The smallest dimension of the filter defined in this multi-scale model is the model with the input size of 25x25. This mode is suitable for detecting errors with larger dimensions and images in which the target object is very close to the camera lens. The layering of this network in Figure 6 is shown.

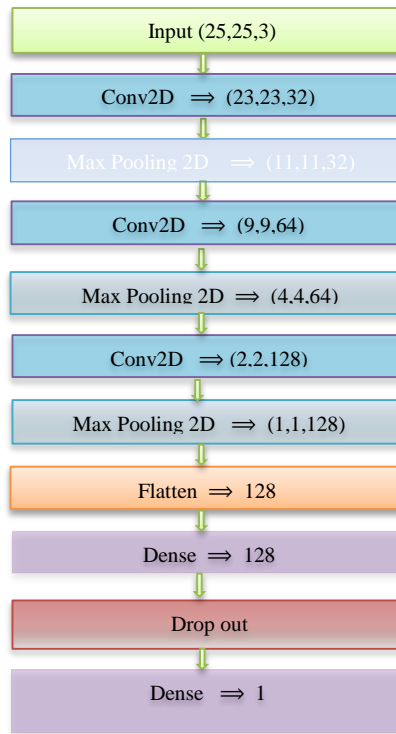


Figure 6. Network Architecture (input dimensions: 25*25)

Even though the input images and datasets contain fewer pixels in this instance, significant reductions in processing time and improved defect and object detection are observed. Consequently, the processing time for identifying defects in large objects with substantial defects is notably decreased compared to previous models. In Figure 7 the resolution of dataset images in this model are given.

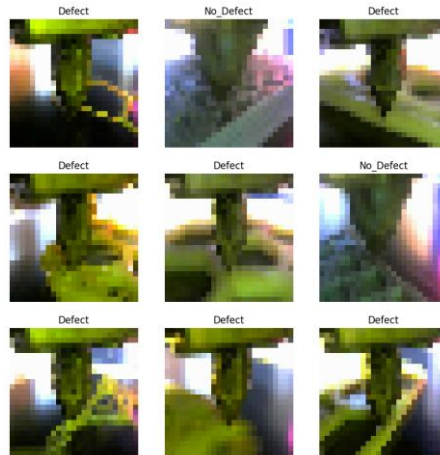


Figure 7. Network resolution with an input size of 25*25

The architectural design of this model illustrates the input process, wherein an image with dimensions of 25x25 is fed into the network for processing. Subsequently, the image undergoes transformation through convolutional layers with varying kernel dimensions, resulting in a vector of size 128 within the Flatten layer. The reduction in input image size significantly decreases the computational load on the network, ultimately leading to a reduction in prediction time. This reduction in size, on the other hand, reduces the resolution of the images, so this model is suitable for detecting defects with a defined scale. Results are illustrated in Figure 8.

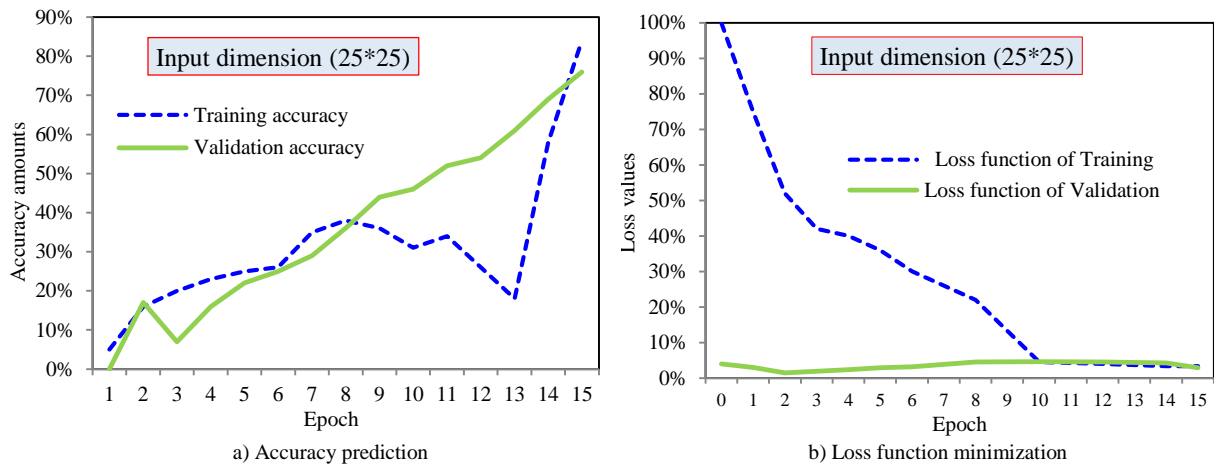


Figure 8. a) Accuracy and b) Loss function diagrams of multiscale model training and validation (input dimensions: 25x25)

It can be seen from the diagram in Figure 8 that:

1. The reduction in input size has facilitated the model's attainment of the appropriate stage of training during subsequent iterations.
2. The training accuracy of the model has progressively improved, reaching 37% by the seventh iteration. Subsequently, a significant surge in accuracy was observed, culminating in a remarkable 84% accuracy by the 15th iteration.
3. Notably, the validation accuracy exhibited a steep incline from the twelfth iteration, ultimately achieving a commendable 76% upon completion of network training.
4. Analysis of the training and validation error graphs reveals a marked decline in error slope during the initial three iterations, followed by stabilization at its minimum value from the fourth iteration onwards.
5. The training loss function has ultimately converged to zero, signifying a highly favorable outcome. Furthermore, the validation loss function has a notably acceptable value about 3%.

Model with input size of 75x75

The second scale defined in the presented multiscale model is characterized by an input size of 75x75. At this scale, a greater level of detail is discerned compared to the previous scale. Consequently, as processing time increases, the accuracy of defect detection also improves, enabling the identification of defects with smaller dimensions. According to the diagram in Figure 9, we can point out:

1. The accuracy of the training process has notably increased by a considerable margin up to the third iteration, reaching approximately 55%. However, a divergence becomes evident as the education process continues.
2. It is crucial to note that when the training process exhibits divergence or fluctuation in accuracy, it is imperative for the process to persist until stability is achieved in the diagram.
3. Upon attaining relative stability in the training process diagram, the process was concluded, and the model's training was finalized. Upon completion of the training process, the accuracy reached 76%, with the validation accuracy reaching 94%. This indicates the model's capability to detect defects of smaller dimensions than the 25x25 scale.

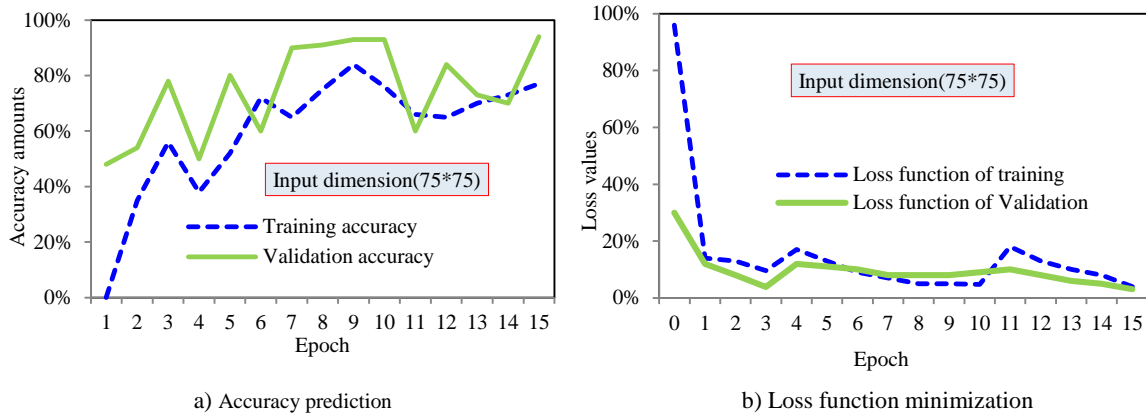


Figure 9. a) Accuracy and b) Loss function diagrams of multiscale model training and validation (input dimensions: 75*75)

*Model with input dimensions of 180*180*

The last dimensional scale considered is the 180x180 scale. This scale also is used for one scale model and using it, comparisons are made that has been shown in Figure 10 and Figure 11.

In this model, the precision of defect detection is significantly enhanced, allowing for the detection of smaller defects. The input filter dimensions are specifically defined to detect the smallest defects in terms of geometry, dimensions, and surface quality. According to the diagram in Figure 12, it can be concluded that:

1. In the first five training repetitions, there was a sharp increase in training accuracy. From the sixth to the fifteenth repetition, this upward trend showed a more gradual slope, resulting in an 86% training accuracy.
2. The validation process's trajectory depends on the training mode. Notably, the validation accuracy exceeded the training accuracy from the sixth iteration onwards, ultimately reaching 94% accuracy.
3. Upon analyzing these graphs, it becomes clear that despite the longer processing time associated with this scale compared to smaller input batch sizes, it is well-suited for detecting smaller errors. Consequently, if the intended application is significant, the use of this approach is recommended.

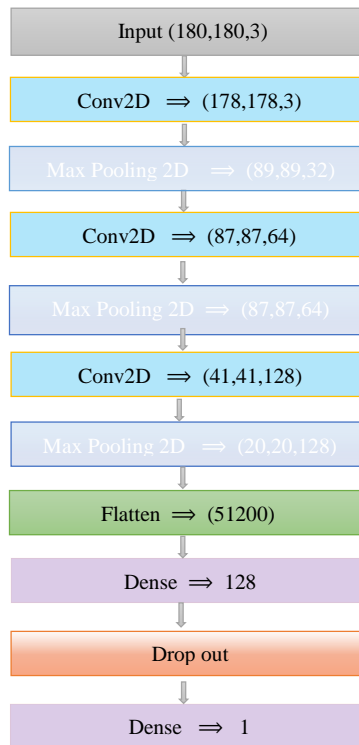


Figure 10. Network Architecture (input dimensions: 180*180)

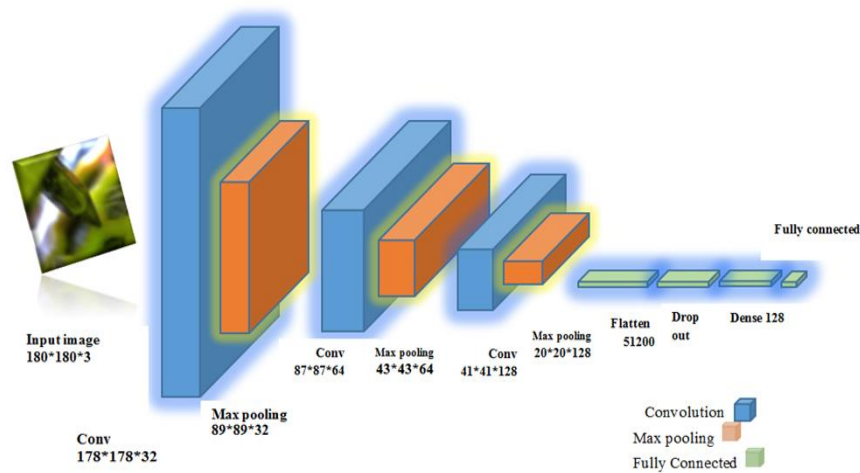


Figure 11. The CNN architecture (with input dimension 180*180)

The network resolution of this model (with input dimensions 180*180) is shown in Figure 13.

IV. COMPARISON OF MULTI-SCALE AND SINGLE-SCALE MODELS

In this section, we delve into the comparison between multi-scale and single-scale models. The comparison involves the use of charts and comparison factors of AI models, including the crucial element of time.

Based on the research, we proceed to investigate the strengths and weaknesses of the multi-scale model. Subsequently, a conclusion is drawn regarding the model's suitability for use. The advantages of employing a multi-scale model are as follows:

The presented multi-scale model can effectively utilize a scale with an appropriate input batch size based on the dimensions of the desired defect, thereby significantly reducing the time required for defect detection. This eliminates the necessity of inputting high-resolution images with specific dimensions, thus streamlining the processing and diagnosis of defects with larger dimensions.

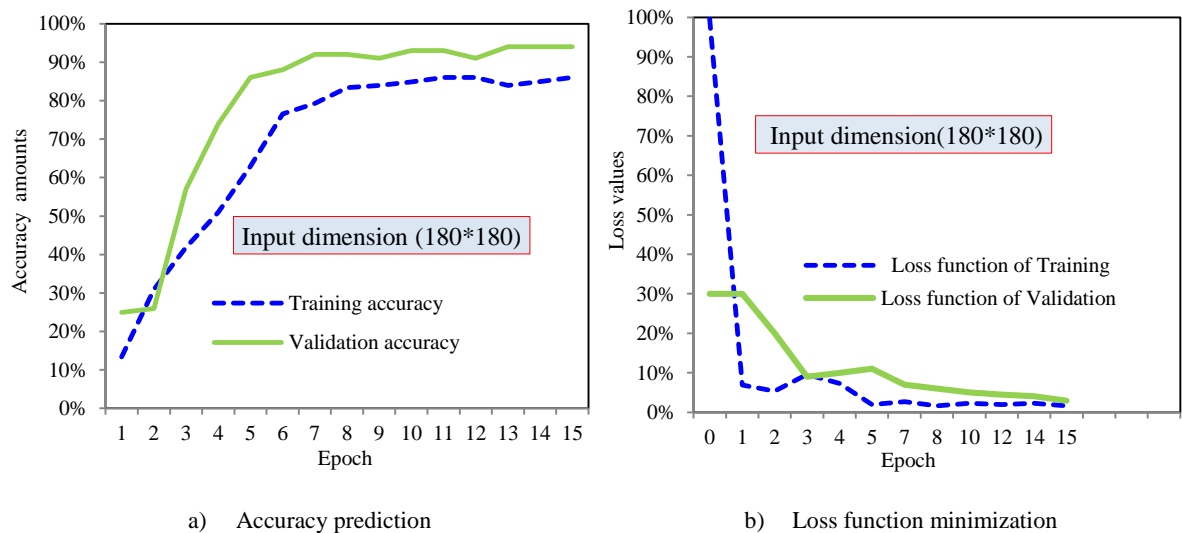


Figure 12. a) Accuracy and b) Loss function diagrams of multiscale model training and validation (input dimensions: 180*180).

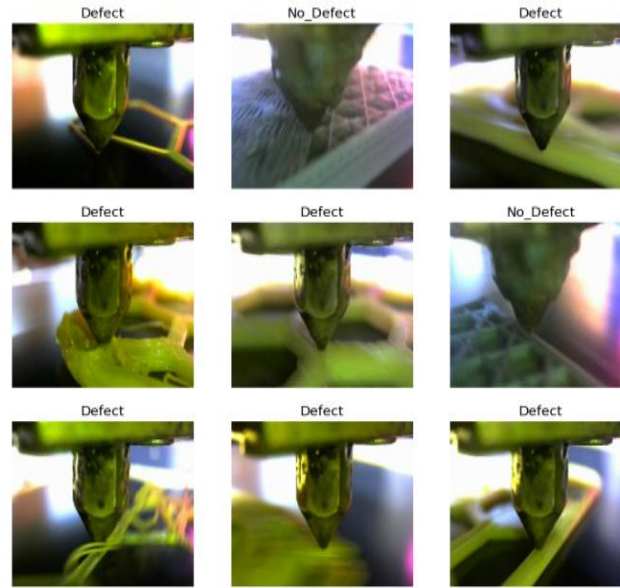


Figure 13. Network resolution of multi-scale model (input dimensions 180*180)

1. According to Table 2, the presented multi-scale model demonstrates accuracies of 76%, 93%, and 94% for scales with input batch sizes of 25x25, 75x75, and 180x180, respectively. Notably, these values correspond to the highest defect detection accuracy, with 94% accuracy matching that of the single-scale model. Consequently, the multi-scale model can achieve parity with the single-scale model in detecting small-sized defects, thereby exhibiting no weakness in this regard.
2. The multi-scale model excels in efficiently recognizing images captured at varying distances from the camera lens, a task where the single-scale model encounters processing errors due to its reliance on a single scale for all images. In contrast, the multi-scale model adeptly addresses this issue, ultimately leading to higher accuracy in predictions.

The primary concern associated with using the multi-scale model lies in identifying the correct scale. Failure to recognize the scale corresponding to the dimensions of the desired input image may lead to two potential problems:

- Selecting a model with input dimensions exceeding the optimal state results in less efficient detection and consequently, a longer processing time.
- Opting for a model with input dimensions below the optimal state poses the risk of failing to detect the desired defect.

Upon considering the aforementioned scenarios and the comparisons presented in Table 2, it becomes evident that leveraging the multi-scale model confers numerous advantages to our model, effectively contributing to optimizing the final conclusion and the time factor.

Table 2. Comparison of single-scale and multi-scale models accuracy

Model	Input batch size	Training time (hr.)	Validation accuracy	Training accuracy	Detect ability
Multi Scale	25*25, 75*75 and 180*180	2	76%	94%	Excellent
		6	93%	76%	
		11	94%	86%	
One Scale	180*180	12	94%	86%	Good

V. CONCLUSION

In the present study, we have employed multiscale convolutional neural networks for the purpose of defect detection in components manufactured by FDM 3D printers. Through the utilization of convolutional network training with generated datasets, the model has demonstrated the capability to identify dimensional, appearance, and surface quality defects. A multi-scale model has been implemented to identify defects of varying dimensions. The design parameters of the generated model have been established using the Keras Tuner library. Furthermore, the utilization of this model has enhanced the capacity to identify defects at varying distances from the camera lens. This model is presented across three scales: 25x25, 75x75, and 180x180. While scales with

lower input dimensions exhibit reduced detection accuracy, they require significantly less time for training and diagnosing faults.


REFERENCES

- Alpaydin, E. (2014). *Introduction to Machine Learning, (Adaptive Computation and Machine Learning)*. almohrerladbi.
- Brion, D. A., & Pattinson, S. W. (2022). Generalisable 3D printing error detection and correction via multi-head neural networks. *Nature communications*, 13(1), 4654.
- Bühlmann, P., & Van De Geer, S. (2011). *Statistics for high-dimensional data: methods, theory and applications*. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20, 273-297.
- Decker, N., & Huang, Q. (2019, June). Geometric accuracy prediction for additive manufacturing through machine learning of triangular mesh data. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 58745, p. V001T02A043). American Society of Mechanical Engineers.
- Ero, O., Taherkhani, K., & Toyserkani, E. (2023). Optical tomography and machine learning for in-situ defects detection in laser powder bed fusion: A self-organizing map and U-Net based approach. *Additive Manufacturing*, 78, 103894.
- Feng, W., Mao, Z., Yang, Y., Ma, H., Zhao, K., Qi, C., ... & Liu, S. (2022). Online defect detection method and system based on similarity of the temperature field in the melt pool. *Additive Manufacturing*, 54, 102760.
- Francis, J., & Bian, L. (2019). Deep learning for distortion prediction in laser-based additive manufacturing using big data. *Manufacturing Letters*, 20, 10-14.
- Gibson, I. G. (2015). Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 1–498. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3/COVER>.
- Grasso, M., & Colosimo, B. M. (2017). Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. *Measurement Science and Technology*, 28(4), 044005.
- Gui, Y., Aoyagi, K., Bian, H., & Chiba, A. (2022). Detection, classification and prediction of internal defects from surface morphology data of metal parts fabricated by powder bed fusion type additive manufacturing using an electron beam. *Additive Manufacturing*, 54, 102736.
- Gunasegaram, D. R., Barnard, A. S., Matthews, M. J., Jared, B. H., Andreaco, A. M., Bartsch, K., & Murphy, A. B. (2024). Machine learning-assisted in-situ adaptive strategies for the control of defects and anomalies in metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 104013.
- Hsu, C. W., & Lin, C. J. (2002). A comparison of methods for multiclass support vector machines. *IEEE transactions on Neural Networks*, 13(2), 415-425.
- Huang, C., Wang, G., Song, H., Li, R., & Zhang, H. (2022). Rapid surface defects detection in wire and arc additive manufacturing based on laser profilometer. *Measurement*, 189, 110503.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., & Taylor, J. (2023). Statistical learning. In *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in Python* (pp. 15-67). Chamnitz, Germany: Springer International Publishing.
- Jin, Z., Zhang, Z., Ott, J., & Gu, G. X. (2021). Precise localization and semantic segmentation detection of printing conditions in fused filament fabrication technologies using machine learning. *Additive Manufacturing*, 37, 101696.
- Kawalkar, R., Dubey, H. K., & Lokhande, S. P. (2022). A review for advancements in standardization for additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1983-1990.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 25.
- Li, R. (2022). Defect Detection for Additive Manufacturing with Machine Learning and Markov Decision Process.
- Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., & Loh, H. T. (2004). Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes. *Rapid Prototyping Journal*, 10(2), 123-135.
- Minetola, P., Khandpur, M. S., Iuliano, L., Calignano, F., Galati, M., & Fontana, L. (2022). In-situ monitoring for open low-cost 3D printing. In *Recent Advances in Manufacturing Engineering and Processes: Proceedings of ICMEP 2021* (pp. 49-56). Springer Singapore.
- Patel, J. (2019). Data-Driven Modeling for Additive Manufacturing of Metals. *Proceedings of a ... - National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Division on Engineering and Physical Sciences*.
- Petsiuk, A. L., & Pearce, J. M. (2020). Open source computer vision-based layer-wise 3D printing analysis. *Additive Manufacturing*, 36, 101473.
- Petsiuk, A., & Pearce, J. M. (2022). Towards smart monitored AM: Open source in-situ layer-wise 3D printing image anomaly detection using histograms of oriented gradients and a physics-based rendering engine. *Additive Manufacturing*, 52, 102690.
- Qi, X., Chen, G., Li, Y., Cheng, X., & Li, C. (2019). Applying neural-network-based machine learning to additive manufacturing: current applications, challenges, and future perspectives. *Engineering*, 5(4), 721-729.

