



TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ
UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ENGINEER AND MACHINERY
ISSN:1300-3402, E-ISSN:2667-7520



Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

YIL/YEAR : 2025

CİLT/VOLUME : 66

SAYI/ ISSUE : 720



İMTİYAZ SAHİBİ / PRIVILEGE OWNER

Yunus YENER

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI / UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS

SORUMLU YAZI İŞLERİ MÜDÜRÜ / PRODUCTION DIRECTOR

Yunus YENER

EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University

EDİTÖR YARDIMCILARI / ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. L. Berrin ERBAY, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi /Eskisehir Osmangazi University

Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ, Çankaya Üniversitesi/Cankaya University

ALAN EDİTÖRLERİ / AREA EDITORS

Prof. Dr. Metin AKKÖK, Orta Doğu Teknik Üniversitesi/Middle East Technical University

Prof. Dr. Cemal MERAN, Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA, Trakya Üniversitesi/Trakya University

Dr. Öğr. Üye. Gurbet ÖRÇEN, Dicle Üniversitesi/Dicle University

YAYIN SEKRETERİ / EDITORIAL SECRETARY

Ceren YILMAZ ARAS

KAPAK VE SAYFA TASARIMI/ COVER AND PAGE DESIGN

Gözde AKMAN

TEKNİK SORUMLU / TECHNICAL ASSISTANT

Mehmet AYDIN

BASKI/PRINTED BY

Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.

30. Cadde 538. Sokak No: 60 İvedik Organize Sanayi- Ankara

Tel: (0312) 394 54 94

BASKI SAYISI / CIRCULATION

1000

BASKI TARİHİ / PUBLISHING DATE

30 Haziran 2025



OTONOM PARK ROBOTU TASARIMI

Soner KOCAK^{1*}, Abdullah DEMİR², Garip GENC³, Abdullah AKYAR⁴, Selim HARTOMACIOĞLU⁵

¹Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul
e-posta : soner.kocak.90@gmail.com ORCID No : 0009-0006-3289-5437

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul
e-posta : ademir@marmara.edu.tr ORCID No : 0000-0003-4042-7626

³Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul
e-posta : ggenc@marmara.edu.tr ORCID No : 0000-0001-7711-3845

⁴Parkolay Ar-Ge Merkezi, İstanbul,
e-posta : abdullah@otomatik.com.tr ORCID No : 0009-0000-5515-9172

⁵Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul
e-posta : selimh@marmara.edu.tr ORCID No : 0000-0002-4541-4894

Anahtar Kelimeler

Öz

Otomatik yönlendirmeli araç, Çok yönlü hareket, Park robotu tasarımı, Sürüş sistemi, Taşıma kolu

Bu çalışmada otomatik otopark sistemlerinde kullanılmak üzere bir park robotu tasarımı sunulmuştur. Bu park robotu ile park sürelerinin azaltılabileceği, park katlarında bulunan mekanik ekipmanlardan tasarruf edilebileceği ve hareket kısıtlarını ortadan kaldırılabilceği öngörülmüştür. 100 mm yükseklikte 2 eş modülden oluşan park robotu tasarımında Otomatik Yönlendirmeli Araçların (AGV) kullanım potansiyelinden faydalanılmıştır. Yürütme grubu ve taşıma kolları tasarımları ile hesaplamalarının incelendiği bu çalışmada yükseklik sınırına uygun olarak yeni tasarımlar geliştirilmiştir. Park robotunun yük ve hızına bağlı olarak yürütme grubu ve taşıma kolları için gereken güç hesabı ve dayanım analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde yürütme grubu temel parçalarının maksimum gerilme ve deformasyon değerleri, seçilen malzemelere bağlı olarak istenilen tolerans aralığındadır. Tekerlek mili için Von Mises gerilme değeri 143.98 MPa, poliüretan malzeme için deformasyon değeri 0.042 mm olarak ölçülmüştür.

* soner.kocak.90@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1497520

AUTONOMOUS PARKING ROBOT DESIGN

Keywords

Automated guided vehicle, Omnidirectional movement, Parking robot design, Driving system, Handling arm

Abstract

In this study, a parking robot design has been presented for use in automated parking systems. It is anticipated that this parking robot can reduce parking times, minimize the need for mechanical equipment on parking floors, and eliminate movement constraints. The design consists of two identical modules with a height of 100 mm, utilizing the potential of Automated Guided Vehicles (AGVs). This study examines the design and calculations of the drive unit and lifting arms, developing new designs that comply with height limitations. Based on the load and speed of the parking robot, power calculations and strength analyses were conducted for the drive unit and lifting arms. The analysis results indicate that the maximum stress and deformation values of the main components of the drive unit fall within the desired tolerance range, depending on the selected materials. The Von Mises stress value for the wheel axle was measured at 143.98 MPa, while the deformation value for the polyurethane material was determined to be 0.042 mm.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 07.06.2024

Submission Date : 07.06.2024

Kabul Tarihi : 24.03.2025

Accepted Date : 24.03.2025

Extended Abstract

Introduction

Automated Guided Vehicles (AGVs) are widely used in various industries for repetitive load transportation. By leveraging this potential in the automated parking sector, a parking robot design has been introduced. This parking robot is expected to reduce parking times, minimize the need for mechanical equipment on parking floors, and eliminate movement constraints. In our parking robot design, which consists of two identical modules with a height of 100 mm, the drive unit and lifting arms have been designed and analysed, leading to the development of new designs suitable for height limitations.

Objectives/ Research Purpose

Various design models can be used for the drive unit. Mecanum wheels provide excellent manoeuvrability in tight spaces due to their omnidirectional movement capability; however, they have low load-carrying capacities. The Driving-Steering (DS) wheel mechanism offers high manoeuvrability under heavy loads, but height constraints prevent us from using this mechanism. In our study, we propose a new drive unit design consisting of two wheels.

The method of vehicle transportation is crucial in automated parking systems, particularly for equipment savings. In the pallet-based transportation method, individual pallets are required for each vehicle, along with additional systems to transport these pallets. In our study, we aim to eliminate the need for pallets and their associated transport systems by implementing a robotic arm-based transportation solution.

Methods/ Methodology

The parking robot, consisting of two modules, was designed by the authors using SolidWorks 2024 software. Each module comprises four independent drive units and four independently hydraulically actuated transport arms. The parking robot first moves underneath the vehicle and lifts it by its wheels using its arms to perform the transportation process. The drive unit of our parking robot consists of two independent polyurethane-coated wheels, each driven by an identical brushless DC motor. Polyurethane-coated wheels are highly resistant to wear and operate more quietly compared to other materials. Due to these properties, the use of polyurethane-coated wheels in automated parking systems under heavy loads appears to be suitable. In this section, resistance forces acting against movement are calculated to determine the required power for the drive unit. Additionally, in the scenario where the vehicle is being transported, the forces acting on the transport arms are analysed, and the hydraulic power calculation is performed. The necessary loading was applied to the drive unit wheel, and Von Mises stress and deformation values were examined using Ansys software.