- Qin, J., Hu, F., Liu, Y., Witherell, P., Wang, C. C., Rosen, D. W., ... & Tang, Q. (2022). Research and application of machine learning for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, *52*, 102691.
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine learning*, *1*, 81-106.
- Westphal, E., & Seitz, H. (2021). A machine learning method for defect detection and visualization in selective laser sintering based on convolutional neural networks. *Additive Manufacturing*, *41*, 101965.
- Xu, X., Zuo, L., Li, X., Qian, L., Ren, J., & Sun, Z. (2018). A reinforcement learning approach to autonomous decision making of intelligent vehicles on highways. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *50*(10), 3884-3897.

Araştırma Makalesi

Neovius ve Schwarz-P Üçlü Periyodik Minimal Yüzey Yapılarının Mekanik Özelliklerinin Sayısal Analizi

 Mehmet Çağrı Tüzemen

Nevşehir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir/Türkiye.

Sorumlu Yazar: mcagrituzemen@gmail.com

Makale Bilgileri:

Geliş: 13/05/2024, Revizyon: 02/06/2024, Kabul: 19/06/2024.

ÖZET

Eklemeli imalat son yıllarda oldukça popüler bir üretim yöntemi olmuştur. Kuşkusuz onu bu popülerliğe taşıyan, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi çok zor olan karmaşık şekilli yapıları üretebilme kapasitesidir. Bu karmaşık yapılara en iyi örnek ise hafiflikleri ile ön plana çıkan kafes yapılarıdır. Kafes yapılar içerisinde farklı bir sınıf olan üçlü periyodik minimal yüzey (ÜPMY) yüksek mukavemet ve enerji emilimi kapasitesi nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada Neovius ve Schwarz-P ÜPMY yapılarından oluşan modellerin sonlu elemanlar analizi (sayısal) yöntemiyle çeşitli yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Analizlerde malzeme olarak 316 paslanmaz çelik kullanılmıştır. 20x20x20 mm kübik ÜPMY yapılar birim hücre boyutu 10 mm, hacimsel doluluğu ise %10, %15 ve %20 olmak üzere üç farklı hacimsel dolulukta tasarlanmıştır. Tasarlanan yapılara sırasıyla basma, kayma ve basma-kayma bileşik yükleri uygulanmıştır. Her üç yükleme durumunda da Schwarz-P yapısında daha yüksek gerilmeler meydana gelmiştir. Basma yükü sonucunda Neovius yapılarda 17 MPa ile 29 MPa arasında gerilmeler oluşurken, Schwarz-P yapısında 86. MPa ile 190 MPa arasında gerilmeler meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: 316 Paslanmaz Çelik, Eklemeli İmalat, Mekanik Özellikler, Sonlu Elemanlar Analizi, Üçlü Periyodik Minimal Yüzey.

Numerical Analysis on Mechanical Properties of the Neovius and Schwarz-P Triple Periodic Minimal Surface Structures

ABSTRACT

Additive manufacturing has become a quite popular production method in recent years. Undoubtedly, what brings it to this popularity is its capacity to produce complex structures that are not possible to produce with traditional manufacturing methods. The best example of these complex structures is lattice structures, which stand out with their lightness. Triple periodic minimal surface (TPMS), which is a different class among lattice structures, is frequently preferred due to its high strength and energy absorption capacity. In this study, the behavior of models consisting of Neovius and Schwarz-P TPMS structures under various loads was examined using the finite element analysis method. 316 stainless steel was used as the material in the analyses. 20x20x20 mm cubic TPMS structures were designed with a unit cell size of 10 mm and three different volumetric filling levels: 10%, 15%, and 20%. Compression, shear, and compression-shear combined loads were applied to the designed structures, respectively. In all three loading cases, higher stresses occurred in the Schwarz-P structure. As a result of the compression load,

stresses between 17 MPa and 29 MPa occurred in the Neovius structures, while stresses between 86 MPa and 190 MPa occurred in the Schwarz-P structure.

Keywords: *316 Stainless Steel, Additive Manufacturing, Finite Element Analysis, Mechanical Properties, Triple Periodic Minimal Surface.*

I. GİRİŞ

Son yıllarda eklemeli imalat (3 boyutlu yazıcılar) mühendislik uygulamalarında sıkça tercih edilen bir üretim yöntemi haline gelmiştir (Akbulut ve ark. 2023; Dursun ve ark. 2022). Eklemeli imalat ile metal, polimer, seramik ve kompozit malzemeler kullanılarak üretim yapmak mümkündür (Akgümüş Gök ve ark., 2023; Canlıdınç, 2023; Kısasöz ve ark., 2023; Tayfun ve ark., 2023; Yılmaz ve ark., 2023). Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla karmaşık yapıların üretimi eklemeli imalat yöntemleri ile çok daha kolay yapılabilmektedir (Bozkurt ve ark., 2021). Bu yöntemle üretilen karmaşık yapılara örnek olarak kafes yapılar verilebilir. Kafes yapıları, dikmelere veya duvarlara dayalı birim hücre yapılarının periyodik olarak düzenlenmesiyle oluşturulan açık gözeneklere sahip hücresel yapılardır (Mishra ve ark., 2023). Üçlü periyodik minimal yüzey (ÜPMY) kafes yapıları sıklıkla kullanılan kafes yapılarından (Depboylu ve ark., 2023). Bu yapılar kesişen veya katlanmış yüzeyleri olmayacak şekilde matematiksel olarak oluşturulan yüzeylerdir (Benedetti ve ark., 2021). Sürekli kavisli yüzey geometrileri nedeniyle üretilebilirlik açısından yararlı olduğu kanıtlanmış birçok topolojik özelliğe sahiptir (Afshar ve ark., 2016; Bobbert ve ark., 2017; Maconachie ve ark., 2019). ÜPMY yapıların benzersiz mekanik ve biyolojik davranışları, bu yapıları ön plana çıkarmaktadır (Depboylu ve ark., 2023). Mekanik özellikleriyle birlikte hafifliklerinden dolayı, ÜPMY bazlı kafes yapılar üzerine pek çok çalışma mevcuttur (Qiu ve ark., 2024). Bu yapılar biyolojik/mekanik implantasyon gereksinimlerini karşılayabilen ve birçok karmaşık kemik iskelesini verimli bir şekilde oluşturabilen, gözenek ara bağlantısına sahip pürüzsüz bir yüzey sunmaktadır (Song ve ark., 2021).

Tyagi ve Manjaiah (Tyagi & Manjaiah, 2024) yaptıkları çalışmada 0° ve 90° doğrultularında ürettikleri Gyroid, Diamond ve Schwarz ÜPMY yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Her üç birim hücre yapısı ile üretilen numuneler de yaklaşık %50 bağlı yoğunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretimleri lazer toz yataklı füzyon yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numunelere ısı işlem gibi ardıl işlemler uygulayarak akma ve çekme mukavemetlerini arttırmayı amaçlamışlardır. 0° ve 90° açılarla oluşturulan kafesler için elastik modül değerleri sırasıyla 11 GPa ile 7,5 GPa arasında değişmiştir. Dikey olarak üretilmiş kafesler, Schwarz kafes yapısı dışında, yatay olarak üretilmişlere kıyasla üstün çekme dayanımı ve yüzde uzama sergilemiştir. En yüksek çekme dayanımı ise yatay olarak üretilmiş Schwarz yapı vermiştir.

Mishra ve ark. (Mishra ve ark., 2023) yaptıkları çalışmada birim hücre boyutunun ve hücre duvar kalınlığının üçlü periyodik minimal yüzey kafes yapılarının basma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Schwarz-P ve Schwarz-D ÜPMY yapıları kullanılarak kafes yapıları oluşturulmuştur. Kafes yapılar lazer toz yataklı füzyon yöntemiyle eklemeli olarak üretilmiş olup, tasarım uygunluğu ve üretim hataları optik mikyografi ve taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla incelemişlerdir. Numuneler, üretildiği haliyle ve ısı işlem görmüş koşullarda yarı statik tek eksenli basma testine tabi tutulmuştur. Kafes yapılarının mekanik özellikleri, hücre duvarlarının kalınlaşması ve hücre boyutlarının küçülmesiyle geliştiği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, kalın hücre duvarları kafes yapısında kırılma eğilimine neden olduğu için bu gibi durumlarda ısı işlem yapılmasını önermişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda Schwarz-D birim hücre yapısının Schwarz-P birim hücre yapısından daha yüksek basma dayanımına sahip olduğunu bildirmişlerdir.

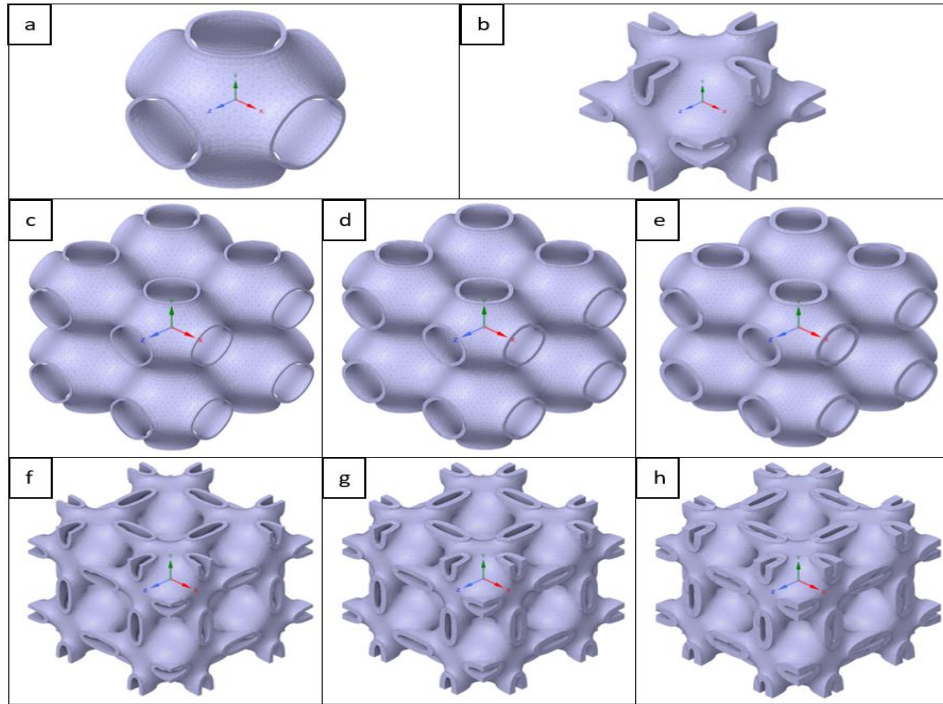
Wang ve ark. (Wang ve ark., 2021) yaptıkları çalışmada üçlü periyodik minimum yüzey yapısı kullanarak tasarladıkları modelleri sonlu elemanlar analizi yöntemiyle basma yükü altındaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. ÜPMY olarak Schwarz-P, Schoen's I-WP, ve Neovius hücre yapılarını kullanmışlardır. Geleneksel iki boyutlu hücresel yapıyla karşılaştırıldığında ÜPMY yapıların, dairesel bal peteklerin düzlem dışı ve düzlem içi basma testindeki mekanik aşırılıklarını dengelediğini bildirmişlerdir.

Kladovasilakis ve ark. (Kladovasilakis ve ark., 2022), eklemeli imalat ile üretilen üçlü periyodik minimal yüzeylerin mekanik özelliklerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Basma testi sonucunda en yüksek tepe dayanımı Neovius yapısında elde etmişlerdir. Schwarz elmas yapısı gerilme-gerinim eğrisinde plato bölgesinde mukavemetini kaybetmemiş ve en yüksek enerji emme verimliliğine sahip yapı olarak öne çıkmıştır. Numunelerin dayanım ve enerji emme kapasitelerinin, ÜPMY'lerin duvar yapılarıyla doğrudan ilgili olduğunu bildirmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda ÜPMY yapılarının genellikle basma ve çekme gibi yükler altındaki davranışlarının sıkça incelendiği görülmektedir. Oysa çok yönlü yüklemelerde geleneksel tasarımlara göre daha iyi konumda oldukları belirtilmektedir (Wang ve ark., 2021). Bu nedenle ÜPMY yapıların farklı doğrultularda ve çok yönlü yükler altındaki davranışlarının incelenmesi ve karşılaştırılması önem arz etmektedir. Bu çalışmada ÜPMY yapılar kullanılarak oluşturulan yapıların sonlu elemanlar analizi yöntemi ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile farklı duvar kalınlıklarına sahip Neovius ve Schwarz-P yapıları basma, kayma ve basma-kayma doğrultularında uygulanan yüklemeye altındaki davranışları incelenmiştir.

II. MALZEME VE YÖNTEM

Üçlü periyodik minimal yüzeylerin (ÜPMY) sonlu elemanlar analizi için öncelikle SpaceClaim programında modeller oluşturulmuştur. ÜPMY yapılar olarak Schwarz-P ve Neovius yapıları kullanılmıştır. Kafes yapılı modeller, boyutları 20x20x20 mm olacak şekilde kübik formda tasarlanmıştır. Bu kübik yapılar 10x10 mm birim hücre boyutuna sahip yapılardan oluşmaktadır. Her iki ÜPMY yapısı da %10, %15 ve %20 olacak şekilde üç farklı hacimsel doluluk oranlarında tasarlanmıştır (Tablo 1). ÜPMY birim hücre yapısında üç değişken vardır: birim hücre boyutu, duvar kalınlığı ve hacimsel doluluk. Bunlardan herhangi ikisinin programa girilmesi ile üçüncü değişken otomatik olarak belirlenmiş olur. SpaceClaim programına birim hücre boyutu ve hacimsel doluluk oranları veri olarak girilmiş duvar kalınlıkları program tarafından otomatik olarak alınmıştır. Tasarlanan kafes yapıları sonlu elemanlar analizi yönteminde yüklemenin ve mesnetlemenin geleceği noktalara birer mm kalınlığında düz katı plakalar eklenmiştir. Böylece gelen kuvvet kafes yapıya eşit şekilde dağıtılabilecektir. ÜPMY yapıları analiz süreleri de dikkate alınarak yüzey sayıları optimize edilmiştir.

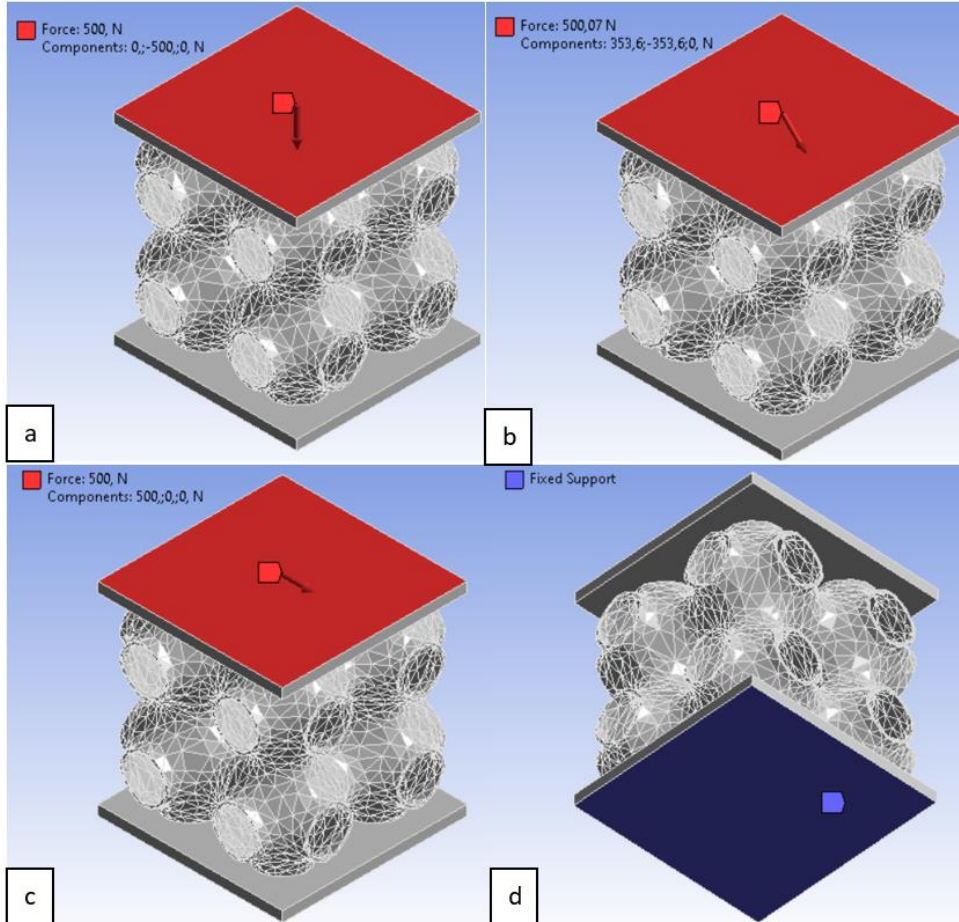


Şekil 1. a) Schwarz-P ve b) Neovius birim hücre yapıları ile bu yapılardan oluşturulan modeller c) Sp10, d) Sp15, e) Sp20, f) N10, g) N15 ve h) N20.

Tablo 1. Modellerin bazı fiziksel ve ağ yapı özellikleri.

ÜPMY	Kod	Hacimsel Doluluk (%)	Birim Hücre Boyutu (mm)	Duvar Kalınlığı (mm)	Kütle (g)	Düğüm Sayısı	Öge Sayısı
Neovius	N10	10	10	0,5	17,7	18317	64397
	N15	15	10	0,75	23,2	19100	67554
	N20	20	10	1	28,1	21565	81223
Schwarz-P	Sp10	10	10	0,285	10,9	103655	52405
	Sp15	15	10	0,4275	13,2	67966	35474
	Sp20	20	10	0,57	15,2	62853	33482

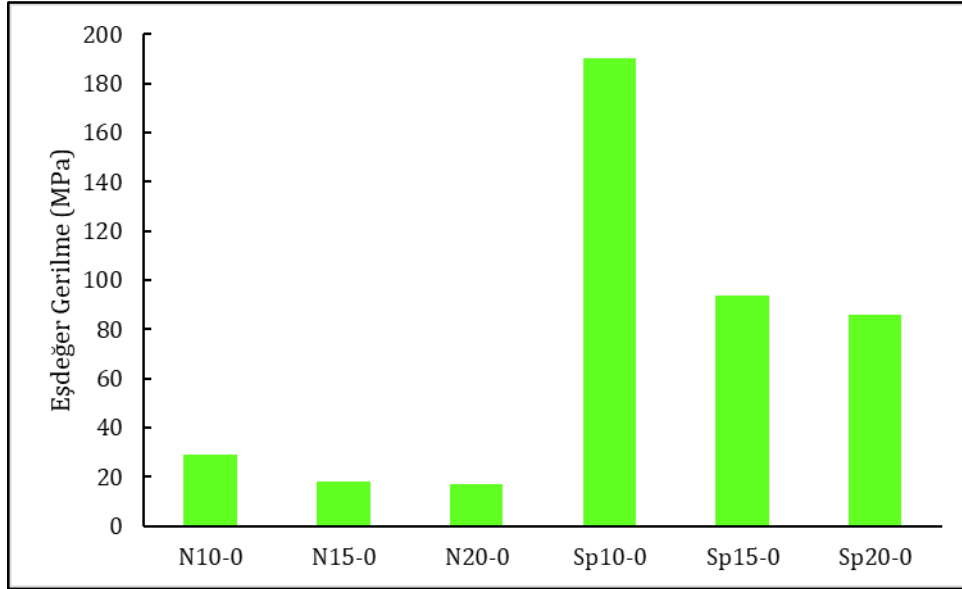
Tasarlanan modeller Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Burada ilk olarak yapısal statik analizi seçilmiştir. Sonra eklemeli imalatta da sıklıkla kullanılan 316 paslanmaz çelik malzemesi tanımlanmıştır. Seçilen malzemenin elastisite modülü 195 GPa, poisson oranı 0,25, kayma modülü ise 7,8 GPa'dır. Daha sonra setup kısmında Ansys Mekanik modülüne geçiş yapılmıştır. Burada daha önce analiz sürelerinin uzunluğundan dolayı yüzey yapıları SpaceClaim programında azaltılan modellerde ağ yapı oluşturulmuştur. Ağ yapı dört yüzlü yöntem ve ikinci dereceden öge sırası ile oluşturulmuştur. Ağ yapılarıdaki düğüm sayısı ve öge sayısı Tablo 1'de verilmiştir. Kafes yapılara eklenen düz plakalardan birinden kuvvet uygulanırken birine ise sabit mesnetleme uygulanmıştır. Her bir yapı için yüzeyin normaliyile sırasıyla 0°, 45° ve 90° açı ile basma, basma-kayma ve kayma yükleri uygulanmıştır (Şekil 2). Yüzeylere 500 N yük uygulanmış ve von-Mises eşdeğer gerilme sonuçları incelenmiştir. Uygulanan yükleri belirtmek için Tablo 1'de gösterilen kodlamalara yükün uygulandığı açığı belirten 0, 45 ve 90 sayıları eklenmiştir.



Şekil 2. Modellere uygulanan yükler a) basma (0°), b) basma-kayma (45°), c) kayma (90°) ve d) sabit mesnetleme.

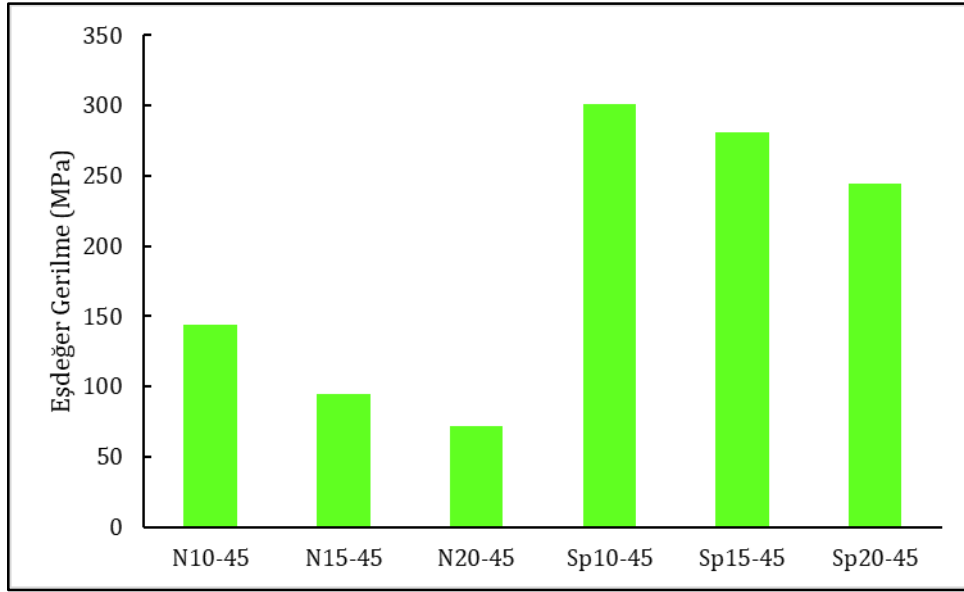
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sonlu elemanlar analizi sonucunda numunelerin 500 N'luk basma yükü altındaki eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Sonuçlara genel olarak bakıldığı zaman aynı yük altında Neovius hücre yapısına sahip numunelerde Schwarz-P yapısına sahip numunelere göre yapı içinde oluşan en yüksek gerilmenin oldukça az olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin duvar kalınlıklarındaki farklılıklar olduğu düşünülmektedir. Aynı hacimsel doluluğa (%10) sahip Sp10 ve N10 numunelerine bakıldığı zaman Schwarz-P birim hücre yapısına sahip numunenin duvar kalınlığının 0,285 mm iken Neovius birim hücre yapısına sahip numunenin duvar kalınlığı ise 0,5 mm'dir. Bu ise ÜPMY yapılarından kaynaklanan bir durumdur. Dolayısıyla aynı hacimsel doluluğa sahip numuneler arasında Neovius yapısının Schwarz-P yapısına göre daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır. Schwarz-P hücre yapısına sahip numunelerde eşdeğer gerilmeler 86 MPa ile 190 MPa arasında değişirken, Neovius yapısına sahip numunelerde ise eşdeğer gerilmeler 17 MPa ile 29 MPa arasında değişmektedir. Her iki birim hücre yapısı için de duvar kalınlıkları arttıkça, hacimsel doluluk oranları ve kütleleri artmakta ve yapıda oluşan en yüksek gerilmeler düşmektedir. Neovius yapısındaki kütle artışına kıyasla gerilmelerdeki düşüş oransal olarak daha fazla olmaktadır. Sonuç olarak Neovius yapısının Schwarz-P yapısına göre dayanım ağırlık oranının daha yüksek olduğu söylenebilir.



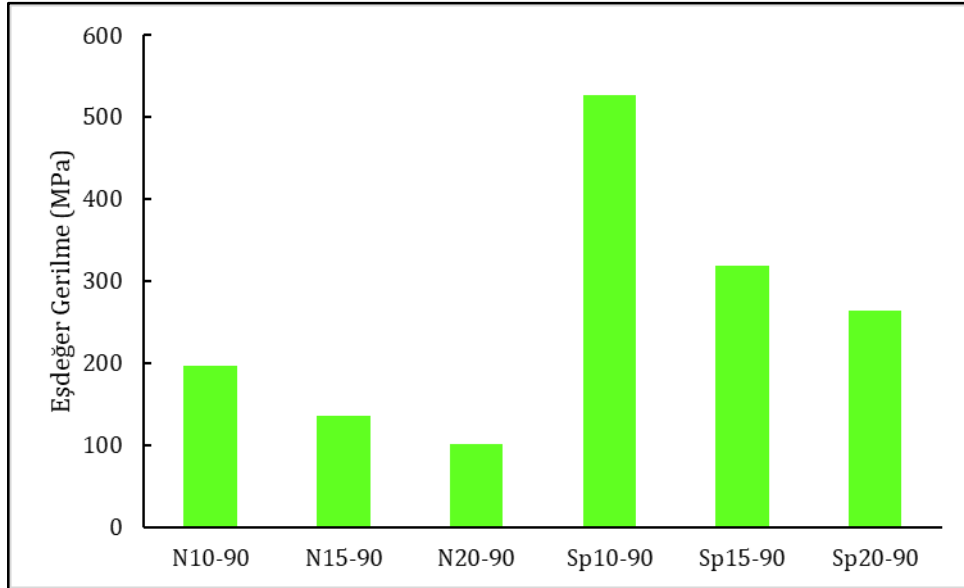
Şekil 3. ÜPMY yapılarında basma yükü altında oluşan en yüksek eşdeğer gerilmeler.

ÜPMY yapıların 500 N'luk basma-kayma bileşik yük altındaki eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Basma yüküne benzer şekilde aynı yük altında Schwarz-P yapısına sahip numunelerde Neovius hücre yapısına sahip numunelere göre daha yüksek eşdeğer gerilmenin olduğu görülmüştür. Neovius numunelerinde eşdeğer gerilmeler 72 MPa ile 144 MPa arasında değişirken, Schwarz-P numunelerde ise eşdeğer gerilmeler 244 MPa ile 301 MPa arasında değişmektedir. Basma yüküne maruz kalan numunelere kıyasla bileşik yüklemelerde çok daha fazla gerilmelerin olduğu görülmüştür. Bunun nedeni basma yükünde hücre duvarlarına tek yönde yük gelirken, basma-kayma bileşik yüklemesinde çok yönlü olmaktadır. Bu durumda numuneler üzerinde oluşan gerilmeler artmaktadır.



Şekil 4. ÜPMY yapılarında basma-kayma bileşik yük altında oluşan en yüksek eşdeğer gerilmeler.

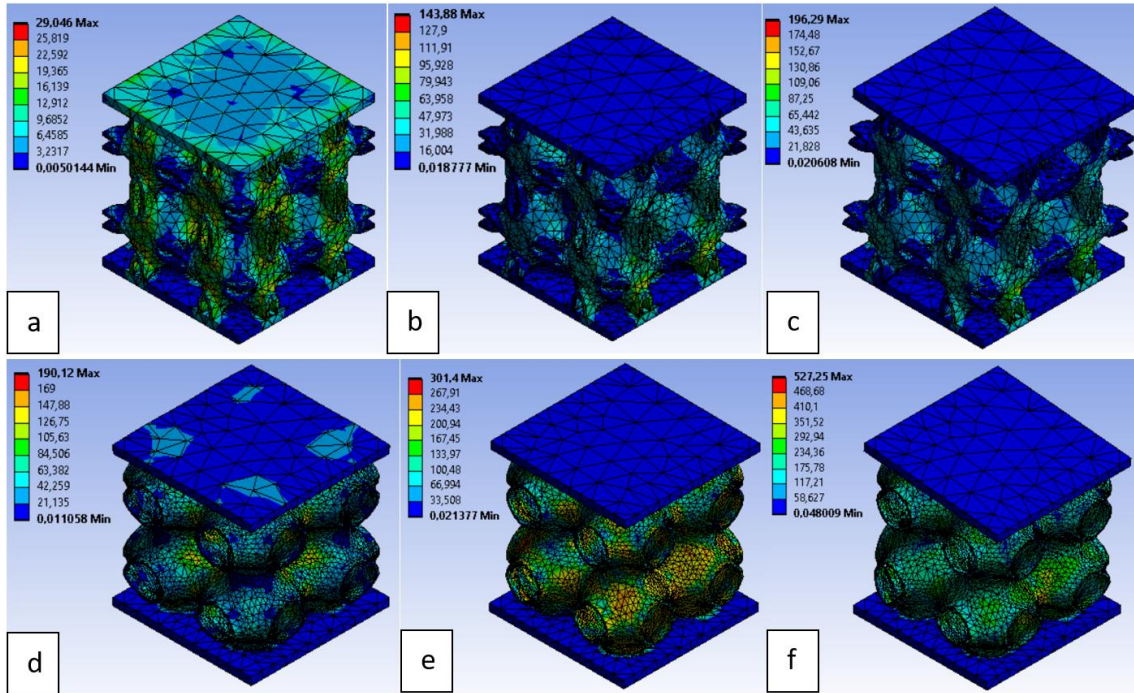
Yapılan analizler sonucunda ÜPMY yapıların 500 N'luk kayma yükü altındaki eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Kayma yüküne maruz kalan Neovius hücre yapılı numunelerde Schwarz-P yapılı olanlara göre yapıda oluşan en yüksek gerilmelerin daha az olduğu görülmüştür. Schwarz-P hücre yapısına sahip Sp10-90, Sp15-90 ve Sp20-90 numunelerinde eşdeğer gerilmeler sırasıyla yaklaşık olarak 527 MPa, 319 MPa ve 264 MPa bulunmuştur. Neovius yapısına sahip N10-90, N15-90 ve N20-90 numunelerinde ise eşdeğer gerilmeler sırasıyla yaklaşık olarak 196 MPa, 136 MPa ve 102 MPa bulunmuştur. Her iki ÜPMY yapısının da kayma yüklemelerinden ziyade basma yüklemelerine daha dayanıklı oldukları sonucuna varılmıştır.



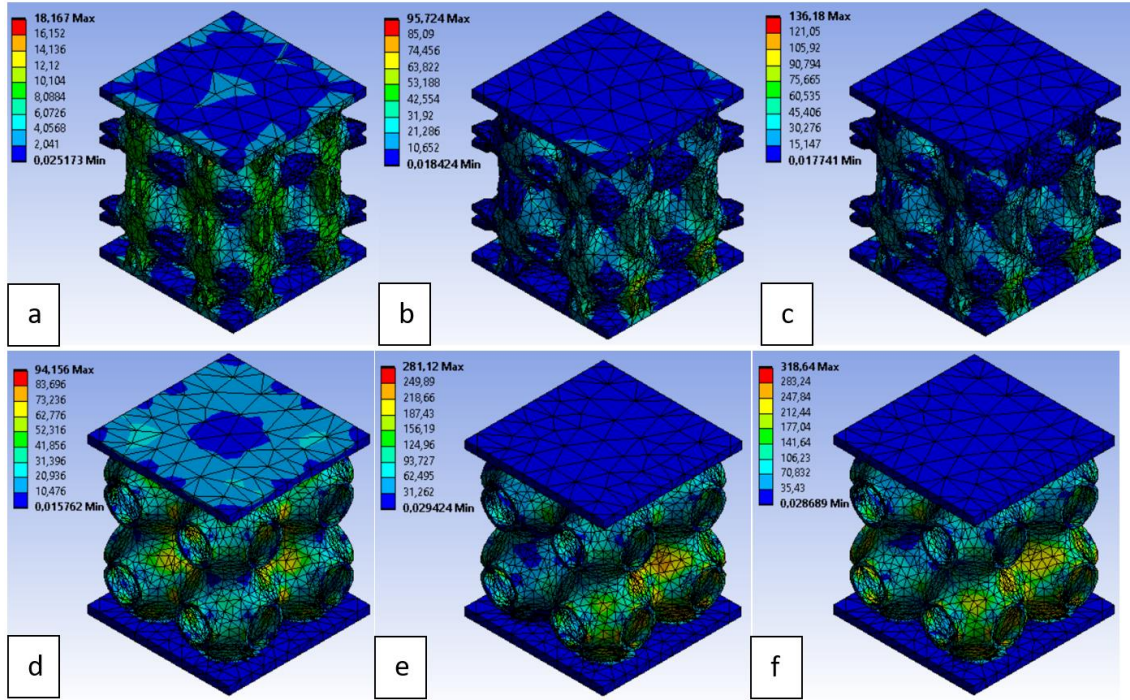
Şekil 5. ÜPMY yapılarında kayma yükü altında oluşan en yüksek eşdeğer gerilmeler.

Neovius ve Schwarz-P üçlü periyodik minimal yüzeyler kullanılarak %10, %15 ve %20 hacimsel dolulukla oluşturulan yapıların sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen eşdeğer gerilmelerin yapıdaki dağılımları sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Gerilme dağılımları incelendiğinde yalnızca basma yüküne maruz kalan numunelerde (a ve d) şekillerinde gerilme dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Yalnızca kayma yüküne maruz kalan numunelerde (c ve f) yükün yönüne bağlı

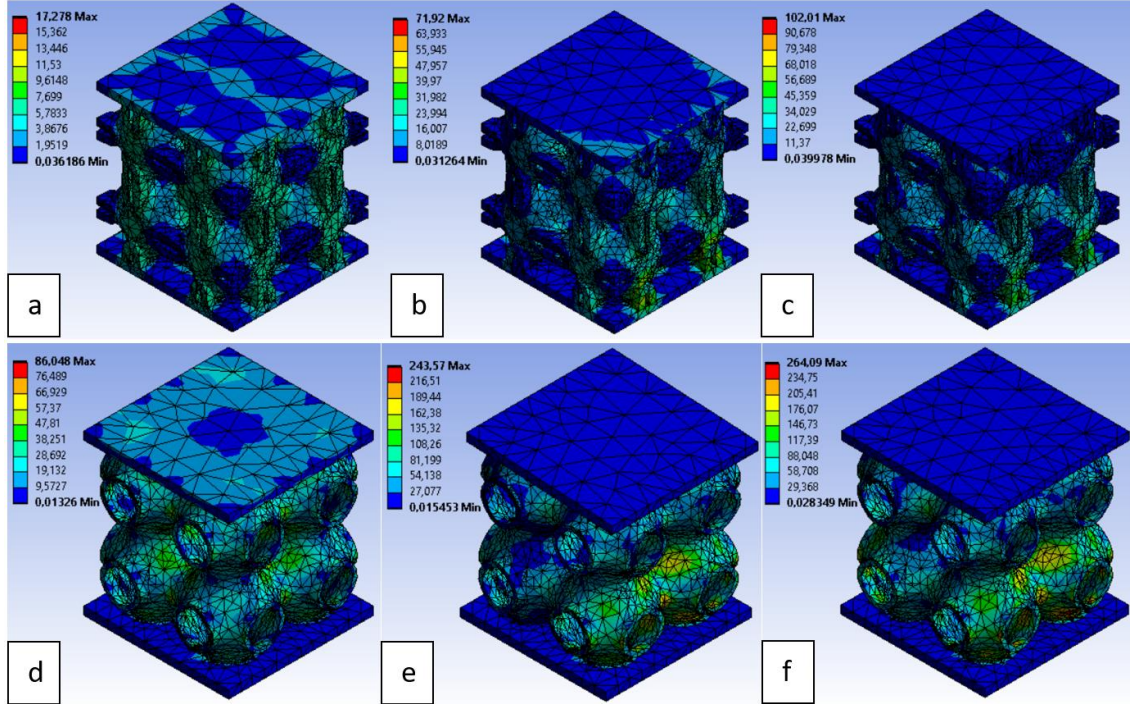
olarak yapıda hem basma hem de çekme gerilmesi oluşmuştur. Bu durum yapının genelinde homojen bir gerilme dağılımının önüne geçmiştir. 45° açıyla yapılan bileşik yüklemeye maruz kalan numuneler hem basma hem de kayma yüküne maruz kalmaktadır. Basma yükünden dolayı yapının her yerinde basma gerilmesi oluşurken, kayma yükünden dolayı yapıda eğilme meydana geldiğinden yapının belirli bölgesinde çekme belirli bir bölgesinde ise basma gerilmesi oluşmaktadır. Bu bileşik yükleme durumunda yapının basma-çekme yüküne maruz kalan bölgesindeki gerilmeler daha düşük çıkarken hem basmadan hem de kaymadan dolayı gelen basma kuvveti yapının ilgili bölgesindeki gerilmelerin daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Neovius (a, b ve c) ve Schwarz-P (d, e ve f) yapıları incelendiğinde birim hücreyi oluşturan duvar yapısının gerilmeler üzerindeki etkileri daha net görülmektedir. Neovius yapısında yatay ve dikey duvarların varlığı Schwarz-P yapısına göre daha fazla iken, Schwarz-P yapısında ise yuvarlak duvarların varlığı daha fazladır. Neovius yapısının üst ve alt taraflarındaki çapraz desenli duvarları Schwarz-P yapısına göre basma yükü altında daha yüksek mukavemet göstermesini sağlamaktadır (Kladovasilakis ve ark., 2022). Ayrıca aynı hacimsel doluluğa sahip yapı elde edebilmek için Neovius yapısında daha kalın duvarlar kullanılmaktadır. Birim hücre oluşturan duvarların bu özelliklerinden dolayı Neovius yapısında aynı yük altında daha az gerilme oluşmaktadır.