Results/ Findings

This section presents the results of the analyses conducted on the drive unit wheel design. The materials used in the design are ductile materials. Equivalent (Von Mises) stress values and deformation amounts are provided along with the yield stress limit values. Upon examining the analysis results, it is observed that the maximum stress and deformation values of the drive unit's main components fall within the desired tolerance range, depending on the selected materials. The Von Mises stress value for the wheel axle was measured as 143.98 MPa, while the deformation value for the polyurethane material was recorded as 0.042 mm.

Discussion and Conclusions

The widespread use of AGVs across various industries worldwide is expected to contribute to the development of smart parking systems through their integration into automated parking systems. In our study, the uni-directional parking robot eliminates the need for separate pallets for each vehicle by utilizing a mechanical arm-based transportation method. In the design of the drive unit, mecanum wheels were not used due to their low load-carrying capacities, and DS wheel mechanisms were not feasible due to height constraints. As an alternative design, a two-wheel drive unit that meets the height limitation was proposed, and a structural strength analysis was conducted. Upon examining the analysis results, the maximum stress and deformation values of the main components of the drive unit were found to be within the desired tolerance range, depending on the selected materials. Future studies may evaluate alternative parking designs, cost analyses, and parking durations in an automated parking system where the parking robot is utilized. Additionally, a steering solution for a parking robot of this height remains a subject of research.

1.Introduction

Automatic parking systems offer many advantages over traditional parking systems. They provide faster access to cars and offer secure parking with less space and volume requirements (Wu, Xu, Gong, De Koster & Zou, 2019). In general, the system comprises entrance rooms, car lifts, shelf conveyors and shuttles systems on each floor, and steel pallets moving in the system for each vehicle. All of these components contribute to the overall investment cost. The use of parking robots may eliminate the requirement for many of these equipment, leading to cost reduction and increased car capacity. In addition, it is possible to reduce parking times.

A study by Wu et al. (2019) examined the design of a compact, relatively low-cost, and fast-responding automated parking system based on a real application. The system consists of entry rooms, vertical transmission systems at each floor level, and two elevators equipped with rotating turntables. Alternative models were presented for designers, taking into consideration time efficiency and system cost. By using the parking robot in these systems, alternative parking designs can be re-evaluated in terms of cost and speed.

Another study by Vis (2006) examines the literature on the design and control aspects of AGV systems used in production areas. AGVs are fully automatic driverless systems that meet transportation needs. They are commonly used in industrial applications and storage systems for repeated load transportation. (Vis, 2006). The advent of technological advances has led to the utilization of AGVs in a multitude of applications. We introduce a new application area by bringing the potential use of AGVs into automatic parking systems.

There are several design models available for the drive group of the parking robot. The use of Mecanum wheels has been evaluated from this perspective. In his study, Greffer (2008) examines the geometry of the Mecanum wheel in detail. Mecanum wheels are a mechanism with omnidirectional movement capability. Each wheel contains cylindrical and freely rotating barrel wheels placed at a certain angle to the wheel axis. Mecanum wheels, with four independently driven wheels, enable movement in any direction (forward, backward, right, left) as well as diagonal movement. The rotation direction of each wheel's angled rollers controls the vehicle's direction and movement style. Proper synchronization of the wheels' movements ensures the desired motion in the intended direction. Mecanum wheels are suitable for manoeuvring in narrow spaces (Grerrer, 2008). Due to their low load capacity, we are unable to use Mecanum wheels in our study.

A study by Jiang, Zhang, & He (2020) proposes a new heavy-duty omnidirectional wheel arrangement that increases the operational and movement capacity of AGVs. The DS (Driving-Steering) wheel mechanism, which has four independent wheels and four independent steering systems capable of working under heavy load, can significantly increase the transportation efficiency and flexibility of AGVs by providing wide manoeuvrability (Jiang et al., 2020). The direction of each wheel can be adjusted independently through a separate drive mechanism, meaning each wheel can rotate at a different angle. This allows the AGV to move in a highly versatile manner, even in narrower spaces. Each wheel moves independently with its own drive motor and propulsion mechanism. This allows for much more precise speed and movement control of the AGV. When compared to Mecanum wheels, it has advantages such as high manoeuvrability and strong carrying capacity (Sun, Liu, Zhao, & Wei, 2019). Although this wheel mechanism is very suitable for our study, its direct use is not feasible due to our height limitations.

The method of transporting vehicles represents a fundamental feature of the operational functionality of the parking robot. In their studies Shen, Qiu, Wu, Lin, & Wu (2021), examined mechanical arm-based exchange and platform-based exchange in parking robots in terms of vehicle exchange technologies. In the mechanical arm-based transport solution, the robot directly enters under the vehicle, and mechanical arms or gripping mechanisms surround each tire of the vehicle to transfer it (Shen et al., 2021). In the pallet-based transport solution, the vehicle first parks on a pallet, and the robot then enters under the pallet to transfer the vehicle along with the pallet (Shen et al., 2021). Since the aim of our study is to reduce the equipment used in automated parking systems and, consequently, the costs, a mechanical arm-based solution has been preferred in our design, eliminating the need for a platform.

The aim of this study is to design a parking robot for use in automated parking systems, minimizing the equipment requirements in these systems. The design consists of two identical modules with a height of 100 mm, utilizing the potential of Automated Guided Vehicles (AGVs). This study examines the design and calculations of the drive unit and lifting arms, developing new designs that comply with height limitations. Based on the load and speed of the parking robot, power calculations and strength analyses were conducted for the drive unit and lifting arms. In our design, each module includes four independent drive units and four independent handling arms. Each drive unit consists of two independent polyurethane-coated wheels, operated by a separate drive mechanism of our custom design (Figure 1).

Due to the height limitations in the design, the DS wheel mechanism has not been preferred. Additionally, mecanum wheel mechanisms have not been used in the design due to limited load capacity. The solution to the steering problem of a parking robot at this height is a topic for future research. The parking robot in this study will move in a single direction. The design of the parking robot aims for it to lift the vehicle by gripping its front and rear wheels with the hydraulic drive mechanisms in the handling arms, thereby eliminating the need for steel platforms, floor conveyors, and shuttle systems, and performing the parking operation.

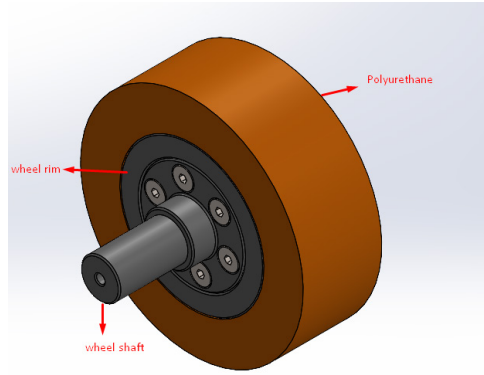


Fig. 1. Polyurethane coated wheel

2.Methods/ Methodology

The parking robot that we designed is constructed from two identical modules, each of which is capable of independently lifting the front and rear wheel pairs of cars. These design modules are shown in Figure 2. The designs were created by the authors using Solidworks 2024 software. Each module is equipped with four independent drive units. In addition, each module is equipped with four independently operating and hydraulically driven carrying arms. The parking robot first enters under the vehicle and lifts it from its wheels using its arms. The necessary parameters for the design are provided in Table1.