Şekil 6. Sonlu elemanlar analizi sonucunda %10 hacimsel dolulukdaki ÜPMY yapılarında oluşan gerilmeler a) N10-0, b) N10-45, c) N10-90, d) Sp10-0, e) Sp10-45 ve f) Sp10-90.



Şekil 7. Sonlu elemanlar analizi sonucunda %15 hacimsel dolulukdaki ÜPMY yapılarında oluşan gerilmeler a) N15-0, b) N15-45, c) N15-90, d) Sp15-0, e) Sp15-45 ve f) Sp15-90.



Şekil 8. Sonlu elemanlar analizi sonucunda %20 hacimsel dolulukdaki ÜPMY yapılarında oluşan gerilmeler a) N20-0, b) N20-45, c) N20-90, d) Sp20-0, e) Sp20-45 ve f) Sp20-90.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada Neovius ve Schwarz-P üçlü periyodik minimal yüzey yapılarının çeşitli yüklemeler altında davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Yapılar %10, %15 ve %20 hacimsel doluluk oranlarında tasarlanmış ve basma, kayma ve basma-kayma bileşik yüklerinde maruz bırakılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kayma yükünün her iki yapıda da en yüksek gerilmeleri verdiği

görülmüştür. Neovius yapısı Schwarz-P yapısına göre her üç yükleme koşulunda da daha dayanıklı çıkmıştır. Neovius ÜÇMY yapısında yatay ve dikey duvarların varlığı Schwarz-P yapısına göre daha fazla olduğu için daha fazla yük taşıyabildiği düşünülmektedir. Aynı hacimsel dolulukta Neovius yapısında daha kalın duvarlar bulunduğu için yük taşıma kapasitesi artmaktadır. ÜÇMY yapılarda yükleme koşullarında uygun tasarım iyileştirmeleri yapılması dayanıklılık açısından önemlidir. ÜÇMY yapılar bu çalışmadaki gibi bir bileşik yüklemeye maruz kalacaksa basma kuvvetinin çok olacağı bölgede yapısal en iyileştirme veya duvar kalınlığının artırılması ile yapıda oluşan gerilmeler düşürülebilir. Son olarak ilgili yapıların benzer duvar kalınlıklarına sahip olması durumunda yük altındaki davranışları gelecek çalışmalarda incelenebilir.

KAYNAKLAR


- Afshar, M., Anaraki, A. P., Montazerian, H., & Kadkhodapour, J. (2016). Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 62, 481-494.
- Akbulut, A., Top, N., & Gökçe, H. (2023). El için tasarlanan kafes yapıların yapısal davranışlarının incelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 4(2), 92-100.
- Akgümüş Gök, D., Kiliçtek, S., Gök, S., & Yakut, N. (2023). Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma. *Gümüşhane University Journal of Science and Technology*, 13(3), 517-537.
- Benedetti, M., du Plessis, A., Ritchie, R. O., Dallago, M., Razavi, N., & Berto, F. (2021). Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *In Materials Science and Engineering R: Reports*, 259-300.
- Bobbert, F. S. L., Lietaert, K., Eftekhari, A. A., Pouran, B., Ahmadi, S. M., Weinans, H., & Zadpoor, A. A. (2017). Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties. *Acta Biomaterialia*, 53.
- Bozkurt, Y., Gülsoy, H. Ö., & Karayel, E. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. *El-Cezeri*, 8(2), 962-980.
- Canlıdınç, M. (2023). Topoloji Optimizasyonu ile Metal Eklemeli İmalat Yönteminin Endüstriyel Uygulamaları. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 9(2), 552-565.
- Depboylu, F. N., Poyraz, Ö., Yasa, E., & Korkusuz, F. (2023). Lazer-Toz Yatağında Füzyon ile Üretilen Ti6Al4V Gyroid Yapıların Basma Dayanımlarının Nümerik Modellenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 270-283.
- Dursun, A. M., Tüzemen, M. Ç., Salamcı, E., Yılmaz, O., & Ünal, R. (2022). Investigation of compatibility between design and additively manufactured parts of functionally graded porous structures. *Politeknik Dergisi*, 25(3), 1069-1082.
- Kladovasilakis, N., Tsongas, K., Kostavelis, I., Tzovaras, D., & Tzetzis, D. (2022). Effective mechanical properties of additive manufactured triply periodic minimal surfaces: Experimental and finite element study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11), 7169-7189.
- Kıyasöz, B. Ö., Tütük, İ., Koç, E., Karabeyoğlu, S. S., & Kıyasöz, A. (2023). Seçici lazer sinterleme yöntemiyle üretilen PA 12 matrisli seramik takviyeli kompozitlerin aşınma davranışının incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), 1029-1036.
- Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., & Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design*, 183, 108137.
- Mishra, A. K., Chavan, H., & Kumar, A. (2023). Effect of cell size and wall thickness on the compression performance of triply periodic minimal surface based AlSi10Mg lattice structures. *Thin-Walled Structures*, 193.
- Qiu, N., Wan, Y., Shen, Y., & Fang, J. (2024). Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 261.
- Song, K., Wang, Z., Lan, J., & Ma, S. (2021). Porous structure design and mechanical behavior analysis based on TPMS for customized root analogue implant. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 115.
- Tayfun, Ü., Murat Yılmaz, V., & Arslan, Ç. (2023). Eklemeli İmalat Yönteminde Filament Olarak Kullanılan Polimerik Malzemeler. *Journal of Smart Systems*, 2(1), 45-67.
- Tyagi, S. A., & Manjiaiah, M. (2024). Printability, post-processing and mechanical behaviour of sub-millimetre sized SS 17-4PH TPMS lattice structures. *Materials Today Communications*, 38.

Wang, Z., Wang, X., Gao, T., & Shi, C. (2021). Mechanical behavior and deformation mechanism of triply periodic minimal surface sheet under compressive loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(19).

Yılmaz, M., Yılmaz, N. F., Kılıç, A., & Mazi, H. (2023). Eklemeli imalat yönteminde polilaktik asit (PLA)/peroksit kompozitinin in-situ olarak çapraz bağlama tekniği ile üretilebilirliğinin araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), 859-868.

Derleme Makalesi

Yeni Mühendislik Ortamında Ahşap Oyma Teknolojisinin İncelenmesi

 Tuğba Gürer

Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Düzce/Türkiye.

Sorumlu Yazar: tugbagurer@duzce.edu.tr

Makale Bilgileri:

Geliş: 15/04/2024, Revizyon: 23/04/2024, Kabul: 29/04/2024.

ÖZET

Ahşap doğal bir malzeme olmasının yanı sıra işlevselliği ile mekânın kullanılabilirliğini ve estetik değerini artıran çok kıymetli bir dekorasyon ürünüdür. Geleneksel olarak yapılan özellikle el işçiliği dediğimiz insan gücünün kullanıldığı oyma Mobilya sektörü, işyeri sayısı ve yarattığı istihdam olanakları ile önemli bir sektör olmasına karşın ihracat içindeki payı sınırlı düzeydedir. Mobilya sektörünün gelişiminin mobilya ihracatının gelişmesine bağlı olduğu gerçeği söz konusudur. Bu bağlamda mobilya sektöründe CNC tezgâhların programlanmış birimlerinin sistematik çalışmasından faydalanılmaktadır. Bu çalışma şekli, belirli ürün gruplarının seri üretimlerinde daha efektif üretim süreci oluşturulmasını sağlamaktadır. Ahşap oymacılığının dahil olduğu her alanda CNC tezgahlarından yardım alınabilmektedir. Bu çalışmada geleneksel Türk oymacılığın öneminin yanı sıra, ülkemize anlamlı düzeyde katma değer katacağı düşünülen özgün Türk mobilyasının Türk süslemeleriyle geliştirilerek yeni mühendislik yaklaşımlarıyla ortaya çıkarılması gerekliliği ele alınmıştır. Ayrıca bu konuyla ilgili multidisipliner çalışmalara ihtiyaç duyulmakla birlikte sektör çalışanlarının üniversitelerle işbirliği içine girmeleri ve gerekirse bu konuda devlet desteği ile üniversitelerden koçluk ve mentorluk hizmetlerinin alınması gerekliliği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *İhracat, Mobilya, Oyma, Seri Üretim, Tasarım.*

Investigation of Wood Carving Technology in New Engineering Environment

ABSTRACT

In addition to being a natural material, wood is a very valuable decoration product that increases the usefulness and aesthetic value of the space with its functionality. Although the carved furniture sector, which is traditionally made using manpower, which we call handcraft, is an important sector with the number of workplaces and the employment opportunities it creates, its share in our exports is limited. It is a fact that the development of the furniture industry depends on the development of furniture exports. In this context, systematic operation of programmed units of CNC machines is used in the furniture industry. This way of working enables a more effective production process in the mass production of certain product groups. Help can be taken from CNC machines in every field including wood carving. As a result, in this study, it is discussed that traditional carving is very valuable, as well as our obligation to adapt to the developing and globalizing world, and the necessity of creating original Turkish furniture, which will add significant added value to the country, but unfortunately we have not yet created it, by developing it with Turkish ornaments and using new engineering approaches. In addition, although there is a need for multidisciplinary studies on this issue, it was emphasized that sector employees should cooperate with universities and, if necessary, receive coaching and mentoring services from universities with the support of the state.

Keywords: *Export, Furniture, Carving, Mass Production, Design.*

I. GİRİŞ

Ahşap oyma sanatı antik çağlardan günümüze kadar gelen en eski süsleme sanatlarından birisidir. Geçmişte bu sanat dalı az sayıda vasıflı insan tarafından gerçekleştiriliyordu. Ancak son yıllarda yüksek yaşam standartları ile ahşap oyma mobilyalara olan talep ve dekorasyona olan ilgi sebebiyle bazı el aletleri ve makineler kullanılarak ihtiyaç karşılanmaya çalışılmış olsa da son süreçte hayatımıza giren CNC makineleri ile ahşap oyma sanatıyla ilgili olan tüm senaryolar tamamen değişime uğramıştır (Thapa ve ark., 2014). Oyma işleminde beklenen hatasız işçilik ve standardizasyon için CNC makinelerine geçiş son derece anlamlı olmuştur. Modern endüstri söz konusu olduğunda CNC makinelerinin kullanılmaması düşünülemez. Bu makineler, geleneksel makinelerle göre birçok avantaj sağlamakla birlikte endüstride kullanımı giderek artmaktadır. Sağladığı faydaların bir kısmı: yüksek hassasiyette kalite ve işleme hızı, karmaşık parçaların işlenmesi ve standardizasyonu olarak özetlenebilecektir (Sanela ve Atif, 2017).

Robotik ve insan-makine ara yüzündeki son gelişmeler, makinelerin ve insanların güçlü yönlerini birleştiren yeni işbirlikçi prosedürleri mümkün kılmaktadır. Ahşap endüstrisindeki mevcut otomasyon teknolojileriyle insan-robot işbirliği (human-robot collaboration -HRC) karşılaştırıldığında bu iki işbirlikçinin daha esnek üretime geçişte yeni olanaklar sunacağı düşünülmektedir (Yang ve ark., 2024).

Mobilya sektörü tüm dünyada ve ülkemizde yüksek ekonomik getirisi olan çok büyük bir sektördür. Bu sektör içerisinde tüm dünyadaki yerimizi üst seviyelere taşıyacak olan yeni çalışmalar yapılmasının şart olduğu kaçınılmaz bir gerçektir. Tüm bu gelişmelerden yola çıkarak asıl konunun gelecekte bizi nelerin beklediği sorusuna cevap vermek olacağı kesindir. Robotik sistemlerin hızla ve artarak hayatımıza gireceği gerçeği ile yüzleşerek tüm bu sistemlere adaptasyonumuzun nasıl olacağı ile ilgili yoğun çalışmalar yapmamız gerekmektedir. Bu doğrultuda bu çalışmada ahşap oyma, CNC router makineleri, mobilya sektörünün genel durumu ile ilgili sektör raporu ve mobilya sektörü değerlendirilmesi yapılmış olup ayrıca gelecekte bizi neler bekliyor başlıkları altında yapılan çalışmalar ele alınmıştır.

II. AHŞAP OYMA TEKNOLOJİSİ

Bu çalışma kapsamında geleneksel ağaç süsleme tekniklerinden birisi olan ahşap oymacılığının günümüz teknolojisine entegrasyonu ile ilgili genel bir okuma yapılmıştır. Bu çalışma nitel araştırma yöntemlerinden biri olan gözlem metodu alt başlığında literatür taraması yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, hem yerel hem de küresel bazda ihracat durumumuz gözden geçirilmiş olup ülke ekonomisine büyük katkı sağlayan ve sağlayacak olan mobilya sektörüne ilişkin inceleme yapılmıştır. Sonuç olarak, multidisipliner çalışmalar yapılarak sektörel bazda verimliliğin artacağı ve üniversite-sanayi işbirliği ile başarılı sonuçlara ulaşacağımız düşünülmektedir. Gelecek için en büyük güç kaynağımız, bu konuda yetişen ve tasarım ayağı güçlü olan genç bireyler ile akademisyenlerimizin tasarıma dayalı ve akılcı iş birlikteliklerden doğan güncel çalışmalarının mobilya sektöründeki gücümüzü artıracığına inanılmaktadır.

A. Ahşap Oyma

Ahşap erişilebilirliği kolay bir malzeme olmakla birlikte birçok farklı amaç için kullanımına rastlamak mümkündür ayrıca birçok medeniyette değişik tekniklerle farklı alanlarda çokça kullanılmıştır. Geçmiş dönemlere bakıldığında ahşap malzemenin çoğu zaman alet ve silah geliştirmek amacıyla hammadde olarak kullanıldığını görmekteyiz. Ayrıca bu kullanım amaçlarının yanında heykel ve barınak gibi bambaşka amaçlara hizmet eden alanlarda da kullanılmıştır (Aamir, 2018).

Tarihten günümüze kadar ulaşan ve geleneksel sanatlarımız arasında çok büyük bir yer kaplayan ve kültür mirasımız olan ağaç işçiliği çok önemlidir. Sanat yapıtlarında Türkler ahşabı çok detaylı bir şekilde kullanmışlardır. Orta Asya Kurganlar-da özellikle Pazırık'ta yapılan araştırmalar sonucu ortaya çıkan verilerde ağaç işi parçalarının yanı sıra at eyeri, koşum takımlarında kullanılan ağaç parçaları bulunmuştur. Göçebe hayat süren Türkler Orta Asya'dan beri ahşap sanatını uygulamış, yerleşik düzene geçtikten sonra ise kalıcı eserler vermeye devam etmişlerdir. Cami minberleri, kapı ve pencere kanatları, sandukalar, Kur'an mahfazaları ve rahle gibi ürünler, Osmanlı dönemine kadar olan ve Selçuklu dönemini de kapsayan zaman diliminde çokça kullanılmış olmakla birlikte ahşap işçiliğinin gelişmiş olduğunu da göstermektedir (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Aksaray İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2024).

Selçuklu döneminden kalan yapılar incelendiğinde ise mimarinin oldukça geliştiği ve üstün bir niteliğe sahip olduğu görülmüştür. Döneme ait camilerin kapı, pencere kanatları, minberleri ile türbelere ait sandukalar, rahleler ve Kur'an muhafazaları üstün bir ahşap işçiliğini göz önüne sermişlerdir (Ersoy, 1993).

Ahşap işçiliği, yüzyıllardır uygulanan, insanoğlunun bildiği tarihi en eski sanat dallarından biridir. Antik çağlarda uygulanan bu el işçiliği, keski ve çekiçler kullanılarak yapılıyor ve ayrıca büyük bir beceri,

emek ve zaman gerektiriyordu. Zaman içerisinde takım tezgâhlarının oluşturulması ile ahşap tasarımların daha az çabayla ve kısa sürede doğru bir şekilde oluşturulabilmesi için ustalık gerektiren bu zor sanatın makineleştirilmesi fikrini ateşlemiştir. Zamanla büyük otellerin ve zengin kesimin evlerinin kapılarına oyma heykeller yaptırılmalarının yanı sıra ahşap oymacılığı ile yapılan diğer tüm dekoratif objelere de talep günden güne artmıştır. Birçok küçük ölçekli firma bu tarz çeşitli ahşap tasarımlar için çok uygun maliyetler çıkarabiliyorsa bu tamamen CNC router olarak bilinen ve devrim niteliğinde olan bilgisayar kontrollü makinelerin kullanımı sayesinde gerçekleşmiştir (Thapa ve ark., 2014).

Mümkün olan her şeyi süslemek insan doğasının bir eğilimidir. Ahşap malzemede oyma aletlerin yardımıyla işlenir ve bunun sonucunda birçok süs eşyası ile heykel gibi sanatsal ürünler elde edilir. Oyma işçiliği ahşap malzemeye anlam katarak güzelleşmesini sağlar ve estetik değer katar. Eski dönemlerde uygulanan ilkel ahşap oymacılığı, keski veya bazı sivri uçlu kesiciler yardımıyla elle yapılırdı ayrıca bitmiş eserin kalitesi, tamamen oyma ustasının çok zaman ve emek alan el becerilerine bağlıydı. Ahşabın işlenme kolaylığı sayesinde farklı formlarda bulunan birçok desenin ahşaba aktarılması ayrıca ahşabın hafifliği, ucuzluğu, bol miktarda bulunması ve üst yüzey kalitesinin zımpara ile kolayca sağlanması sayesinde diğer malzemelere göre daha fazla tercih sebebi olmuştur. Bununla birlikte gomalak cilası gibi uygun koruyucularda kullanılarak geçmişten günümüze uzun sürelerce saklanabilmiştir (Thapa ve ark., 2014).

Ahşap malzeme nem alabilen, böcekler tarafından tahribata uğrayabilen ve maalesef bunun sonucunda da dayanımı uzun süre devam edemeyen bir malzeme olsa da hâlâ dünyanın birçok yerinde binlerce yıl önce yapılmış ahşap oyma objelere rastlayabilmek mümkündür. Kuzey Amerika Kızılderililerinin, Polinezyalılar gibi kılıç üzerine oyma desenler yaptıkları ayrıca ahşaptan olta kancası oyduklarına dair veriler mevcuttur (Wikipedia, Wooden spoon, 2024).

18. yüzyılın sonlarına doğru ahşap oymacılığının makineler kullanılarak mekanik olarak işlenmesine yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda olumlu yönde veriler elde edilmiş ve pratik fikirler ortaya çıkmıştır. Bir İngiliz olan Sir Samuel Bentham, 1793'te bugün bile hala kullanılan ahşap işleme prensiplerinin patentini almıştır. Buluşları arasında birçok farklı ahşap işleme makinesi mevcuttur (Wikipedia, Samuel Bentham, 2024).

Ahşap malzemeyi işlemek için elle çalıştırılan veya elektrikle çalıştırılan çok sayıda alet olmasına rağmen, bunları kullanabilmek için yetenekli ellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bilgisayar alanındaki gelişmeler, ahşap oyma işlemini daha hızlı, daha hassas ve işçilik becerilerinden bağımsız hale getiren bilgisayar kontrollü ahşap oyma makinelerinin icat edilmesini mümkün kılmıştır. Her ne kadar bu makineler ahşap oymacılığını çok yüksek seviyelere taşıyacak kapasitede olsa da, yine de inanılmaz tasarımların gerçekleşmesi için onlara rehberlik edecek ve komut verecek insan gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (Thapa ve ark., 2014).

B. CNC Router

CNC; Computer Numeric Control ifadelerinin kısaltılması olan, kelime anlamı olarak ise bilgisayar destekli sayısal kontrol olarak tarif edilmektedir. CNC makineleri bilgisayar yardımı ile kontrolü sağlanan tam otomatik makinelerdir. Bununla birlikte yapılacak işin daha kolay ve seri halde üretilebilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır. Farklı işlemler için tasarlanmış pek çok CNC makinesi mevcuttur. CNC Router, CNC Freze, CNC Pres, CNC Robotik ve CNC Torna bu tür makinelerin bir kısmıdır. CNC Router makine grubu da bilgisayar kontrol sistemine sahiptir ve bu gruptaki makineler geniş işleme alanına sahip dik işleme tezgâhlarıdır. CNC Routerlar birçok farklı malzeme üzerinde oyma, şekillendirme, yazı kazıma, rölyef, işlemleri gerçekleştirmeyi sağlayan makinelerdir. Bu makinelerde; hafif metaller, ahşap, mdf, sunta, kompozit, poliüretan v.b. gibi malzemeler işlenebilmektedir (Şahin rulman, 2024). Wood Router olarak da bilinen bu makinelerin bir örneği şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: CNC router (Pinterest Inc.,2024, DT-1224T 5 axis automatic CNC Router).

B. 1. Ticari CNC router türleri

CNC router makineleri genellikle eksen sayısına göre sınıflandırılırlar ayrıca yapılacak işin karmaşıklığı ve zorluğu arttıkça CNC router'ın eksen sayısı da artırılabilir (Thapa ve ark., 2014).

B. 1.1. İki eksenli CNC router

2 eksenli CNC routerlar hobi eşyalarının yapımında kullanılabileceği gibi, temel ev eşyalarının yapımında da kullanılan en basit CNC türüdür. Bu tip CNC routerların gerçek bir Z eksenini yoktur, bu nedenle endüstriyel uygulamalarda çok fazla tercih edilmezler. Bu makineler düz plaka üzerinde sabit derinlikte şekiller oluşturabilirler (Thapa ve ark., 2014). Böyle bir çalışmanın örneği şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2: 2 eksen CNC'de çalışılmış bir desen örneği (Morgül Pleksi, 2024, CNC Kesim Hizmetleri Siteler/Ankara)

B. 1.2. Üç eksen CNC router

3 eksenli CNC routerlar; X, Y ve Z yönlerinde hareket edebilen CNC türüdür bu sebeple en yaygın kullanılan CNC router çeşididir. Bu makinelerde kullanılan Z yönü kullanılan kesici takımın yüksekliği ile ilgilidir (Thapa ve ark., 2014). Şekil 3'de bu makinelerde yapılabilecek işlerden birine örnek gösterilmiştir.



Şekil 3: 3 eksen CNC'de çalışılmış oyma örneği (Pinterest Inc., 2024, Carving With a CNC Router).

B. 1. 3. Dört eksen CNC torna

Torna frezeler hem kesici takımı hem de iş parçasını döndürme yeteneğine sahip tezgahlardır. Şekil 4'de frezeleme işleminin yanı sıra tormalama işlemini de gerçekleştiren bir freze torna CNC router gösterilmektedir (Thapa ve ark., 2014).



Şekil 4: 4 eksen CNC ahşap torna makinesi (Nesto, 2024, CNC Ahşap Torna Makineleri)

B. 1. 4. Beş eksen CNC router

Beş eksen tezgâhlar genel olarak otomobil üretimi, tekne ve havacılıkta kullanılan parçaların yapımı için kullanılırlar. Üç boyutlu iş parçalarını hareket ettirmeden şekillendiren bu tezgahlar temel üç eksen dışında ek 2 eksen daha kullanarak 5 eksenli CNC routerlar olarak kullanımdadırlar. Şekil 5'te beş eksen bir CNC router gösterilmektedir (Thapa ve ark., 2014).



Şekil 5: Beş eksen CNC router (Pinterest Inc., 2024, 1730 5 Axis Atc CNC Router).

C. Mobilya Sektör Raporu

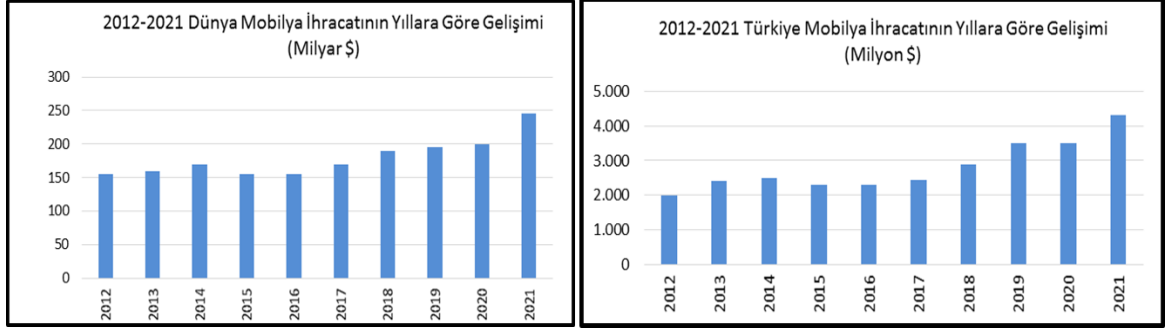
C. 1. Sektörün Dünya Ekonomisi ve AB Ülkelerindeki Durumu

Ülkemizde stratejik bir önem taşıyan Mobilya sanayi, yarattığı “katma değer” sayesinde ülkemize ekonomik anlamda büyük değere sahiptir. Yüksek istihdam potansiyeli sebebiyle dikkatle ele alınması gereken Mobilya sanayi, aynı zamanda geliştirmelere ve yenilikçi projelere de açık bir sektördür (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

Endüstriyel üretimimiz 1970’li yıllarda başlamış olsa da Mobilya sektörünün ülkemizdeki başlangıcı oldukça eskilere dayanmaktadır. 2020 yılına ait sektör cirosu 58,8 milyar TL ile imalat sanayi içindeki payını %1,9 olarak belirlemiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

2019 yılına ait cirosu 700 milyar \$’ı aşan Dünya mobilya sektörünün, 2030 yılına kadar yıllık ortalama %6,3 büyümesi beklenmektedir. Böylelikle sektördeki pazar büyüklüğünün 1.4 trilyon \$’a ulaşması tahmin edilmektedir. 2021 yılına ait Trademap verilerine göre dünya mobilya ihracatı büyüklüğü 243 milyar \$, ithalat büyüklüğü ise 227 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

Şekil 1’de gösterilen Dünya mobilya ihracatı 2012-2021 yılları arasında genel itibariyle büyüme eğilimi göstermiştir. 2012 yılında 160,3 milyar \$ olan dünya mobilya ihracatı, 2021 yılındaki 243 milyar \$’a ulaşmış ve bu dönemde dünya mobilya ihracat hacmini %51 oranında genişletmiştir. Türkiye’nin ihracat miktarı ise 2012 yılında %123 oranında büyüyerek 1,9 milyar \$’dan 4,2 milyar \$’a yükselmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021). 2012-2021 yıllarına ait mobilya ihracatı verileri Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6: Dünya-Türkiye Mobilya İhracatının Yıllara Göre Gelişimleri (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

Dünya mobilya ihracatında ilk sırada yer alan Çin, %36,3'lük payla sıralamanın en üstünde bulunmaktadır. Çin'den sonra en çok ihracat yapan ülkeler ise; Vietnam, Polonya, Almanya ve İtalya olarak devam etmektedir. Dünya mobilya ihracatında 11'ci sırada yer alan Türkiye, %1,74'lük pay sahibidir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

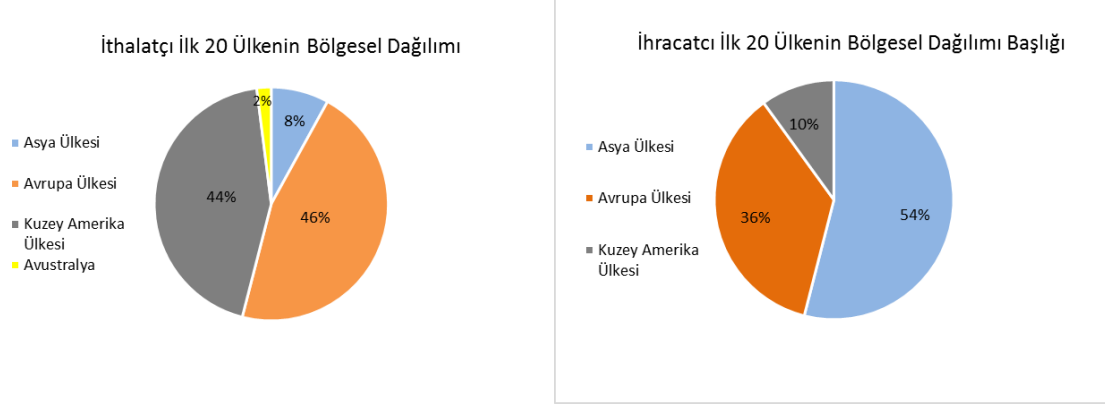
Mobilya ihracatçısı ilk 20 ülkenin 2017-2021 yıllarına ait ihracat verileri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Mobilya İhracatçısı İlk 20 Ülke Sıralaması (Milyar \$)(T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

Sıra No	İhracatçılar	2017	2018	2019	2020	2021	2017-21 Büyümesi %	Dünyadaki Payı %
1	Çin	59.296	64.287	64.629	70.086	88.046	48,5	36,3
2	Vietnam	6.318	6.998	8.985	11.364	18.390	191,1	7,6
3	Polonya	11.553	13.387	13.400	13.113	16.038	38,8	6,6
4	Almanya	12.987	14.080	13.770	12.905	15.125	16,5	6,2
5	İtalya	11.238	12.200	11.682	10.671	13.314	18,5	5,5
6	Meksika	8.215	8.193	8.111	7.058	8.800	7,1	3,6
7	ABD	8.456	8.352	7.886	6.609	7.137	-15,6	2,9
8	Çek Cumhuriyeti	4.548	4.792	4.517	4.275	4.746	4,3	2
9	Kanada	4.661	4.714	4.760	4.007	4.561	-2,2	1,9
10	Hollanda	2.754	3.083	3.022	3.406	4.372	58,7	1,8
11	Türkiye	2.360	2.687	3.416	3.427	4.227	79,1	1,74
12	Danimarka	2.420	2.576	2.616	2.686	3.283	35,6	1,4
13	İspanya	2.454	2.680	2.656	2.447	3.173	29,3	1,3
14	Malezya	2.447	2.536	2.902	3.219	3.138	28,2	1,3
15	Fransa	2.948	3.029	2.946	2.749	3.121	5,9	1,3
16	Endonezya	1.674	1.745	2.000	2.246	2.949	76,1	1,2
17	Litvanya	1.848	2.115	2.203	2.268	2.852	54,3	1,2
18	Romanya	2.426	2.744	2.709	2.314	2.650	9,2	1,1
19	İngiltere	3.143	3.127	3.392	2.511	2.502	-20,4	1
20	Hindistan	1.250	1.456	1.607	1.625	2.491	99,3	1
İlk 20 Ülke Toplamı		152.998	164.780	167.208	168.985	210.918		
Dünya Toplamı		179.386	193.407	195.214	195.832	242.804		
İlk 20 Ülkenin Dünya Toplamındaki Payı %		85,3	85,2	85,7	86,3	86,9		
Bölge		Asya Ülkesi	Avrupa Ülkesi	Kuzey Amerika Ülkesi				

Mobilya ihracatçısı ilk 20 ülkenin verilerine bakılacak olursa, 2021 yılında 211 milyar \$ ihracat rakamına ulaşıldığı görülmektedir böylelikle dünya mobilya ihracatının %87'i gerçekleşmiştir. Mobilya ithalatçısı ilk 20 ülkenin aynı şekilde ithalat verileri değerlendirilecek olursa 180 milyar \$ ithalat tutarına ulaşıldığı görülmüştür. Sonuç olarak dünya mobilya ithalatının %79'u bu şekilde gerçekleşmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

Dünya Mobilya İhracatçısı-İthalatçısı ilk 20 ülkenin bölgesel dağılımları Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7: Dünya Mobilya İhracatçısı-İthalatçısı İlk 20 Ülkenin Bölgesel Dağılımları (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

C. 2. Sektörün Değerlendirmesi

C. 2. 1. Son Dönemdeki Sektöre İlişkin Türkiye ve Dünyadaki Gelişmeler

Türkiye, yurtdışı müşterisine yüksek miktarda satışları kapsayan ihracat yöntemleri ile ulaşarak mobilya sektöründe dünyaya farklı şekillerde açılmaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

Yurtdışında satış mağazaları kurarak, tesis yatırımı yaparak ayrıca tüm bunlarla birlikte marka ve şirket satın alarak o ülkenin tüketicisine doğrudan ulaşmayı başarmış olan sektör son yıllarda bu şekilde bir strateji geliştirerek başarılı bir gelişime imza atmıştır. Bu sürece bağlı olarak önümüzdeki dönemlerde firmaların yurt dışındaki etkilerini artırarak mağaza ve dağıtım ağını genişleteceği tahmin edilmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

Girişimci Bilgi Sisteminden alınan verilerine göre sektör toplamda, 17.968.537 TL KOSGEB, 137.468 TL TÜBİTAK desteğinden yararlanmışır. Tüm bu verilerle birlikte, patent faydalı model sayısı 94, tasarım başvuru sayısı 1244, marka başvuru sayısı 915 olarak kayda geçmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu; 2021).

D. Gelecekte Bizi Ne Bekliyor?

CNC endüstrisinin 2022'den 2032'ye kadar her yıl ortalama %5 lik bir oranda büyüyerek gelişmesi beklenmektedir. Bu durum sektörün geleceğinin oldukça parlak olduğunu ortaya koymaktadır. CNC endüstrisinin sektörde ki payının 2032 yılına kadar 95 milyar dolardan 154 milyar dolara çıkacağı ön görülmektedir (Custom Components, 2024).

CNC üretim endüstrisi gelişmeye devam eden çok büyük bir sektördür ve buna bağlı olarak ortaya çıkan yeni ihtiyaçlar söz konusudur. Bu ihtiyaçlardan bir kısmını; ürün çeşidinin çoğalması, ürün teslim süresindeki gereksinimlerin artması, ürün talebinde ki değişikliklerin gündeme gelmesi, artan maliyet baskıları ve sürekli gelişen teknoloji ihtiyaçları olarak özetleyebiliriz. Bu faktörler, üretimde esnekliğin ve verimliliğin artırılması ihtiyacını doğurmuştur (Custom Components, 2024).

Yeni oluşan endüstri trendlerinin karmaşıklığına ayak uydurmak oldukça zor görünmektedir bu durum üreticilerin CNC işleme ileri düzey yeniliklere yatırım yapmaktan çok daha fazlasına ihtiyaç duyacakları gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Günümüzde CNC sektörünü şekillendiren en büyük trendler aşağıda verilen şekilde sıralanabilir (Custom Components, 2024):

- CNC makineleri ve destekleyici sistemlerinde yer alan otomasyonun artırılması,
- Esnek ve düşük hacimli üretimin oluşturulması,
- Üretim kontrolünün ve planlanmasının tamamen yazılımla sağlanması,
- Çok amaçlı CNC makineleriyle daha fazla "bir arada" işleme yeteneklerinin geliştirilmesi

- Mevcut işgücü durumu göz önüne alınarak, üretimin yeniden desteklenmesi ve sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır (Custom Components, 2024).

CNC işleme makineleri, imalat endüstrisinde devrim yaratmıştır. Gelişimi sürekli devam eden bu sektör karşılaştığı her zorlukta farklı çözüm önerileriyle çok daha önemli gelişmelere sebep olmuştur. CNC üretimindeki tüm bu değişimlerin, bireysel imalat şirketleri de dahil olmak üzere, küçük atölyeleri ve bir bütün olarak tüm endüstriyi farklı düzeylerde etkilediği tespit edilmiştir (Custom Components, 2024).

Değişimin ve gelişimin kaçınılmaz olduğu CNC sektörünün başka sistemlerin gelişimine de katkı sağladığı görülmektedir. Otomasyon, mühendislik, enerji depolama, yapay zeka ve makineleşme alanlarındaki hızlı teknolojik gelişmeler bir araya gelerek robotik sistemlerin süratle gelişimine sebep olmuştur. Bu sistemin geniş kapsamlı sonuçlarına bakıldığında bir zamanlar insanlar tarafından gerçekleştirilen birçok iş akışı süreci robotik sistemler tarafından devralınmaya başlanmıştır (Cone ve Lambert, 2019).

Son yirmi yılda dünya çapında kullanılan robotların sayısı üç kat artarak 2,25 milyona ulaşmıştır. Tahminler, küresel robot stoğunun önümüzdeki 20 yıl içinde çok daha hızlı artacağını, 2030 yılına kadar 20 milyona ulaşacağını ön görmekle birlikte yalnızca Çin'de 14 milyon olması beklenmektedir. Bu durumun sonuçlarının çok büyük etkilere ve zorluklara sebep olabileceği düşünülmektedir (Cone ve Lambert, 2019).

Robotların yükselişinin üretimde verimliliği artıracığı, ekonomik büyümeyi hızlandıracağı aynı zamanda da henüz var olmayan endüstrilerde yeni iş kollarının yaratılmasına olanak sağlayacağı tahmin edilse de tüm bu gelişmelerin yanında birçok sektörde var olan mevcut iş modellerinde ciddi bozulmalar yaşanacağı ön görülmektedir. 2030 yılına kadar, üretim sektöründe çalışan 20 milyon işçinin robotlar sebebiyle işini kaybedeceği tahmin edilmektedir (Cone ve Lambert, 2019).

Bu iş kayıplarının etkileri, ülkeler ve bölgeler arasında büyük farklılıklar gösterebilmekle beraber, düşük vasıflı işçiler ve ekonomik olarak fakir ülkeler üzerinde orantısız bir etki yaratabilecektir. Ekonomik gelir seviyesinin düşük olduğu yerel bölgelerde, robotik sistemlerin üretimde yer alması sebebiyle neredeyse iki kat daha fazla oranla işsizliğe sebep olabileceği tahmin edilmektedir. Bu durum siyasi kutuplaşmaya sebep olabileceği gibi sosyal ve ekonomik stresi de artırabilecektir (Cone ve Lambert, 2019).

Bireysel üretim süreçlerini etkileyecek birçok yenilikçi yaklaşımın sisteme dahil olabileceği gözükmeyle beraber bunlar arasında artan kişiye özel üretim ihtiyacı, çeşitli kalite ve izlenebilirlik gereksinimleri, ürün ve hizmet taleplerinde ki sürekli değişiklikler ile fabrikaların birbirine entegrasyonu da söz konusu olabilecektir (Custom Components, 2024). Söz konusu bu faktörlerin bir sonucu olarak şirketler, karlılıklarını artırmanın ve sermayelerini verimli bir şekilde kullanmanın yeni yollarını bulmak zorunda kalabileceklerdir. Verimliliği ve esnekliği artırmak için daha fazla işletmenin üretim süreçleri yönetimi noktasında ortak yazılım kullanarak veri paylaşımının ve şeffaflığın iyileştirilmesi ve benimsenmesiyle sistemin çok daha iyi seviyeye gelebileceği ön görülmektedir (Custom Components, 2024).