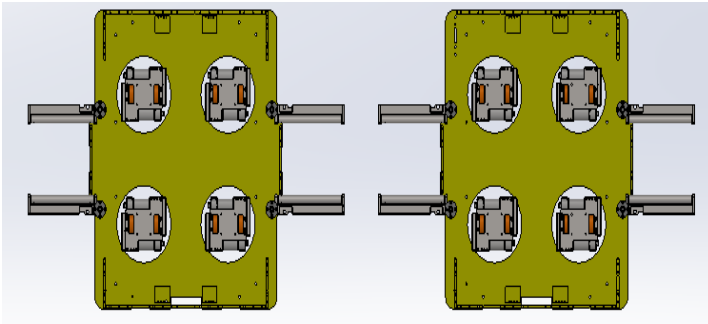


Fig. 2. The Parking Robot Comprises Two Identical Modules

Polyurethane is highly resistant to wear. It ensures that the wheels last longer in harsh conditions. It has the capacity to absorb vibrations and shocks. While moving on different surfaces, polyurethane-coated wheels provide more stable movement by preventing damage to the vehicle's electronic and mechanical components. Polyurethane-coated wheels operate more quietly compared to other materials. In these aspects, the use of polyurethane-coated wheels under heavy loads in automatic parking systems seems suitable.

The medium carbon content of CK 45 steel material makes it wear-resistant and high-strength. This property ensures the material's durability under high tension and force applications. Thanks to its medium carbon content, CK 45 steel material is highly machinable and can be shaped through processes such as turning and milling. This provides

an advantage for the production of customized parts suitable for design specifications. This material meets the strength and durability requirements in applications like machine components and transport systems. For this reason, CK 45 steel has been preferred for the wheel shaft and wheel rim of the parking robot.

Table 1. Necessary Parameters for the Design

Maximum Load	Robot Weight	Velocity	Total Height	Floor	Wheel Diameter
2500 (kg)	700 (kg)	1 (m/s)	100 (mm)	Concrete	90 mm

This study adheres to research and publication ethics.

2.1 Drive Unit

The types of motors used in the drive group of AGVs are geared DC motors, brushless DC motors, and servo (Moshayedi, Li, & Liao, 2019). These motors are selected based on their impact on the flexibility and accuracy of AGV movement (Moshayedi et al.,2019). Brushless motors are generally more efficient due to their design. Since they lack brushes, there is no friction loss, and they have a longer lifespan. They are typically used in applications that require speed control but do not require precise positioning. In addition to being cost-effective, they are suitable for applications that demand less precision and control.

The drive group of our parking robot comprises two independent polyurethane-coated wheels, each driven by an identical brushless DC motor (Figure 3). The resistances against motion may be classified into four categories: rolling resistance, air resistance, acceleration resistance, and incline resistance (Xing, Yang, Zu, & Yu, 2019). The total force required to overcome these resistance forces and the required torque value can be calculated to obtain the power value (Xing et al., 2019).

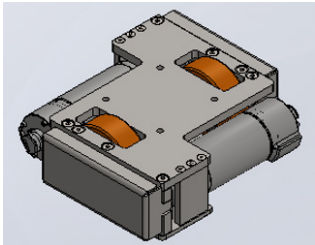


Fig. 3. Drive Unit

$$\Sigma F = F_f + F_w + F_j + F_i \tag{1}$$

$$F_f = f M_g \tag{2}$$

$$F_j = M a \tag{3}$$

$$F_i = M g \sin \beta \tag{4}$$

$$F_w = -k v \tag{5}$$

$$\Sigma T = \Sigma F r \tag{6}$$

$$P = T \omega \tag{7}$$

In this context, F_f represents rolling resistance as described in Equ.2, F_j represents acceleration resistance as described in Equ.3, F_i represents incline resistance, F_w represents air resistance, M represents the total weight of the parking robot and the load to be carried, g represents gravitational acceleration, r represents wheel radius, and represents angular velocity. In the absence of air resistance, the incline resistance F_i and air resistance F_w forces are considered to be zero when the parking robot operates on a flat surface ($\beta=0$). The parking robot is desired to achieve a speed of 1 m/s in 2 seconds. So, the acceleration will be 0.5m/s^2 . The coefficient of rolling resistance is defined as $f = 0.01$ (Yang, Wang, Fan, Zhang, & Liu, 2019) (Dal, 2006). The results of the calculations indicate that rolling resistance is $F_f = 314\text{ N}$, acceleration resistance $F_j = 1600\text{ N}$, total torque value $T = 86.12\text{ Nm}$ and power value is $P = 1912\text{ W}$.

2.2 Carrying Arms Mechanism

The parking robot has a total of eight carrying arms, as shown in Figure 4. The arms comprise a body that is capable of free rotation and cylinders carried by the body. The arms are each driven by a hydraulic mechanism and are capable of independent operation. It is assumed that the weight of the vehicle is distributed equally to all four wheels during transportation and that the force applied to each arm is equal.

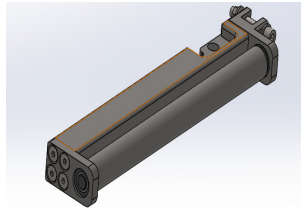


Fig. 4. Carrying Arm

The force distribution during lifting of the car wheels is shown in Figure 5. G is the amount of the vehicle's weight per wheel. The force applied by the parking robot, designated F , can be decomposed into two components: the vertical component, designated F_a , and the horizontal component, designated F_b . In the design, the angle between the force applied by the arms towards the wheel centre and the horizontal is measured as 60° degrees. The relevant forces can be determined using the following sin-cos laws (Yang et al., 2019):

$$F = \frac{G}{2\sin\theta} \quad (8)$$

$$F_a = F\sin\theta \quad (9)$$

$$F_b = F\cos\theta \quad (10)$$

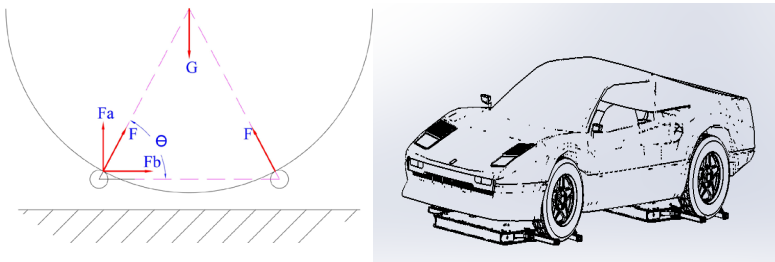


Fig. 5. The forces generated when the parking robot raises the wheel

Upon calculation, the resultant force F is determined to be 3540 N, the vertical force F_a is 3066 N, and the horizontal force F_b is 1770 N. Given that the location of the piston about the pivot point of the arm is closer. The vertical force applied by the piston arm can be found using the following formula:

$$\Sigma M = F_b L_b = F_c L_c \quad (11)$$

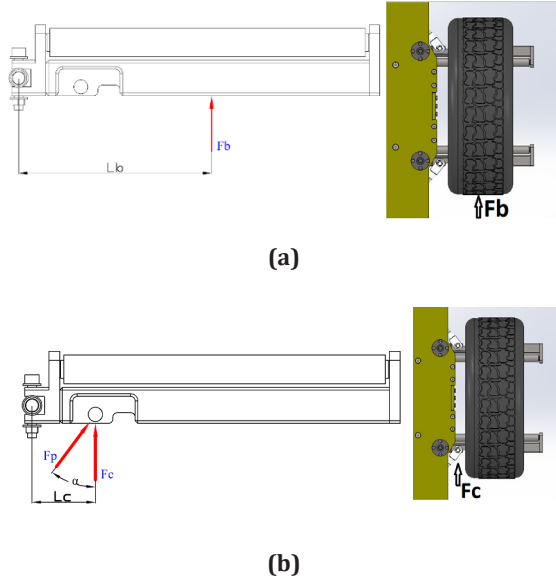


Fig. 6. Horizontal Forces on the Arm

(a) Vertical Force on the Wheel (b) Vertical Force Applied by the Piston

F_c is the vertical force applied by the piston, $L_b = 220$ mm is the distance between the wheel contact point and the pivot point of the arm (Figure 6-a) and $L_c = 110$ mm is the distance between the pivot point of the arm and the point where the piston applies the vertical force (Figure 6-b). It is determined that the vertical force generated by the piston, F_c , is 3540 N. When the carrying arms are completely opened, the angle $\alpha = 37$ is determined between the piston and the arms. Therefore, the sine-cosine law can be used to determine the force generated by the piston (Yang et al., 2019):

$$F_p = \frac{F_c}{\cos \alpha} \quad (12)$$

The piston force is calculated to be 4432.5 N. Therefore, by determining the piston force, we can find the required pressure and power. The pressure and power values can be found using the following Equations (Eq. 13 and Eq. 14)

$$p = \frac{F}{10A} \quad (\text{bar}) \quad (13)$$

$$P = \frac{pQ}{600\eta} \quad (\text{kW}) \quad (14)$$

A represents the area of the piston in cm^2 , Q represents the flow rate of the fluid in cm^3/s , while η is the efficiency value. The effective area of the piston is $A = 12.56$ cm^2 , the flow rate

is $Q=1.5 \text{ cm}^3/\text{s}$, and the efficiency is $\eta=0.8$. The pressure is calculated to be $p=44.1 \text{ bar}$, the power is $P=0.137 \text{ kW}$.

2.3 Finite Element Analysis

The finite element method is a numerical technique that analyses a system's components, including their elements, connections, material properties, contact definitions, and solutions within constraining conditions (Yang et al., 2019). The parameters of the analysis are defined by constraints and boundary conditions, which specify the conditions under which the analysis is conducted. The application of finite element analysis enables the determination of the system's mechanical stability under the applied load conditions (Yang et al., 2019).

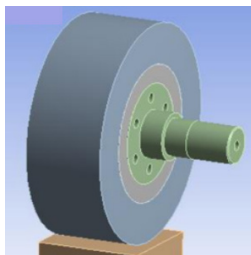
The techniques described in this section have been applied to drive group wheels, before the implementation of the necessary forces and boundary conditions for the analysis, the models created with the Solidworks program have been appropriately meshed. A structural analysis was conducted using the ANSYS program to determine the stress distributions and deformations at critical points in the structure. The objective of this analysis, 25% of which was added for safety margin under static load, was to determine the mechanical safety and durability of the structure (Kutay, 2009).

The materials and mechanical properties of the components that form the wheel are presented in Table 2. Polyurethane material is an elastomer-based polymer material. It presents the properties of ductile materials. The point at which the material undergoes plastic deformation is considered the yield point and is evaluated as the yield limit (URL-1; URL-2).

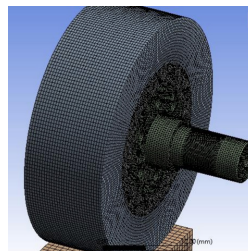
Table 2 Mechanical Properties of Materials

Mechanical Properties	Polyurethane	DIN 1.1191 Steel
Density (kg/m^3)	1130	7800
Young Modules (Pa)	2.41×10^9	2.10×10^{11}
Poisson Ratio	0.3897	0.28
Yield Strenght (MPa)	41.3	565
Yield Strain	400%	10%

The parking robot is equipped with a total of 16 wheels. The wheel includes a wheel axle, rim, and a polyurethane coating on the rim. Figure 7-a presents a simplified view of the wheel, while Figure 7-b illustrates the mesh form. In defining the boundary conditions, the force is applied from below the ground (Figure 7-c), and a cylindrical support boundary condition is applied to the bearing surface (Figure 7-d).



(a)



(b)

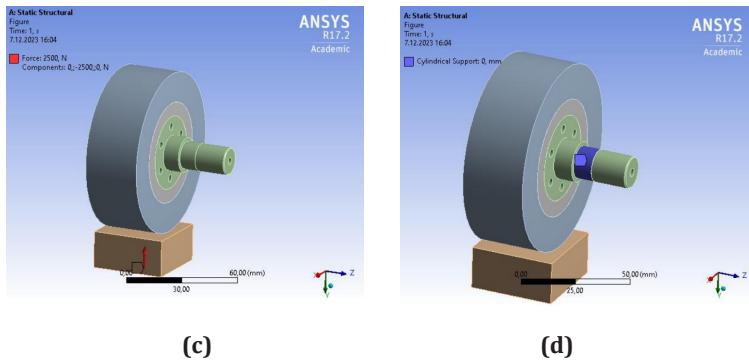


Fig. 7. Polyurethane-Coated Wheel

(a) Simplified Illustration **(b)** Mesh Illustration **(c)** Applied Force **(d)** Bearing Surface Boundary Condition

3. Results/ Findings

This section presents the results of the analysis conducted on the design of the drive group wheel. The materials utilized in the design are ductile. Equivalent (Von Mises) stress values and deformation amounts have been presented the yield stress limit values. The red regions in the provided diagrams represent the areas of highest stress and deformation and the blue regions represent the areas of lowest stress and deformation.

Because the parking robot is capable of transporting vehicles with a max. weight of 2500 kg, and the weight of the robot itself. It has been determined that a static load of 250 kg should be applied to each wheel in this analysis, conducted under a static load with a 25% safety margin. In the existence of these loads, multiaxial stresses that occur in ductile materials have been reduced to uniaxial equivalent stresses. These have then been compared with the yield stresses. If the equivalent stresses exceed the yield limit, permanent deformation or fractures will occur in that region. If the applied stresses are equivalent to those occurring below the yield limit, non-permanent deformations will occur in the elastic region.