Tüm bu süreçlerden yola çıkarak, CNC router makineleri ilk üretildiklerinden bu yana uzun bir yol kat ederek tasarım ve üretim şeklimizi değiştirmiştir. Bu makinelerin üretim hassasiyeti, üretim sürecindeki doğruluk oranı ve işleme hızı gibi faktörler sayesinde ahşap işçiliğinden metal işçiliğine kadar birçok farklı üretim sistemini komple değiştirmiştir (Monpura Group, 2024).

CNC sistemleri karmaşık iş parçalarını yüksek hassasiyet, hız ve doğrulukla işleyerek üretim süreçlerini eşi benzeri görülmemiş hale getirmeyi başarmıştır. Ancak bu sistemi iyileştirmeye yönelik çalışmalar yeterli midir yoksa farklı arayışlar ve sistemler içerisine girilmeli midir tüm bu sorulara verilecek cevaplar hala merak konusudur. Çok yakın bir gelecek öngörüsü olarak, CNC operatörlerinin yerini, son yıllarda büyük ilerlemeler kaydeden yapay zeka ve öğrenen makine sistemlerinin alacağı düşünülmektedir. CNC makinelerinin son derece uyumlu ve bilgisayar sistemi alt yapısı sayesinde, yapay zeka ile entegrasyonunun kolaylıkla sağlanabileceği tahmin edilmektedir (Murthy ve ark., 2022).

Robotik ve insan-makine ara yüzlerindeki son gelişmeler, makinelerin ve insanların güçlü yönlerini birleştiren yeni işbirlikçi yaklaşımları mümkün kılmaktadır. Ahşap prefabrikasyon endüstrisindeki mevcut otomasyon teknolojileriyle karşılaştırıldığında insan-robot işbirliği (human-robot collaboration -HRC), daha esnek ve daha verimli bir üretimi mümkün kılacaktır. İnsan-robot işbirliğine ait tüm sistemin planlanması, üretimin tasarlanması ve insan merkezli yaklaşımların oluşturulması gerekmektedir. Bu çerçevede içerisinde köprü kuran tüm çalışmalar insan-robot işbirliğine ilişkin gelecekteki keşifleri ve araştırmaları destekleyecek ve böylece tüm sürecin hızlanmasına katkı sağlayacaktır (Yang ve ark., 2024).

İnsan robot işbirliğinde üretim ayağının tasarlanmasında, otomasyonun oluşturulmasında ve daha bunun gibi birçok sistemlerin planlanmasında süreci hızlandıran en önemli etmenin üniversitelerde verilen eğitim olduğu düşünülmektedir. Bir mesleğin temellerinin öğretilmesi aşamasında zaman verimliliğinden yola çıkarak kısa zamanda verimli bilginin elde edilmesine olanak sağlayan üniversitelerin yoğun eğitim yöntemlerine ihtiyaç duyacağı kesindir (Akulov ve ark., 2024).

Robotik sistemlerin yaratıcı insanlarla olan ilişkileri ele alınacak olursa sanatçılar ve robotlar arasında ki ilişkinin nasıl olacağı da ayrı bir araştırma konusu olacaktır. Rakip robotlar ile yaratıcı uygulayıcılar arasındaki etkileşim sonucunda, sanatçıların tasarımlarını yeniden gözden geçirerek tekrar tasarlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu robotlarla yapılan çalışmaların sonucunda, sanatçıların yaratıcılık içeren uygulamalarda makinelerle olan işbirliğinden nasıl etkileenecekleri de araştırılmalıdır. Ayrıca robotik sistemlerin ileride çok daha gelişerek tüm sisteme müdahale edebilecek hale geleceği tahmin edilmektedir ve bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır (Lee ve Ju, 2024).

D. 1. CNC ve Robotik Sistemler

Bu kısımda ki ele alınacak en temel fikir, minimum düzeyde insan gücü gerektiren ve süreci verimli bir şekilde sürdüren makinelerden oluşan bir ortam yaratmaktır. CNC tezgahları ve robotik sistemlerin birlikte çalışabilmesi için çeşitli projeler yürütülmektedir. CNC Makineleri mevcut işlerine devam ederken üretilen parçaların paketlenmesi ve taşınması için robotlar kullanılabilir. Bu sistemin amacı, CNC operatörünün bu makine sistemini kolayca kontrol ederek minimum eforla maksimum verime ulaşmasını sağlayacak şekilde bir yazılım oluşturmak olacaktır. Yapay Zeka ve Makine etkileşiminin artan bir ivmeyle gelişmesi sonucunda, CNC Makineleri ve robotların işbirliği çok yakın bir gelecekte gerçekleşebilecektir (Murthy ve ark., 2022).

D. 2. Dijitalleşme

Dijitalleşme süreci; bir nesnenin veya sürecin sanal ortamda simüle edilmesi o nesnenin veya sürecin durumu hakkında çok daha etkin ve anlaşılır bir şekilde fikir edinmemizi sağlayacaktır. Bu süreç temel olarak verilerin toplanmasını, analiz edilmesini ve simülasyonun oluşturulmasını içerecektir. Bu durum üretim kolaylığı sağlayacak ve birçok yeni fikrin hayata geçmesine yardımcı olacaktır. Tasarım mühendisleri simülasyon bulgularını üretim planlama ve işleme süreci üzerinde çok etkili şekilde kullanabileceklerdir (Murthy ve ark., 2022).

D. 3. CNC Makinelerinin Kişiselleştirilmesi

Zaman içerisinde, CNC Makineleri daha uygun fiyatla ulaşabileceğimiz, daha az yer kaplayan ve kullanımı çok daha kolay olan makine sistemleri haline dönüşeceklerdir. Bu bağlamda CNC makine üreticileri, makinelerin sadece endüstriyel kullanımını değil kişisel kullanımını da artırmayı hedeflemektedirler. Tıpkı 3D baskının günümüzde çok popüler hale gelmesi gibi, CNC Makineleri de, kompakt ve kullanımı kolay hale getirilerek uygun fiyatla benzer taleplere sahip olabileceklerdir. Bu sayede insanlar CNC makinelerini kendi kişisel atölyelerinde kullanabileceklerdir. İlk bilgisayarın keşfi gibi kimse icat edildiği dönemde bu kadar yaygınlaşacağını, hatta cebimize bile sığabileceğini ön görememişti. CNC Makineleri içinde benzer bir durumun olması muhtemel gözükmeyle birlikte bu makinelere yönelik üretim çalışmalarının artması da çok olası bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu inanılmaz sürecin yeni fikirleri ve ön görülemez yeni gelişmeleri ortaya çıkaracağı muhtemeldir (Murthy ve ark., 2022).

Boşa harcanacak zamanın olmadığı günümüzde CNC makinelerinin tümü, insan gücünün kullanıldığı diğer makinelere göre çok daha az hatayla üretim yapabilen ve tüm sistemi üretim programlarıyla uyumlu hale getiren en ideal yaklaşımdır. Gelişen teknoloji ve yeniliklerle birlikte, CNC makinelerinin tüm dünyada öncelikli hale gelerek kullanımının şart olduğu söylenebilir. Böylelikle üretimde verimliliğin artması ile boşa giden zaman ve iş gücünün azaltılması mümkün olacaktır (Murthy ve ark., 2022).

III. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yeni mühendislik altyapısı ile geleneksel ahşap oymacılığı öğretisinin ve özgün Türk mobilyası tasarımının birleştirilmesi gerekliliği ve bu hususta teknolojiyle entegrasyonun şart olduğu kabul edilen bir gerçektir. Tüm bu hususlar beraberinde yeni ihtiyaçlar doğurmuştur. Geleneksel ahşap oymacılığının özgün ve yaratıcı yeni tasarımlarla birlikte CNC endüstriyle bağlantılı olmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu gereklilik gerçekleştirildiğinde oyma kültür mirasımızın bizden sonraki kuşaklara çok daha etkin aktarılacağı düşünülmektedir. Ahşap oyma öğretisinin yeniden düzenlenmesi, zamana adapte edilmesi ve günümüz koşullarına göre uyarlanması gerektiği açıktır. Dünyada birçok sektörde olduğu gibi kişiye özel tasarlanmış endüstriyel ürünlerin çoğaldığını görmekteyiz. Bu durumun ahşap mobilya tasarımları içinde geçerli olduğu söylenebilir.

Her ne kadar üretim planlama konusunda CNC endüstrisine adapte olsak ta mobilya sektörü tasarım ağırlıklı bir sektördür. Tasarım ise yaratıcılıkla iç içe bir kavramdır. Bu bağlamda Türk mobilyası tasarımını gerçekleştirirken özgün bir tasarım oluşturulmalı ve yaratıcılık dediğimiz kavramla birleştirilerek bu konuda hem üniversitelerden hem genç ve yetenekli öğrencilerden destek alınmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. Tüm bu unsurlarla beraber devlet desteğinin de bu konuda çok önemli olduğunu ve devlet ile özel sektör ayağının bahsedilen üniversite ve yetenekli öğrenci ayağıyla birleştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Üniversitelerden mentorluk ve koçluk desteği alınmasının sektöre canlılık ve hareketlilik katacağı düşünülmektedir.

Mobilya sektörünün bu tarz yenilikçi atılımları sayesinde ülkemize sağlayacağı katma değer yanında tüm dünyada ses getirebilecek tasarımların oluşturulmasıyla ihracatımızın artacağı ve bu konuda söz sahibi ülkeler arasına girebileceğimiz ön görülmektedir. Bu yenilenme sürecinde mühendislik altyapısı dikkate alınmalı ve teorik öğrenme ile uygulama pratiğinin birlikteliğinin teknolojiye ve robotlaşan yeni mühendislik alt yapısına uyumunun sağlanması üzerine çalışılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu konuda üniversite ve sektör çalışanlarının birlikte yürüteceği projeler ve çalışmalar çok kıymetlidir. Sektörün gelecek planları için yapılacak olan söz konusu bu projelerde devlet desteğinin de ele alınması gereklidir. Mobilya sektörünün yeni mühendislik yaklaşımlarının yanında özgün tasarımlara da ihtiyacının olduğu unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- Aamir, N., (2018). The Rise and Fall of the Tradition of Woodcarving in the Subcontinent. *Journal of the Punjab University Historical Society*, Volume No. 31:161-171.
- Akulov, A., Zhelieznov, K., Zabolotnyi, O., Chabaniuk, E., & Shvets, A. (2024). Computer training tools for students and graduates of railway universities in the development of practical skills. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 03064190241227529.
- Cone, E., & Lambert, J. (2019). How robots change the world.
- Custom Components. (2024). The Future of CNC Machining: Trends and Predictions. Erişim: <https://www.americanmicroinc.com/resources/future-cnc-machining-trends-predictions/#:~:text=Looking%20ahead%2C%20CNC%20machines%20will,now%20and%20in%20the%20future.>
- Ersoy, A., (1993). XV. Yüzyıl Osmanlı Ağaç İşçiliği, Marmara Üniversitesi Yayın No:509, Atatürk Eğitim Fakültesi Yayın No:14, İstanbul.
- Lee, S., & Ju, W. (2024). Adversarial robots as creative collaborators. arXiv preprint arXiv:2402.03691.
- Monpura Group. (2024). How CNC Router Machines will change in the future and what to expect in the next few years. Erişim: <https://monpuragroup.com/how-cnc-router-machines-will-change-in-the-future/>.
- Morgül Pleksi. (2024). CNC Kesim Hizmetleri Siteler/Ankara. Erişim: <https://www.morgulpleksi.com.tr/cnc-kesim-ankara.aspx>.
- Murthy, D., Rao, P. N., & Raju, C. V. (2022). Cnc Machines–Case Study And Part Analysis, ISSN 2321–9416www.iajme.org, Vol 10, Issue 1, Feb.
- Nesto. (2024). CNC Ahşap Torna Makineleri. Erişim: <https://nesto.com.tr/tr/4-axis-pro-cnc-wood-lathe-machine/>.
- Pinterest Inc. (2024). 1730 5 Axis Atc CNC Router. Erişim: <https://tr.pinterest.com/pin/602426887658291336/>.
- Pinterest Inc. (2024). Carving With a CNC Router. Erişim: <https://tr.pinterest.com/pin/645422190379657963/>.
- Pinterest Inc. (2024). DT-1224T 5 axis automatic CNC Router. Erişim: <https://tr.pinterest.com/pin/162974080252432738/>.
- Sanela, H., Atif, H., (2017). "The use of CNC machines in development of modern furniture", *Sprunbrett Conference*, Biel, Switzerland.
- Şahin rulman. (2024). CNC Router Nedir? Ne İşe Yarar? Nasıl Kullanılır? Erişim: <https://www.sahinrulman.com/cnc-router-nedir-ne-ise-yarar-nasil-kullanilir/blog>.
- T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Aksaray İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2024). Ahşap İşçiliği ve Oyma Sanatı. Erişim: <https://aksaray.ktb.gov.tr/TR-232502/ahsap-isciligi-ve-oyma-sanati.html>.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilya Sektör Raporu. (2021). Erişim: <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sektor-raporlari/mu2812011412>.
- Thapa, S., Sharma, S. G., & Duvedi, R. K. G. (2014). Structural design of 3-axis cnc machine tool for wood carving, Doctoral dissertation.
- Wikipedia. (2024). Samuel Bentham. Erişim: http://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_Bentham.

Wikipedia. (2024). Wooden spoon. Erişim: http://en.wikipedia.org/wiki/Wooden_spoon.

Yang, X., Amtsberg, F., Sedlmair, M., & Menges, A. (2024). Challenges and potential for human–robot collaboration in timber prefabrication. *Automation in Construction*, 160, 105333.

Derleme Makalesi

Türkiye Hidrojen Enerjisi Stratejilerinin ve Geliştirilen Politikaların Araştırılması

 **Gülbahar Bilgiç Tüzemen**

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir 50300, Türkiye

Sorumlu Yazar: glbhrblg@nevsehir.edu.tr

Makale Bilgileri:

Geliş: 08/05/2024, Revizyon: 29/05/2024, Kabul: 11/06/2024.

ÖZET

Çevresel etkisinin az olması nedeniyle hidrojen, fosil yakıtlara dayalı enerji kaynaklarının değerli bir alternatifidir. Evrendeki en yaygın element olan hidrojen, doğal dünyada serbest halde değil, bileşikler halinde bulunur. Hidrojen, sanayiden ulaşıma, yenilenebilir enerjinin entegrasyonundan yeşil kimyasalların üretimine kadar çok çeşitli alanlarda kullanım alanı bulmaktadır. İklim değişikliğiyle mücadelede teknolojinin ilerlemesi ve küresel ölçekte enerji tüketiminin artması nedeniyle hidrojen teknolojilerine yapılan yatırımların önümüzdeki yıllarda artması bekleniyor. Çalışmada Türkiye'nin 2053 net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda hidrojen teknolojilerinin yerli olarak geliştirilmesine yönelik planlar incelendi. Yayımlanan Türkiye Hidrojen Teknolojileri'nin stratejik yol haritası doğrultusunda mevcut durum, hedefler ve politikalar araştırıldı. Araştırmada ayrıca, küresel ve Türkiye'deki çalışmalar ve sektördeki gelişmeler dikkate alınarak hidrojen üretimi, depolanması, dağıtımı ve kullanımına ilişkin teknolojiler incelendi. Örneğin Türkiye elektrolizörün kurulu güç kapasitesinin 2053 yılında 70 GW'a ulaşması öngörülmüyor. Dahası bu çalışmada hidrojenle ilgili mevcut yasaların gözden geçirilmesi ve uyarlanması, yeşil hidrojenin üretimi ve depolanmasında yerli bileşenlerin kullanımına yönelik sertifikasyon ve teşvik programlarının geliştirilmesi, milli ve yerli teknolojilerin oluşturulmasına yönelik araştırma-geliştirme ile ürün geliştirme çalışmalarının yapılması yapılmaması gerekenlere değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Türkiye, Hidrojen Enerjisi, Fosil yakıtlar, Elektrolizör*

Research of Türkiye Hydrogen Energy Strategies and Developed Policies

ABSTRACT

Due to its low environmental impact, hydrogen is a valuable alternative to energy sources based on fossil fuels. Hydrogen, the most common element in the universe, is found in the natural world not in free form but in compounds. Hydrogen finds use in a wide variety of areas, from industry to transportation, from the integration of renewable energy to the production of green chemicals. Investments in hydrogen technologies are expected to increase in the coming years due to the advancement of technology in the fight against climate change and the increase in energy consumption on a global scale. In the study, plans for domestic development of hydrogen technologies in line with Turkey's 2053 net zero carbon emission target were examined. The current situation, targets and policies were investigated in line with the published strategic road map of Türkiye Hydrogen Technologies. In the research, technologies related to hydrogen production, storage, distribution and use were examined, taking into account global and Turkish studies and developments in the sector. For example, the installed power capacity of electrolyzers in Türkiye is expected to reach 70 GW in 2053. Moreover, in this study, the review and adaptation of existing laws regarding hydrogen, the development of certification and incentive programs

for the use of domestic components in the production and storage of green hydrogen, and the research and development and product development studies aimed at the creation of national and domestic technologies are mentioned.

Keywords: *Türkiye, Hydrogen Energy, Fossil fuels, Electrolyzer*

I. GİRİŞ

Dünyanın artan enerji ihtiyacının büyük bir kısmı hala fosil yakıtlardan karşılanmaktadır ancak bu kaynaklar giderek tükenmekte, ayrıca havayı ve çevreyi ciddi şekilde kirletmektedir. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, bu sorunların çözümü için umut vadeden alternatif bir enerji kaynağıdır. Son yıllarda hidrojen enerjisine odaklanan çok sayıda araştırma ve geliştirme çalışmasının olmasının nedeni de budur. Hidrojeni kullanan teknolojiler, enerjinin dönüşümünde bir diğer önemli bileşeni olarak ortaya çıkmaktadır. Halihazırda ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan elde edilen hidrojenin ulaşım, ısıtma ve elektrik üretimi gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılacağı öngörülmüştür. Ayrıca, özellikle net sıfır emisyon hedefleri kapsamında yeşil hidrojen üretiminin de önem kazanması bekleniyor (SBB, 2023). Gelişmiş ülkeler, dünyanın artan enerji talebinin temiz, yenilenebilir hidrojen enerjisiyle karşılamak son derece kapsamlı, büyük proje ve yatırım yapmaktadırlar.

Enerji kaynaklı faktörlerin Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının yaklaşık %70'ini oluşturduğu göz önüne alındığında, yeşil hidrojen gibi alternatif temiz enerji teknolojilerinin kullanılması yoluyla ülke, yeşil ve dijital dönüşüm sürecinde ve dünya çapında daha rekabetçi hale gelecektir (SBB, 2023). Enerjide bağımsız olmak, sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçmek ve ileri teknolojiler yaratmak için; Türkiye hidrojen enerjisinin geliştirilmesinden büyük bir fayda görebilir. Bu bağlamda hidrojen enerjisi, Türkiye'nin enerji politikalarını gerçekleştirmek için kullanabileceği güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Yenilikçi teknoloji, teşvik programlarının benimsenmesi ve yasa koyucuların bu alanda yapacakları mevzuat düzenlemeler bu ilerlemeyi mümkün kılacaktır. Bu çalışmada Türkiye'nin hidrojen üretim kapasitesi ve potansiyeli değerlendirilmiştir. Türkiye enerjide dışa bağımlı olduğundan hidrojen enerjisine öncelik verilmesi son derece önemlidir. Türkiye, hidrojen üretim teknolojisinde gerekli araştırma ve geliştirme çalışmalarına başlanıp devam ettirebilirse, ucuz yeşil hidrojen üretebilir ve ithal enerjiye olan bağımlılıktan kurtulabilir.