Upon analysis of the results, it was observed that during the transportation of a vehicle within the allowed weight range, the polyurethane coating a maximum deformation of 0.042 mm (Figure 8-a) and a stress value of 27.76 MPa (Figure 8-b). The stress value is below the assumed yield limit for the polyurethane material (Table 2). In the wheel shaft, had a maximum deformation of 0.012 mm (Figure 9-a) and a stress value of 143.98 MPa (Figure 9-b) have been observed in the bearing region. The stress value is observed to be below the yield limit of the steel material (Table 2). The values found on the MatWeb website have been considered for the permanent deformation limit. (URL-1; URL-2)

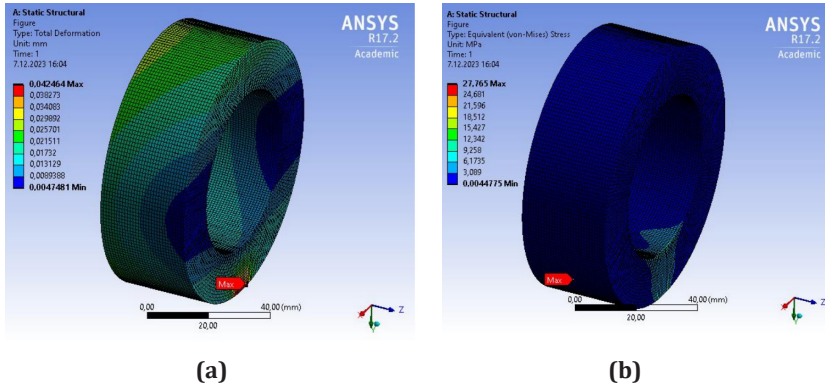


Fig. 8. Polyurethane Coating Analysis Results

(a) Deformation Amount (b) Von Mises Stress Value

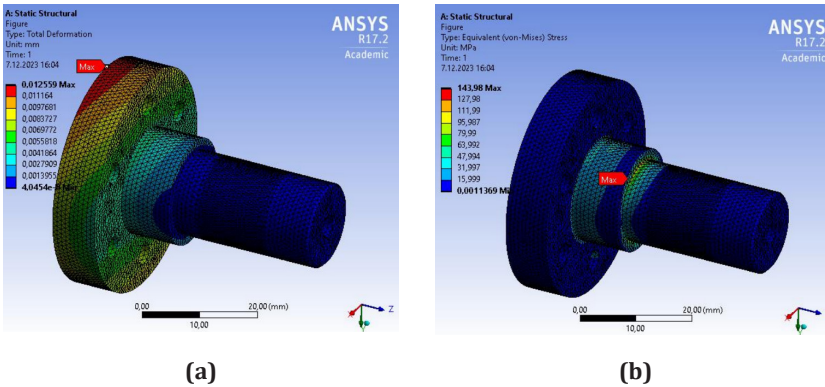


Fig. 9. Wheel Shaft Analysis Results

(a) Deformation Amount (b) Von Mises Stress Value

In their study, Yang et al. (2019) conducted a finite element analysis for a 2000 kg load and calculated the maximum stress value in the structure of the parking robot as 200.9 MPa. Also, the height of the robot in this study is 170 mm. In our study, for a 2500 kg load, a total stress value of 143.98 MPa was determined on the wheel axle of the drive unit. Our drive unit consists of two wheels and the height of the robot is 100 mm.

4. Discussion and Conclusions

In this study, we present a new application area by incorporating the potential use of AGVs into automated parking systems. By using the parking robot in these systems, alternative parking designs can be re-evaluated in terms of cost and speed. Our parking robot design

comprises two identical modules. Each module includes four drive units and four carrying arms, each capable of independent operation. The modules cooperate to elevate the vehicle from its front and rear wheels via the carrying arms, thereby enabling it to be parked in the desired location. In the design of the parking robot, SolidWorks software was used, while Ansys software was used for the analysis.

Due to their low load capacity, we are unable to use Mecanum wheels in our study. Also, although DS wheel mechanism is very suitable for our study, its direct use is not feasible due to our height limitations. Instead, we present a drive unit design consisting of two wheels. Since the aim of our study is to reduce the equipment used in automated parking systems and, consequently, the costs, a mechanical arm-based solution has been preferred in our design, eliminating the need for a platform.

In this study, power calculations were conducted to determine the required load and movement speed. The analysis of the basic components of the drive unit was performed using the finite element method. The materials used in the design are ductile, equivalent (Von Mises) stress values and deformation amounts have been examined, taking into account the yield limit values. According to the calculation and analysis results.

- The yield limit accepted for the polyurethane material is 43.1 MPa (Table 2). The stress equivalent to the material under load at the contact area with the ground has been calculated as 27.765 Mpa. The value is below the yield limit, which places it within the elastic region, thereby indicating a safe zone. The deformation observed in the polyurethane material at the contact area with the ground was found to be 0.042 mm. The material presents an elongation capacity of up to 400% until reaching the breaking point. It has been demonstrated that the deformation quantity is within the safe zone.
- The yield limit accepted for the wheel shaft manufactured from CK45 steel is 565 Mpa (Table 2). The stress equivalent to the material under load in the bearing region has been determined to be 143.98 MPa. The value in question is below the yield limit, which places it within the elastic region, thereby indicating a safe zone. The deformation amount occurring in the wheel shaft is 0.012 mm. The elongation capacity of up to 10% until exceed the breaking point ensures that the deformation amount remains within the safe zone.

The widespread use of AGVs across various sectors around the world is expected to contribute to the development of smart parking systems through their integration into automated parking systems. This product can eliminate the need for steel platforms, stacking conveyors, and horizontal transportation mechanisms for each vehicle. The use of parking robots in automated parking systems, which require significant investments, may lead to cost savings, increased parking entry and exit speeds, and reduced space requirements. If cost reductions occur, it could facilitate the widespread acceptance of smart parking systems. Additionally, the solution to the steering problem of a parking robot at this height will be a topic for future research. This article will inspire new studies by evaluating all these possibilities.

References

- Dal, M. (2006). *Anabilim Dalı: Disiplinlerarası Programı: Mekatronik Mühendisliği İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Holonomik Olmayan Kısıtlara Sahip Mobil Robot Modellemesi, Simülasyonu ve Tasarımı Yüksek Lisans Tez.*
- Gfrerrer, A. (2008). Geometry and kinematics of the Mecanum wheel. *Computer Aided Geometric Design*, 25(9), 784–791. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2008.07.008>
- Jiang, J., Zhang, S., & He, Y. (2020). Wheel design and motion analysis of a new heavy-duty AGV in aircraft assembly lines. *Assembly Automation*, 40(3), 387–397. <https://doi.org/10.1108/AA-01-2019-0009>
- Kutay, M. G. (2009). Mukavemet değerleri. Ankara: MMO Yayınları
- Moshayedi, A. J., Li, J., & Liao, L. (2019). AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance. *Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, 12(4).
- Shen, K., Qiu, Q., Wu, Q., Lin, Z., & Wu, Y. (2021). Research on the development status of AGV parking robot based on patent analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1905(1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1905/1/012018>
- Sun, H., Liu, R., Zhao, C., & Wei, H. (2019). *Design of Four Wheel Drive Four Wheel Steering AGV And Trajectory Tracking Control Research*. (9), 1–5.
- Vis, I. F. A. (2006). Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*, 170(3), 677–709. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.020>
- Wu, G., Xu, X., Gong, Y. (Yale), De Koster, R., & Zou, B. (2019). Optimal design and planning for compact automated parking systems. *European Journal of Operational Research*, 273(3), 948–967. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.014>
- Xing, Y., Yang, Y., Zu, Q., & Yu, J. (2019). Application of AGV technology and design and calculation of driving system. *AIP Conference Proceedings*, 2073(December 2016). <https://doi.org/10.1063/1.5090682>
- Yang, Y., Wang, W., Fan, Z., Zhang, M., & Liu, T. (2019). Design and simulation of cooperative parking robot. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, 2019-July*, 1287–1292. <https://doi.org/10.1109/AIM.2019.8868785>
- URL 1: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2b2b98cba00041f284fd76b317bab43f> ; Overview of materials AISI 1045 Steel, as cold drawn, 32-50 mm (1.25-2 in) round; 27.05.2024,
- URL 2: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b4c5102d22ef42758ad6888c9cd34dd9>; Overview of materials for Thermoplastic Polyurethane (TPUR), Polyether Grade, 27.05.2024



Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>



ÖZGÜN TİP SERBEST PİSTON LINEER GENLEŞTİRİCİNİN DENEYSEL PERFORMANS ANALİZİ

***Furkan KODAKOĞLU:**

Baykar Teknoloji, 34488, İstanbul, Türkiye

e-posta : kodakoglufurkan@gmail.com, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1462-9224>

John NUSZKOWSKI:

University of North Florida, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32224,
Jacksonville, Florida, ABD

e-posta : john.nuszkowski@unf.edu, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-1198-1038>

Anahtar Kelimeler

Öz

*Vanasız Serbest Piston;
Lineer Genleştirici; De-
neysel Performans Ana-
lizisi; Düşük Sıcaklıklı Isı
Geri Kazanımı.*

Bu çalışmanın amacı, bir Vanasız Serbest Piston Lineer Genleştirici'nin (SPLG) uzun süreli sürekli rejim çalışmasını elde etmektir. Giriş ve çıkış sıcaklıklarını, giriş ve çıkış basınçlarını, debiyi ve voltaj çıkışını ölçmek için bir deneysel test düzeneği kurulmuştur. Frekans, voltaj ortalama karekök değeri, hacimsel verim, elektrik-mekanik dönüşüm verimi, izantropik verim, tersinmezlik, gerçek genleştirici gücü ve elektrik gücü gibi birçok çıktı parametrelerinin eğilimleri sunulmuştur. SPLG'nin bu ilk çalışmasında, 44 Hz maksimum genleştirici frekansı ve %21,5 maksimum izantropik verim elde edilmiştir.

* kodakoglufurkan@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1628149

EXPERIMENTAL PERFORMANCE ANALYSIS OF A NOVEL TYPE FREE PISTON LINEAR EXPANDER

Keywords

*Valveless Free Piston;
Linear Expander; Expe-
rimental Performance
Analysis; Low Tempera-
ture Heat Recovery.*

Abstract

The objective of this work was to achieve long-term steady state operation of a Valveless Free-Piston Linear Expander (FPLE). An experimental test bench was developed to measure the inlet and outlet temperatures, inlet and outlet pressures, flow rate, and voltage output. The trends of several output parameters such as frequency, average root mean square (RMS) voltage, volumetric efficiency, electrical-mechanical conversion efficiency, isentropic efficiency, irreversibility, actual expander work, and electrical power were presented. In this first iteration, FPLE achieved a maximum expander frequency of 44 Hz and a maximum isentropic efficiency of 21.5%.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 27.01.2025

Kabul Tarihi : 24.03.2025

Research Article

Submission Date : 27.01.2025

Accepted Date : 24.03.2025

Extended Abstract

Introduction

Increasing demand for fossil fuel consumption in order to generate electricity suggests researchers to further develop current energy generation technologies. In this regard, efficiencies of the current thermodynamic cycle designs also need to be improved so that the dependence on the fossil fuels can be decreased. Low temperature heat recovery, in this case, has the potential to utilize the waste energy, thereby increasing the efficiency of the cycles and helping to reduce air pollution.

The purpose of this work was to investigate the potential of a new type of expander called Free-Piston Linear Expander (FPLE). It was also of interest to this work to design and build the FPLE to analyze the feasibility of the expander for advanced low temperature heat recovery systems. The configuration of FPLE involves several advantages over conventional expansion machines, such as compact and simple design, low manufacturing cost, good operational flexibility, and high efficiency. Friction and leakage are assumed to be prominent factors on its performance. Another contribution to performance losses is a possible heat loss which can be minimized with proper insulation techniques. In addition, structural balancing is required to prevent excessive vibrations. Many studies have been observed on conventional expansion machines in the literature. Although the FPLE has a simple design and low manufacturing cost, a limited number of experimental studies on this expander exists in the literature. For this reason, this study aims to develop a FPLE to investigate its performance for use in low temperature energy recovery systems.

Objectives

The objective of this work was to investigate the performance of the FPLE and to analyze its viability for low temperature heat recovery systems. Heat sources such as waste energy, solar power, and geothermal energy can be utilized to drive the selected expander. Currently, a limited number of experimental studies of the FPLE were found in the literature. For this reason, primary attention was focused on the initial operation of the FPLE. For this study, the testing was performed at the University of North Florida's College of Computing, Engineering & Construction's Mechanical Engineering Energy Efficiency Laboratory by using the air as the working fluid provided by means of a compressor. In order to analyze the performance of the FPLE and to compare it with other expander types in the literature, a test bench was developed with measurement devices such as pressure and temperature sensors, LabJack U12, and flow rate meter. The schematic of the testing configuration and a brief explanation of the expander design, equipment, measurement devices, and the method of thermodynamic analysis are presented.

Methods

A test bench was developed with measurement devices such as pressure and temperature sensors, data acquisition system, and a flow rate meter in order to analyze the performance of the FPLE and to compare it with other expander types in the literature. The air was chosen as the working fluid and supplied by

means of a compressor. The in-line air heater was used to heat the air before entering to the FPLE. The cylinder vessel and the inlet air pipeline were insulated with a fiberglass insulation material. A resistor bank was established in the experimental setup in order to apply an external load to the FPLE.

The FPLE design, analyzed in this study, consists of a piston with two chambers and a cylinder with four ports, two of which are intake ports and the others are exhaust ports. The cylinder housing has an electric coil. Two chambers of the piston are connected to each other with a rod, to which permanent magnets are coupled.

K-type thermocouples were used to measure the temperatures of the inlet air and the inlet and outlet temperatures of the FPLE's chambers with an accuracy of 2.2 °C. Four gauge pressure sensors with an accuracy of 2.5% of full scale were attached to the inlet and outlet ports of both chambers of the FPLE. The chamber thermocouples and pressure sensors were connected to the data acquisition device and the software was used to display and record the temperature/pressure values. A panel-mount flow meter was used to measure the flow rate entering and exiting the expander with an accuracy of 3.0% of full scale. Another data acquisition device was connected to the electrical circuit of the FPLE to display and measure the voltage outputs during operation. The frequency accuracy is the ratio of the scan rate (Hz) to the number of scans during voltage recordings.

The analysis was carried out by using the first and second laws of thermodynamics. The cylinder vessel of the FPLE was taken as the control volume for the analysis, which has two inlets and outlets.

This study complied with research and publication ethics.

Results and Discussions

The long-term steady state operation of the valveless FPLE was successfully achieved. Three different sets of experiments were performed in order to analyze the performance of the FPLE with varying inlet air pressure, inlet air temperature, and resistance magnitude.

The frequency output of the FPLE had a tendency to increase as the inlet air pressure increased while increasing the inlet air temperature resulted in the decrease of the frequency. The maximum frequency in all the experiments was achieved as 44.0 Hz. The FPLE produced the maximum average RMS voltage of 2.32 V. It can be anticipated from the trends that the voltage is likely to increase at even higher inlet air pressures and resistance magnitudes with an optimum inlet air temperature of 60 °C.

The results showed that the maximum isentropic efficiency of the FPLE was achieved as 21.5%, producing maximum actual expander work and maximum electrical power of 75.1 W and 3.30 W, respectively. The mechanical-electrical conversion efficiency results ranged between 0.1%-7.1%, clearly indicating the cause of the large differences between the actual expander work and the electrical power output.

It should be noted this was the first iteration of this valveless FPLE design. For future studies, O-ring material is recommended to be improved in order to provi-

de better sealing and reducing the friction between O-rings and the cylinder wall. Furthermore, mechanical-electrical conversion mechanism should be improved in order to reduce the difference between the actual expander work output and the electrical power produced. Therefore, further research can be conducted on the magnet selection, coil wiring, and the electrical circuit design.

1. Giriş

Mevcut küresel eğilimler 2035 yılına kadar fosil yakıtlar için olan talebin artacağını açıkça göstermektedir (International Energy Agency, 2013). Bu yükseliş mühendisleri mevcut enerji üretim teknolojilerini daha da geliştirmeleri yönünde zorlamaktadır. Bu bağlamda, mevcut termodinamik çevrim tasarımlarının verimleri ayrıca geliştirilmelidir ki fosil yakıtlara olan bağımlılık azalabilsin. Düşük sıcaklıklı ısı geri kazanımı, bu durumda, atık ısıyı kullanabilme potansiyeline sahiptir. Böylece çevrimlerin verimleri arttırılabilir ve hava kirliliğini azaltmada katkı sağlayabilir.

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik üretmek için kullanılan en yaygın çevrimdir (Li ve diğ., 2023; Braimakis, 2024). Bu ısı kaynakları atık ısıya (Stainchaouer, Schiffelechner, Wieland, Sakalis ve Spliethoff, 2024; Yan, Liu, Ying ve Zhang, 2023; Aliahmadi, Moosavi ve Sadrhosseini, 2021; Wang ve diğ., 2024), güneş gücüne (Xu, Zhang, Zhang, Ma ve Sambatmaryde, 2024; Fatigati, Bartolomeo ve Cipollone, 2024), jeotermal güce (Pambudi, Wibowo, Ranto ve Saw 2021), ve biyokütle gücüne (Permana, Fagioli, Lucia, Rusirawan ve Farkas, 2024) dayalı olabilir. ORÇ'nin önemli bir komponenti olarak, genleştiricinin sistemin tüm performansına ve verimine etkisi vardır. Optimum ısı verimliliği elde etmede, en uygun genleştiricinin seçilmesi anahtar bir rol oynar. Genleşme makineleri, genel olarak, tasarımları ve çalışma prensipleri açısından iki ana kategoriye ayrılır. Bu kategoriler dinamik makineler (turbomakineler gibi) ve pozitif yer değiştirme makineleridir (ayrıca hacimsel genleştiriciler olarak da adlandırılır) (Harada, 2010; Yagoub, Doherty ve Riffat, 2006). Türbinler, makine boyu küçüldükçe, verimli çalışmak için çok yüksek hızlarda çalışmayı gerektirir. Ayrıca, ıslak genleşmeye toleransları yoktur ve karmaşık tasarımlara ve yüksek imalat maliyetlerine sahiptirler.

Pozitif yer değiştirme genleştiricileri scroll (Imran, Usman, Park ve Lee, 2016; Mathias, Johnston, Cao, Priedeman ve Christensen; 2009), vidalı (Smith, Stosic ve Kovacevic, 2005; Smith, Stosic ve Kovacevic, 1999; Smith, Stosic, Aldis ve Kovacevic, 2000), döner kanatçıklı (Yang, Peng, He, Guo ve Xing, 2009), gerotor (Mathias, Johnston, Cao, Priedeman ve Christensen; 2009), pistonlu (Glavatskaya, Poddevin, Lemort, Shonda ve Descombes, 2012), döner (yuvarlanan) pistonlu (Hu, Li, Zhao, Xia ve Ma, 2015) ve serbest piston lineer genleştirici çeşitlerini içerir (Wang, Chen, Jia ve Roskill, 2017; Zhang, Peng, He, Xing ve Shu, 2017; Preetham ve Weiss, 2016; Li ve diğ., 2016). Scroll genleştiriciler, Imran ve diğ. (2016) tarafından gösterildiği gibi, düşük güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır ve verimleri %7-85 aralığındadır. Vidalı genleştirici uygulamaları ORÇ, güneş enerjili ORÇ, jeotermal, ve soğutma çevrimlerini kapsamaktadır (Imran ve diğ., 2016). Smith ve diğ. (Smith ve diğ., 1999; 2000; 2005) uzun süreli gelişmeleri ve araştırmaları göstermiştir.

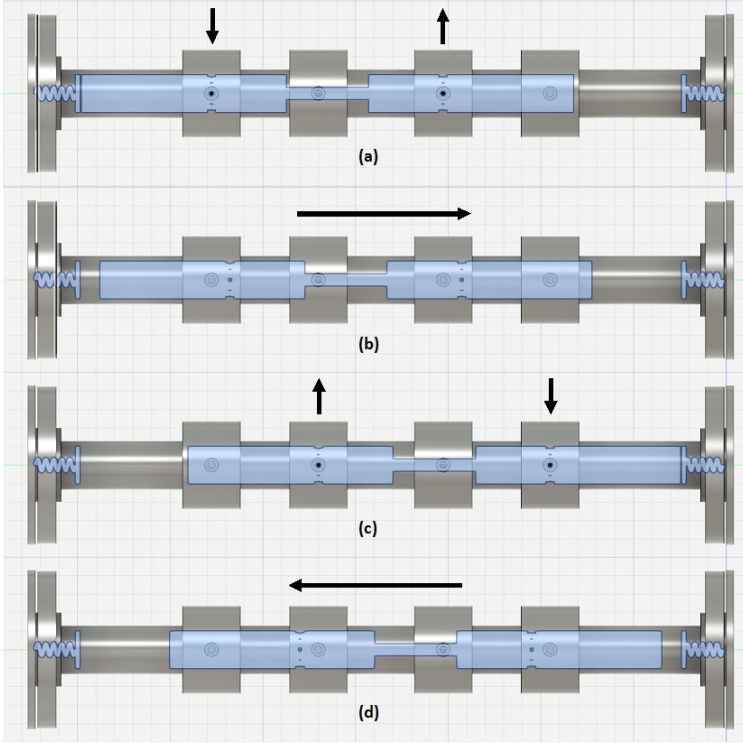
Serbest piston lineer genleştirici (SPLG) ısı enerjisiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir pozitif yer değiştirmeli makinedir. Yakın geçmişte araştırmaların bir konusu olmuştur ve literatürde birkaç tasarım alternatifleri sunulmuştur (Zhang ve diğ., 2017; Preetham ve Weiss, 2016; Li ve diğ., 2016; Tian ve diğ., 2017). Gelecekteki tasarımında, SPLG Üst Ölölü Noktadan (ÜÖN) Alt Ölölü Noktaya (AÖN) meka-