II. KÜRESEL HİDROJEN ÜRETİMİ VE TÜKETİMİ

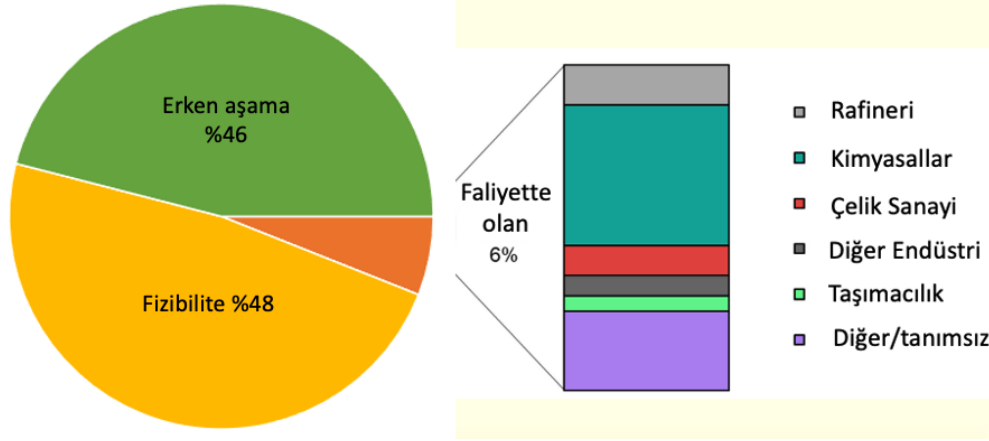
Hidrojenin oluşması için birincil bir enerji kaynağı gereklidir. Bu kaynakların doğasına bağlı olarak hidrojen üretimin çeşitli yöntemleri kullanılmaktadır. Üretilen kaynağa bağlı olarak hidrojen renklere ayrılmıştır. Bunlar "Yeşil hidrojen" yenilenebilir enerji kullanılarak üretilen hidrojeni ; "mavi hidrojen", karbon dioksit (CO₂) yakalama sistemleri kullanılarak fosil yakıtlardan üretilen hidrojeni; "turkuaz hidrojen" piroliz gibi işlemlerle CO₂ içermeyen fosil yakıtlardan üretilen hidrojeni ve "pembe hidrojen" veya doğal hidrojen, nükleer enerji kullanılarak üretilen hidrojeni ifade eder. Gazın yeniden düzenlenmesinden geliyorsa "gri hidrojen", kömürden CO₂ çıkarmak için kullanılan gazlaştırma işleminden geliyorsa "kahverengi hidrojen" olarak adlandırılır. Karbondan arındırılmış hidrojen üretimi, emisyon azaltma hedeflerine ulaşma açısından önemlidir (Amin et al., 2022). Tablo 1 de kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri ve karbon salınımları gösterilmiştir.

2022 yılında dünya çapında yaklaşık 95 mega ton (Mt) hidrojen üretilmiştir. Bu rakam, 2021'e göre %3 artış göstermiştir. Fosil yakıtların aralıksız kullanımı, hidrojen üretimini kontrol altında tutan büyük çoğunluğuna sahiptir. Çoğunlukla Çin'de bulunan azaltılmamış kömür, bu üretimin %21'lik kısmını oluşturmaktadır. Dünya çapındaki hidrojen üretiminin %62'sini karbon yakalama, kullanma ve depolama içermeyen doğal gazdan üretimi oluşturmaktadır. %16'sı, rafinerilerde ve petrokimya sektöründe nafta reformasyonu sırasında ortaya çıkan ve sıklıkla ek rafineri ve dönüşüm işlemleri (hidrokraking ve kükürt giderme gibi) için kullanılan yan ürün olarak oluşan hidrojeni kapsamaktadır (IEA, 2023; IEA, 2023). Şekil 1'de 2030 yılına kadar duruma ve sektöre göre düşük emisyonlu hidrojen üretiminin payı gösterilmektedir. 2030 yılına kadar açıklanan projelerde inşaatı devam eden veya nihai yatırım kararı alınmış olan projeler, üretim bazında açıklanan projelerin yalnızca %6'ünü oluşturmaktadır (IEA, 2024).

Bu projelerin neredeyse yarısı rafineriler ve kimya endüstrisindeki mevcut hidrojen kullanımlarıyla bağlantılıdır. Açıklanan hidrojen üretim projeleri arasında elektrolizör projeleri öne çıkmaktadır: 2030'da düşük emisyonlu hidrojen üretiminin %70'inden fazlası elektrolizden geleceği öngörülmektedir. Ancak açıklanan elektrolizör projelerinin %55'i geliştirmenin ilk aşamasındadır. Bu projelerin daha da geliştirilmesinin zaman alacağı göz önüne alındığında, önümüzdeki yıllarda gerçekleştirilecek çabalar bu projelerin 2030 yılına kadar faaliyete geçmesini sağlamak açısından kritik öneme sahip olacaktır (IEA, 2024).

Tablo 1. Kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri ve karbon salınımları (SBB, 2023; IEA, 2024;ETKB, 2023a).

Hidrojen Çeşidi	Üretim yöntemi	Enerji kaynağı	Karbon Ayak İzi (kgCO ₂ /kgH ₂)	Maliyet (ABD doları/kgH ₂)
Yeşil	Su elektrolizi	Yenilenebilir enerji	<1	4,0-9,0
Pembe/Sarı	Su elektrolizi	Nükleer enerji	<2	3,5-7,0
Mavi	Buhar metan reformu	Doğal gaz ve kömür	<4	1,5-3,00
Turkuaz	Piroliz	Fosil yakıt	<3	1,25-2,20
Gri	Buhar metan reformu	Doğal gaz	8-10	0,5-1,70
Kahverengi	Gazlaştırma	Kömür	>20	1,0-2,2



Şekil 1. 2030 yılına kadar duruma ve sektöre göre düşük emisyonlu hidrojen üretimi

Not: "Fizibilite", fizibilite çalışması yapılan projeleri kapsar; "Erken aşama", yalnızca paydaşlar arasında bir iş birliği anlaşılacağı projeler gibi çok erken aşamalarda projeleri içermektedir. "Diğer/tanımsız", kullanımı belirtilmeyen projeleri ve diğer hidrojen kullanımlarını içermektedir (IEA, 2024).

Hidrojen tüketimi incelendiğinde, dünya genelinde tüketilen hidrojenin tamamına yakını doğal gaz ve kömür kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu çerçevede, üretilen doğal gazın %6'sı ve üretilen kömürün %2'si hidrojen üretiminde kullanılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) "Küresel Hidrojen Görünümü 2022" raporuna göre, 2021 yılında yaklaşık 20 milyon ton hidrojen diğer gazlardan ayrışmadan demir-çelik sektöründe ve metan üretiminde kullanılmaktadır. Çin, 2021 yılında yaklaşık 28 milyon ton taleple dünyanın en büyük hidrojen tüketicisi konumundadır. Ağır vasıta taşımacılığı sektörü ise Çin'deki hidrojen kullanımında hakimiyetini sürdürmektedir. 2021'in sonunda dünyada 4.100 civarındaki yakıt hücreli otobüslerin %85'inden fazlasını ve 4.300 civarındaki tüm yakıt hücreli kamyonların %95'inden fazlasını Çin'dedir. ABD ve Ortadoğu ülkeleri, her biri yaklaşık 12 milyon ton

taleple dünyadaki en büyük ikinci ve üçüncü hidrojen tüketicisi olup Avrupa ülkeleri ise toplam 8 milyon ton ile dördüncü sıradadır. Yıllık hidrojen üretiminin %95'i, metan gazı veya diğer türevlerin reformasyonu ile fosil yakıtlardan gelmekte ve yalnızca %5'i sürdürülebilir bir şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrolizle üretilmektedir. Bu dağılım, esas olarak hidrojen üretim maliyetinden etkilenmektedir. 2021 yılı verilerine göre, doğal gaz ile hidrojen üretiminin maliyeti kilogram başına 1,0-2,5 ABD doları aralığında iken karbon tutma, kullanma ve depolama (Carbon Capture, Utilisation and Storage - CCUS) teknolojisinin kullanımı ile maliyet aralığı kilogram başına 1,5-3,0 ABD dolardır (IEA, 2023; IEA, 2024).

Türkiye ve dünyada enerji kullanımındaki artış göz önüne alındığında hidrojenin çevre üzerinde önemli bir etkisi olacaktır. Mevcut tahminlere göre, 2030 yılına gelindiğinde endüstriyel uygulamaların ve gaz ağlarının daha fazla düşük karbonlu hidrojene ihtiyaç duyacağı tahmin edilmektedir. Denizcilik, havacılık ve demir-çelik endüstrilerinde daha uzun vadeli kullanımlar öngörülmektedir (ETKB, 2023a; TSKB, 2023).

Hidrojen, doğrudan uygulamasının yanı sıra, yakıt olarak ve birçok endüstriyel süreçte kullanım açısından büyük potansiyele sahip metanol ve amonyak gibi bileşiklerin yapımında da kullanılabilir. Bu hidrojen türevli yakıtlar, taşımaları ve depolamaları daha kolay olduğundan, belirli senaryolarda ve belirli kullanımlar için daha caziptir. Sanayi sektörü üretilen hidrojenli kimyasallar, demir-çelik, çimento, cam ve seramik gibi şeyler için kullanılmaktadır. Bu kimyasallar gaz türbinlerinde olduğu gibi, doğrudan saf veya doğal gazla birlikte kullanılabilir. Ayrıca uzay projelerinde, ulaşım, ev ve endüstriyel kullanımda ve uçaklarda yakıt hücresi uygulamalarında da kullanılmaktadır.

III. KÜRESEL PROJE, VİZYON VE HEDEFLER

Avrupa Birliği'nin uzun vadeli hedefleri arasında, Avrupa'nın enerji tüketimindeki hidrojen oranının 2050 yılına kadar %13-14'e çıkarılması planlanmaktadır (Energy, 2020). Bu stratejilerin kapsamına giren teknolojilerde uzmanlık geliştirerek ve başvuruları tamamlayarak bu hedeflere ulaşmak ve dünya çapında rekabetçi olabilmek amacıyla, AB'nin altıncı büyük ticaret ortağı ve küresel yenilenebilir enerji sektörünün önemli bir katılımcısı olan Türkiye, hidrojen alanında net bir ulusal strateji sunmaya çalışmaktadır. Avrupa Komisyonu'na üye ülkeler tarafından Mart 2022'de açıklanan REPowerEU Planı'na göre fosil yakıtlardan bağımsızlığa ulaşmak için 2030 yılına kadar 10 milyon ton yeşil hidrojen üretilip ithal edilmesi gerekmektedir. Bu teklif ile 2030 yılına kadar 65-80 GW Kurulu elektrolizör kapasitesi hedeflenmiştir (Commission Europa, 2023). Tablo 2 de çeşitli ülkelerinin ve Türkiye'nin yeşil hidrojen üretimi doğrultusunda elektrolizör kapasite hedefleri verilmiştir.

Tablo 2. Ülkelerin elektrolizör ve yeşil hidrojen kapasite hedefleri (ETKB, 2023a; World-Nuclear, 2023; IEA, 2022)

Ülkeler	Mevcut Durum ve Hedefler
Almanya	2030 yılı için planlanan elektrolizör kapasitesi on gigawatt'tır. Bu elektrolizör kapasitesini korumak için 20 TWh yenilenebilir enerji (güneş veya rüzgardan) gerekmektedir.
İngiltere	2030 yılına kadar 10 GW düşük karbonlu hidrojen üretilmeli ve elektrolitik hidrojen, toplamın en az yarısını oluşturmalıdır.
İspanya	2030 yılı elektrolizör kapasite hedefi 4 GW'tır.
Avustralya	2030 yılına kadar tamamlanması planlanan projelere göre, yaklaşık 50 GW'lık bir elektrolizör kapasitesi öngörülmektedir. 2030 yılına kadar 3,8 milyon metrik ton hidrojen, yani yaklaşık 9,5 milyar Avustralya doları ihraç etme hedefleniyor.
Fransa	2030 yılı için hedef elektrolizör kapasitesi 6,5 GW'tır. Gri hidrojen, 2020 yılı itibarıyla ton CO başına 44,6 euro karbon vergisine tabi olacaktır.
Hollanda	2030 yılına kadar 3-4 GW'lık elektrolizör kapasitesi kurulmalıdır. Hedefler 50 hidrojen dolum istasyonu, 15.000 yakıt hücreli araç ve 3.000 kamyonudur.
Danimarka	2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasite hedefi 4-6 GW'tır.

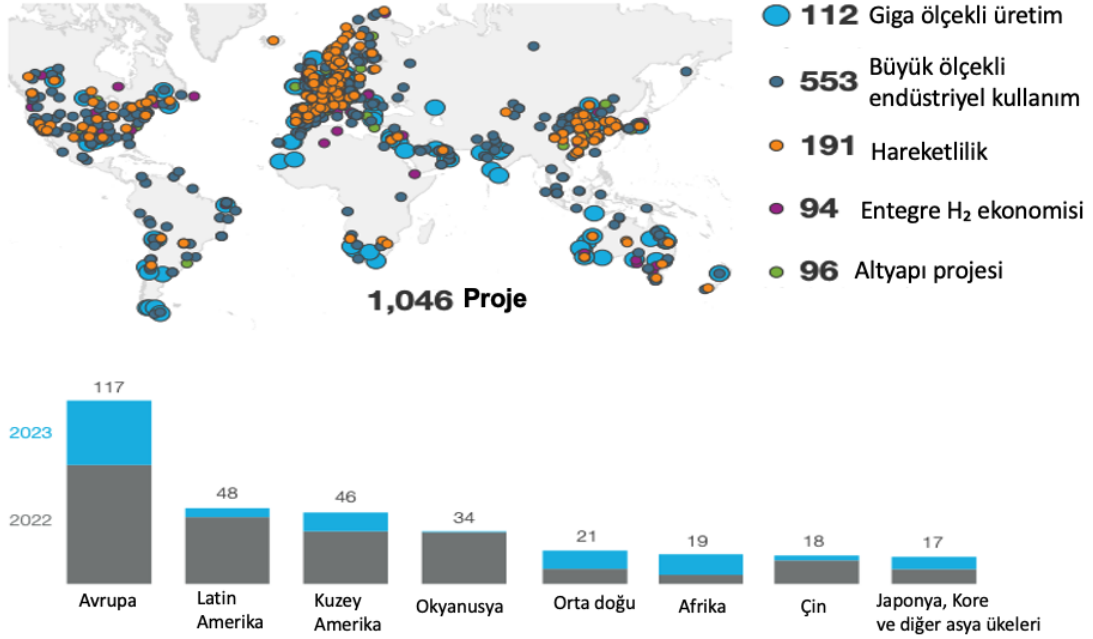
İsveç	2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasite hedefi 5 GW'tır.
Polonya	2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasite hedefi 2 GW'tır.
Türkiye	Elektrolizörün kurulu güç kapasitesinin 2030'da 2 GW'a, 2035'te 5 GW'a, 2053'te ise 70 GW'a çıkması bekleniyor.
İtalya	2025 yılına kadar 100 MW'lık elektrolizör kurmayı hedefliyor.
Tazmanya	Bell Körfezi'nde hidroelektrik kullanarak 250 MW'lık bir yeşil hidrojen tesisi kurma planlanılıyor.
Umman	16 GWe rüzgâr ve 10 GWe güneş kapasitesinden elektroliz yoluyla 1,75 Mt/yıl hidrojen üretilmesi hedefleniyor. İlk üretimin 2028'de yapılması bekleniyor ve kapasite 2038'e çıkması planlanıyor.
Suudi Arabistan	Yılda 237.000 ton yeşil hidrojen ve ardından 2025 yılına kadar yeşil amonyak üretmek için 4 GWe yenilenebilir enerji kullanılması planlanıyor.
Norveç	Nel, Heroya'da 2021 sonlarından itibaren hem AE hem de PEM tipinde, yaklaşık 500 \$/kW fiyatla yılda 500 MW'lık elektrolizör üretmeye hazırlanıyor. 2 GW/yıl'a genişlemeyle birlikte 300 \$/kW'ı hedefliyor.
Kanada	Kanada'da Hydro-Quebec, Quebec'teki Varennes için ThyssenKrupp'tan 88 MW'lık bir elektrolizör sipariş edilmiştir. 2023 yılının sonlarında devreye alınmasının ardından, nakliye yakıtları için bir biyofineriye 11.000 ton/yıl hidrojen tedarik edilmesi bekleniyor.

Yeşil hidrojen kapasite hedefleri doğrultusunda Avrupa'da ön sıralarda İspanya, Danimarka, Almanya ve Hollanda yer almakta ve bu dört ülke, Avrupa'nın elektrolitik hidrojen üretiminin neredeyse %55'ini oluşturmaktadır. Güneş, PV ve rüzgar için iyi yenilenebilir kaynaklarından yararlanan Avustralya'nın su elektrolizi yoluyla düşük emisyonlu hidrojen üretimi, 2030 yılına kadar 4 Mt'a yakın bir seviyeye ulaşabilir. Umman'da elektrolizden elde edilen hidrojen üretimi, duyurulan projelere göre 2030 yılına kadar neredeyse 2 Mt'a ulaşması beklenmektedir. Çin, yeşil hidrojen için Avrupa kadar agresif hedefler koymamıştır ancak 2020'de hidrojenle ilgili politika ve hedefler belirgin şekilde artmıştır. Şirketler, üniversiteler ve araştırma enstitülerinden oluşan Çin Hidrojen İttifakı, 2019 yılında hidrojen üretiminin çoğunluğunun ilerleyen yıllarda fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye kayacağını öngörmüştü. Çin'in yılda 22 milyon tonluk hidrojen üretiminin çoğu (dünyadaki toplam temiz hidrojenin üçte biri) kömürden, yalnızca %3'ü ise yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır (World-nuclear, 2023). Şekil 2'de 2030 yılına kadar 1 MW'tan büyük projelerin geliştirilmesi için gerekli hidrojen yatırımları gösterilmektedir. Son açıklanan bilgilere göre Çin'de pek çok proje şu anda inşaat halindedir (üretim seviyesinin neredeyse %40'ı) ve gelecekte daha fazla proje gelişmesi beklenmektedir. Afrika'da ise duyurulan elektrolizör projelerinden hidrojen üretimi 2030 yılına kadar 2 Mt'a ulaşması hedeflenmektedir. Kenya, Moritanya, Fas, Namibya ve Güney Afrika'da elektrolizör kapasitesi 100 MW veya üzerinde olan 20'den fazla proje açıklanmıştır (World-Nuclear, 2023).

Avrupa Kalkınma ve Yatırım Bankası (EBRD), hidrojen değer zincirinin tüm segmentlerine dair olan bütün çalışmalara, öz sermaye yatırımı, garantiler, harman finansman, ayrıcalıklı finansman gibi değişik enstrümanlar ile bu alanda projelere destek sağlamaktadır. EBRD uygulamaya aldığı "Hidrojeni Hızlandırma Programı" ile Güney ve Doğu Akdeniz, Türkiye, Kafkaslar, Moldova, Balkanlar, Kazakistan ve Özbekistan'da hidrojen politikalarını ve pazarını değerlendirerek politika önerilerinde bulunmaktadır. Mısır Afrika'daki ilk entegre yeşil hidrojen tesisi olacak 100MW'lık elektrolizör tesisi için gerekli yatırıma 80 milyon ABD doları finansman sağlama adımını atmıştır. Dünya Bankası Grubu, Enerji Sektörü Yönetim Yardımı Programı ile halihazırda düşük ve orta gelirli ülkeleri düşük karbonlu ekonomiye geçiş amacıyla hidrojen kapasitelerini artırma noktasında desteklemektedir. Verilen finansal, teknik destekler, kapasite gelişimi, risk yönetimi desteklerinin yanı sıra sağlanan finansman ile pilot projelerin gelişmesini ve yaygınlaşmasını hedefleyen Grup, yeşil hidrojen yatırımlarını desteklemek üzere 2023 Mayıs ayında Şili

hükümeti ile 150 milyon ABD doları tutarında bir kredi tahsis anlaşması imzalamıştır (Hydrogencouncil, 2023). Bu bilgiler ışığında yeşil enerjiyi teşvik etmek, uluslararası ortaklıklar kurmak, ticari talebi ve yatırımları teşvik edecek kamu-özel sektör iş birliklerinin oluşturulması, nitelikli işgücünün geliştirilmesi, yeşil hidrojenin tüm sanayilerde kullanımının teşvik edilmesi gibi politikaların belirlenmesi büyük önem taşıyor.

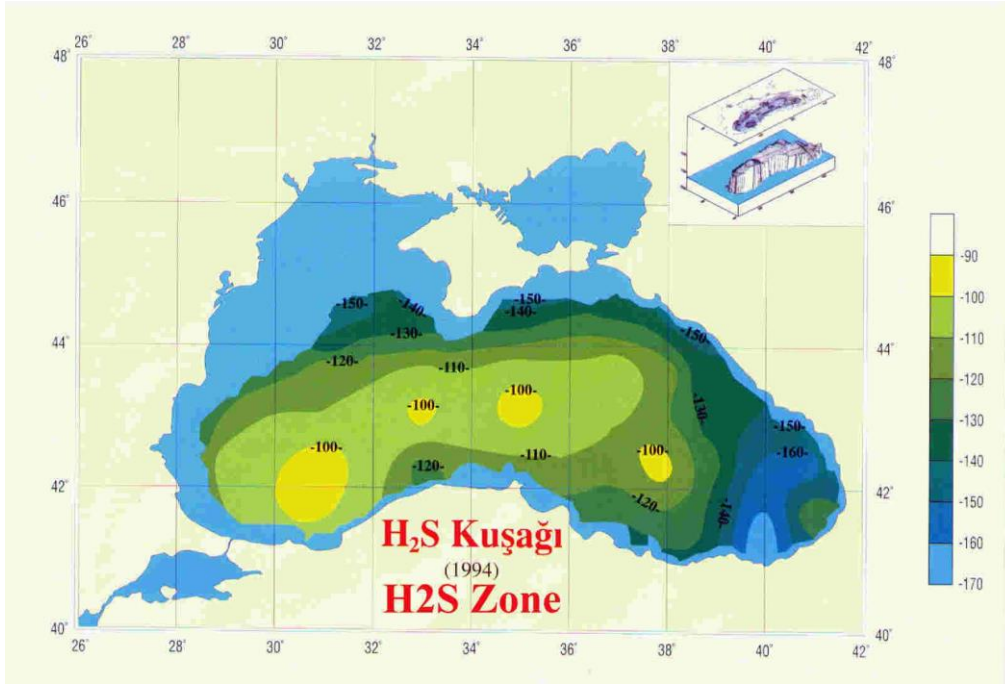
Bu doğrultuda Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmesi için hidrojen enerjisi ve teknolojisinde yetkinleşmesi gerektiği belirlenmiştir. Ek olarak, mevcut bilgi birikiminin ticarileştirme sürecine uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2. 2030 yılına kadar duyurulan 1 MW'tan büyük projelerin geliştirilmesi için gerekli hidrojen yatırımları (Hydrogencouncil, 2023).

IV. TÜRKİYE'DEKİ HİDROJEN ENERJİSİ GELİŞMELERİ

Türkiyede hidrojen enerjisinin resmi belgelere ilk giriş tarihi olarak 2 Mayıs 2007 tarihi ön plana çıkmaktadır. Bu tarihte Resmî Gazete'de yayımlanan "Enerji Verimliliği Kanunu"nda hidrojen, biyoyakıt ile birlikte kullanımı özendirilmesi gereken alternatif yakıt olarak belirlenmiştir (Resmî Gazete, 2007). Türkiye, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) da desteği ile 2011 yılında "Bozcaada Hidrojen Adası Projesi" gerçekleştirilmiştir. Ekim 2011 tarihinde devreye giren proje ile Bozcaada Kaymakamlık binası ve sağlık ocağının elektrik ihtiyacı üretilen hidrojen ile karşılanmıştır. Buna rağmen projenin devamı getirilmemiştir ve hidrojen üretimi sonlandırılmıştır. Ayrıca, 2011 yılında hidrojen yakıtlı araçlara ilişkin bir yönetmelik çıkarılmıştır. Söz konusu yönetmelikle, hidrojen yakıtıyla çalışan araçların tip onayına yönelik düzenleme yapılmıştır ve bu araçların bir süre sonra gündeme olacağı beklentisiyle bir ön hazırlık gerçekleştirilmiştir. 2020 yılı ocak ayına kadar hidrojen, Türkiye'nin enerji politikalarında yerini alsada ciddi bir ilgi görmemiştir. 2000'li yıllarında başında ulusal program belgelerinde kısaca da olsa kendisine yer bulan hidrojen konusu, sonraki süreçte enerji politikalarının bir parçası olarak görülmemiştir. Uzunca bir aradan sonra 15 Ocak 2020 tarihinde ETKB'nin düzenlediği "Hidrojen Arama Konferansı" ile kamuoyuna hidrojenin önemi anlatılmıştır (ETKB, 2023a).



Şekil 3. Karadeniz'de var olan H₂S Dağılımı (Kastamonu Gazetesi, 2023).

Bazı tahminlere göre, Karadeniz'in dip sularındaki aşırı kirliliğin ürettiği hidrojen sülfür miktarı, bölgenin 350 yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek miktarda olduğu keşfedilmiştir. Uzun bir kıyı şeridine sahip olan Karadeniz'in dibinde kimyasal olarak depolanan hidrojen nedeniyle Türkiye'nin hidrojen üretme olasılığı yüksek olduğu öngörülmüştür (Bakınız Şekil 3.). Bilim insanları, Karadeniz'in dip sularından hidrojen sülfürün tamamen ayrıştırılması durumunda 268 milyar 823 milyon ton hidrojen elde edilebileceğini öngörmüşlerdir. Karadeniz Bölgesi'nde 10 milyon ailenin ikamet ettiği ve ortalama bir hanenin yıllık enerji tüketiminin 3600 kWh olduğu varsayıldığında kitlenin toplam yıllık enerji ihtiyacının 36 milyar kWh olacağı belirlenmiştir. Bu enerji ihtiyacının tamamının Karadeniz'in dip sularından çekilen hidrojen yakıtı ile karşılanması halinde, bu bölgenin enerji ihtiyacının yaklaşık 180 yıl boyunca karşılanabileceği tahmin edilmektedir. Bu keşifin ardından bu bölgelerde hidrojen yatırımı yapılmaya başlanmıştır (Kastamonu Gazetesi, 2023).

Tüm bu gelişmeler çerçevesinde Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen tesisinin inşası için Bandırma Enerji Üssü seçilmiştir. 2023 Şubat ayında imzalanan protokol kapsamında Bandırma ilçesinde bulunan EnerjiSA Bandırma Enerji Üssü'nde hidrojen üretimi yapılması planlanmıştır. Bu proje kapsamında Güney Marmara Kalkınma Ajansı'nın önderliğinde, Enerjisa Üretim, TÜBİTAK MAM, Eti Maden ve Aspilsan'ın içinde bulunduğu bir yeşil hidrojen platformu oluşturulmuş ve Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen üretim ve depolama tesisi için harekete geçilmiştir. Minimum 500 ton yeşil hidrojen üretilmesi planlanan ve beş yıl sürecek projenin toplam yatırım maliyeti 36,8 milyon Euro olarak kaydedilmiştir (GMKA, 2023).



Şekil 4. Türkiye'nin HYSouthMarmara Projesi kapsamında belirlenen İlk Yeşil Hidrojen üretim hattı (GMKA, 2023).

Türkiye'de atılan en önemli adımlardan biri HYSouthMarmara (Güney Marmara Hidrojen Kıyısı) projesidir. Şekil 4'te Türkiye'nin HYSouthMarmara Projesi kapsamında belirlenen İlk Yeşil Hidrojen üretim hattı gösterilmektedir. Ufuk Avrupa Çerçeve Programı kapsamında hak kazanılan 8 milyon Euro hibe desteğinden sonra vadiye ve bölgenin hidrojen ekonomisine yerli ve yeni bir katkı daha sunması beklenmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü koordinasyonunda çalışan Güney Marmara Kalkınma Ajansı tarafından hibe desteği sağlanan ve Eti Maden ile Enerjisa Üretim'in eşfinansman sağladığı projenin sözleşmesi 15 Mart 2023 tarihinde imzalanmıştır. Tamamlanması beş yıl sürmesi beklenen projenin performansı nedeniyle Türkiye, ülke tarihindeki en büyük ödül olan ve Türkiye Çerçeve Programları açısından bir ilk olan 8 milyon Euro'luk AB hibesini almıştır. Projenin hayata geçirilmesiyle 2053 yılına kadar TR22 Güney Marmara Bölgesi, Türkiye'de karbon nötr ekonomiye ulaşan ilk bölgeler arasında yer alacaktır. Bölge aynı zamanda hidrojen ve türevlerini Avrupa'daki ülkelere ihraç etme konusunda da üst sıralarda yer almaya aday olacaktır. Bu projeye, Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin %13'ünü üreten ve yenilenebilir enerji kurulu gücü 3 GW'ı aşma yolunda ilerleyen bölgedeki hidrojen ekonomisi büyüyecektir. Bu girişim ile yeşil hidrojenin yanı sıra sıvı ve katı hidrojen türevlerinin de üretilmesi planlanmaktadır. Projenin amaçlarından biri, Türkiye'nin ithal ettiği metanol ve amonyak dahil üzere hidrojen türevlerini üretmek için sürdürülebilir teknolojilerin ve yerel kaynakların kullanılmasıdır. Proje kapsamında eş zamanlı olarak Türkiye'nin ilk sodyum borat hidroksit tesisi de geliştirilecektir (ETKB, 2023a; GMKA, 2023).

V. SONUÇLAR VE TARTIRŞMA

A. İhtiyaç ve Çözümler

Yeşil hidrojen ve yenilenebilir enerji teknolojileri, dünya çapındaki teknolojik trendlere göre hem dijital hem de yeşil dönüşümü kolaylaştıran yenilikçi araçlardır. Hidrojenin potansiyel olarak kritik rolü dünya çapında ve Türkiye'de artmaktadır. Bu nedenle hidrojenin geleceğine yön verecek strateji belgeleri ve yönetmelik çalışmaları artarak devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda hidrojenin üretilmesinden son kullanımına kadar devam eden tüm süreçleri kapsayan değer zincirindeki mevcut boşluklar üzerinde fazlaca durulmaktadır. Özellikle net sıfır emisyonla ulaşmadaki önemli argümanlardan biri olan hidrojenin hayatımıza büyük bir değer katacağı bilinmektedir. Hidrojen teknolojileri konusunda tüm paydaşlarla birlikte ulusal ve yerel yönetimler arasında bilgi alışverişi için forumların oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Söz konusu teknolojiler, ekosistemde bulunan birçok oyuncuyu ilgilendirdiğinden, konu hakkında tüm paydaşların dahil edilerek bilgilendirilmesi ve kapsayıcı çalışmaların yapılması önemlidir. Hidrojen altyapısının; mevzuat ile belirlenecek düzenlemeleri

uygulayacak, teknoloji geliştirecek ve geliştirilmesine fon sağlayacak, depolama ve dağıtım sorumluluğunu taşıyacak tüm oyuncuların etkili iletişim içinde bulunarak başarılı bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Türkiye’de yerli bir yeşil hidrojen piyasasının gelişmesi için mevcut mevzuatı uygun hâle getirerek hidrojenden elde edilecek enerji ile ilgili gelecek öngörüsü ile birlikte yeşil hidrojenin üretim, dağıtım, depolama ve son kullanım süreçleri hususunda uluslararası standartlarla uyumlu teknik standartların geliştirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, önümüzdeki yıllarda hidrojen teknolojilerinin gerekli seviyelerde etkin bir şekilde benimsenmesini sağlamak için yürütülecek çalışmaların sinerjik bir yapıda sürdürülmesi gerekmektedir. Dünyada yapılan çalışmalar ile Türkiye’nin ihtiyaç ve çözüm önerileri değerlendirilerek hazırlanan hedefler ve politikalar aşağıda sunulmuştur (SBB, 2023; ETKB, 2023a; IRENA, 2022a).

Bunlar ;

- Elektrolizör teknolojisinin yerlileştirilmesi ve millileştirilmesi için sistem alt bileşenlerinin ArGe/Ür-Ge çalışmalarıyla pilot tesis ve ticari ölçeğe taşınması gerekmektedir.
- Elektrolizörlerin üretimine yönelik eksiklikler tespit edilecek ve bu kapsamda özel proje çağruları oluşturularak elektrolizörlerin geliştirilmesi sağlanacaktır. Bu sayede elektrolizör teknolojilerinde dışa bağımlılık ortadan kalkacaktır.
- Yakıt hücresi teknolojisinin yerlileştirilmesi ve millileştirilmesi için sistem alt bileşenlerinin Ar-Ge/ Ür-Ge çalışmalarıyla pilot tesis kurulması ve sonrasında ticari ölçeğe taşınması Yerli kaynaklardan (doğal gaz, linyit ve organik atıklar) hidrojen üretim çalışmalarının yapılması Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretecek sektör oluşturulması gerekmektedir.
- Hidrojen bazlı motorlar ve yakıt hücreleri ile bunların bileşenleri için teknoloji ve yatırım yaratılmasına yönelik araştırmalar yapılacak.
- Yakıt hücreleri ile ilgili çalışan firmalar, akademisyenler, araştırma merkezleri ve girişimciler buluşturulacak, ihtiyaçlar belirlenecek ve iş birlikleri oluşturulacaktır.
- Yakıt hücresi üretiminde gerekli olan nadir element kategorisindeki ham maddelerin ülke içindeki rezervlerinin belirlenmesi ve geleceğe dönük üretimlerinin aksamaması adına önceden planlama yapılarak ihtiyaç miktarına göre tedarik zincirinin oluşturulması gerekmektedir.
- Linyitten hidrojen üretimi ile ilgili mevcut durum ve gerekli altyapı ve destekler tespit edilecektir. Bu sayede hidrojen ihtiyacının bir bölümü karşılanırken, yerli kömür gazlaştırma ve hidrojen üretim teknolojileri de geliştirilmiş olacaktır.
- Başta amonyak ve hidrojen olmak üzere kimyasal ve yakıt üretimine yönelik yeşil teknolojiye dayalı yatırımlar teşvik edilmelidir.
- Gazlaştırma ile hidrojen üretilebilecek organik atıkların envanteri yapılacak, gerekli destekler ve altyapı belirlenecektir. Ülkenin mevcut yerli kaynakları ve organik atıklar en verimli şekilde kullanılarak hidrojen üretilmesi için pilot tesislerin faaliyete geçirilmesi, teknoloji seviyesinin yükseltilmesi, bu konuda yan sanayi kabiliyetlerinin geliştirilmesi ve akademik araştırmaların artırılması sağlanacaktır.
- Yenilenebilir enerji santralleri ile bütünleştirilmiş hidrojen üretim tesislerinin kurulması; verimlilik, depolama, iletim ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlayacaktır. Uygun maliyetli yeşil hidrojen üretimi için rüzgâr, güneş ve hidroelektrik enerjisi potansiyeli yüksek sahaların hidrojen üretim bölgeleri olarak belirlenmesi önem arz etmektedir.

B. Hidrojenin Üretiminin Artırılmasının Önündeki Engeller

Aşağıdaki engeller şu anda temiz hidrojenin enerji dönüşümüne daha büyük bir katkı yapmasını engellemektedir (SBB, 2023; IRENA,2022b; ETKB, 2023b):

- Maliyet: Temiz hidrojenin, özellikle de yeşil hidrojenin maliyeti, yüksek karbonlu yakıtlara göre hala yüksektir. Sadece üretim maliyeti değil, hidrojenin taşınması, dönüştürülmesi ve depolanmasının maliyetleri de yüksektir.
- Temiz hidrojen teknolojilerinin son kullanımlar için benimsenmesi pahalı olabilir ve CCS henüz geniş ölçekte kullanıma sunulmamıştır.

- Teknolojik olgunluk: Hidrojen değer zincirinde karbondan arındırma için gereken bazı teknolojilerin teknolojik hazırlığı hala düşük seviyededir ve geniş ölçekte kanıtlanması gerekmektedir.
- Verimlilik: Hidrojen üretimi ve dönüşümü, üretim, taşıma, dönüşüm ve kullanım da dahil olmak üzere değer zincirinin her aşamasında önemli enerji kayıplarına neden olur. Üstelik mavi hidrojenin üretimi enerji yoğun olduğundan genel enerji talebini artırıyor.
- Yeterli yenilenebilir elektrik: 2050 yılına kadar elektrolizörlerle hidrojen üretimi için elektrik tüketimi 21.000 TWh'ye yakın – bu neredeyse bugün küresel olarak üretilen elektrik kadardır (IRENA, 2022a). Daha fazla son kullanım sektörü elektrikli hale geldikçe, yeterli miktarda yenilenebilir elektriğin bulunmaması, yeşil hidrojen için bir darboğaz haline gelebilir.
- Politika ve mevzuat belirsizliği: Her ne kadar 140'tan fazla ülke önümüzdeki yıllarda net sıfır emisyonu ulaşma sözü vermiş olsa da bu hedeflere ulaşma hızı belirsizliğini koruyor.
- Standartlar ve sertifikasyon: Ülkeler, hidrojenin herhangi bir tonunun üretimini ve tüketimini takip edecek ve özelliklerini (örneğin menşei ve yaşam döngüsü emisyonları) tanımlayacak kurumsallaşmış mekanizmalardan yoksundur. Üstelik hidrojen resmi istatistiklerde sayılmıyor toplam nihai enerji tüketimi ve temiz hidrojenin emisyon azaltımlarına katkısının ekonomik değeri kabul edilmiyor.
- Talep olmadan, maliyetleri azaltılabilecek geniş ölçekli üretim için yatırımlar çok riskli olmaya devam ediyor, ancak ölçek ekonomisi olmadan teknoloji çok maliyetli olmaya devam ediyor.

KAYNAKLAR

- Amin, M., Shah, H. H., Fareed, A. G., Khan, W. U., Chung, E., Zia, A., Rahman Farooqi, Z. U., & Lee, C. (2022). Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 33112–33134.
- Commission Europa. (2023). [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en
- Energy. (2020). [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf
- ETKB. (2023a). [Online]. Available: https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKBHidrojenStratejik_Plan2023.pdf
- ETKB. (2023b). [Online]. Available: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerjide-arama-etkinlikleri-ve-belgeler>
- GMKA. (2023). [Online]. Available: <https://www.gmka.gov.tr/haber/turkiyenin-ilk-yesil-hidrojen-vadisi-kuruluyor>
- Hydrogencouncil. (2023). [Online]. Available: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>
- IEA. (2022). [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers>
- IEA. (2023). [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- IEA. (2024). [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/northwest-european-hydrogen-monitor-2024/executive-summary>
- IEA. (2023). [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/Information-Library/Energy-and-the-Environment/Hydrogen-production-and-uses>
- IRENA. (2022a). [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>
- IRENA. (2022b). [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf?rev=1cfe49eee979409686f101ce24ffd71a
- Kastamonu Gazetesi. (2023). [Online]. Available: <https://www.kastamonugazetesi.com.tr/karadenizde-dev-enerji-kaynagi/>
- Resmi Gazete. (2007). [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.html>
- SBB. (2023). [Online]. Available: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_11122023.pdf
- TSKB. (2023). [Online]. Available: <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/bilgi-notu-guncelleme-hidrojen-enerjisi-final.pdf>
- World-Nuclear. (2023). [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/Information-Library/Energy-and-the-Environment/Hydrogen-production-and-uses>