nik bir bağlantı olmadan bir silindir içinde serbestçe hareket eden bir pistondan oluşur. Mekanik bir bağlantının olmaması bu genleştiriciyi tipik pistonlu genleştiricilerden ayırır. Wang ve diğ. (2017) bir lineer elektrik jeneratörüyle birleştirilen çift-pistonlu hava tarafından sürülen serbest piston lineer genleştiricinin deneysel çalışmasını yürütmüştür. Konsept tasarımlarında, sisteme hava girişi ve çıkışı her silindirde bulunan giriş vanası ve elektromanyetik egzoz vanası aracılığıyla sağlanmıştır. Zhang ve diğ. (2017) transkritik CO₂ çevriminin kısma prosesindeki işi geri kazanmak için çift etkili serbest piston genleştirici tasarımı geliştirmişlerdir. Preetham ve Weiss (2016) kayar piston mimarisine dayalı olarak bir küçük ölçekli serbest piston genleştirici tasarlamışlardır ve genleştiricinin düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarını kullanılabilir güç çıktılarına çevirmede kullanımını incelemişlerdir. Li ve diğ. (2016) özgün bir serbest piston genleştirici ve lineer jeneratör ünitesi kullanarak taşıt motorlarından atık ısıyı geri kazanmayı sunmuşlardır. Tian ve diğ. (2017) serbest piston lineer jeneratörün çalışma karakteristiklerini ve güç çıktılarını araştırmak için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Ismael ve diğ. (2021) iki pistonlu lineer jeneratör için test düzeneği geliştirmiştir ve piston hareketinin ürettiği güç, voltaj, frekans ve dönüşüm verimleri gibi parametreleri incelemiştir. Vana zamanlamasını ayarlayarak yapılan araştırmada, %59.9 maksimum verimlilik elde edilirken 120 W'lık güç üretilmiştir. Serbest piston genleştirici jeneratörü için başka bir test düzeneği, Peng, Tong, Guo ve Huo (2021) tarafından çalışılmıştır. Tek pistonlu sistemde yapılan bu çalışmada, farklı genleşme zamanlarında ve tork yüklerinde, genleştiricinin çalışma karakteristiği incelenmiştir. Maksimum 25.8 W'lık güç elde edilmiştir. Wu ve diğ. (2021), basınçlandırılmış havayı kullanarak tek pistonlu serbest piston genleştiricisinin performansını incelenmiştir. Genleştiriciye bağlanan jeneratör aracılığıyla 3 J'luk bir enerji üretimi yapılmıştır. Peng, Tong, Yan ve Huo (2022), diğer bir çalışmada, giriş basıncının ve torkun tek pistonlu serbest piston genleştiricinin performansına etkisi incelenmiştir. Tüm parametrelerin içinde, giriş basıncının etkisinin performansa en büyük etkisi olduğu sonucuna varılmış ve maksimum 28.5 W'lık bir güç üretimi elde edilmiştir.

SPLG için tasarımlardan biri de çift piston yapıları bir serbest piston olarak düşünülmektedir (Wang ve diğ., 2017). Diğer deyişle, piston 2 odaya sahiptir (Bonar, 2002). Bonar tarafından tasarlanan SPLG, diğer tasarımlar gibi giriş ve egzoz portlarının açılmalarını kontrol etmek için kontrol vanaları kullanmamaktadır (Wang ve diğ., 2017; Tian ve diğ., 2017; Bonar, 2002). Bu genleştiricinin en önemli avantajlarından birisi basit tasarımı ve düşük üretim maliyetidir. Giriş ve çıkış portları vanasız olduğundan, genleştirici hareket eden sadece bir parçaya sahiptir, o da pistondur. Bu çalışmanın amacı yeni bir genleştirici tipi olan Vanasız Serbest Piston Lineer Genleştiricinin (SPLG) potansiyelini incelemektir. Gelişmiş düşük sıcaklıklı ısı geri kazanım sistemleri için bu genleştiricinin uygulanabilirliğini analiz etmek için SPLG'yi tasarlamak, üretmek ve deneysel performans analizini yapmak bu çalışmada asli amaç edinilmiştir. SPLG'nin test edilmesi için test düzeneği kurulmuştur. SPLG'nin bu tasarımının literatürdeki diğer tasarımlara göre avantajı vana içeriyor olmaması ve tek hareket eden parçanın piston olmasıdır. Vanasız SPLG tasarımının ilk deneysel sürekli rejim çalışmasının elde edilmesi ve performans analizi bu çalışmanın nihai hedefidir.

2. Deneysel Yöntemler

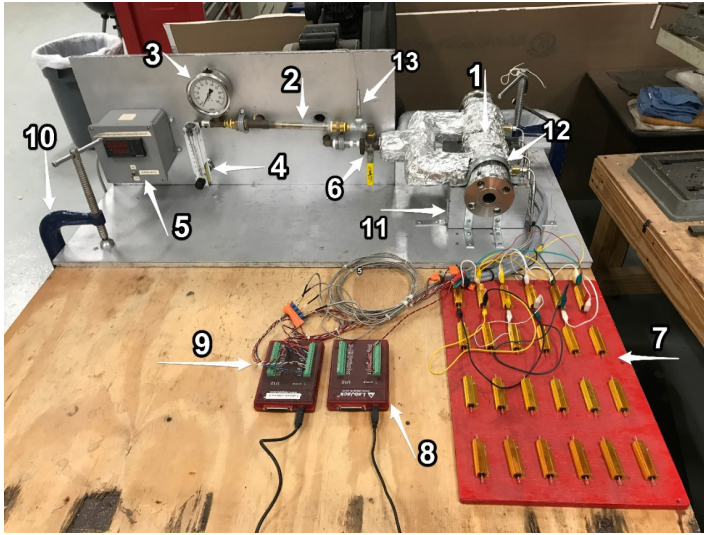
Bu çalışmada analiz edilen SPLG tasarımı iki odalı bir pistondan ve 4 delikli silindirden oluşmaktadır. 2 delik giriş bölmeleri ve geri kalanlar egzoz bölmelerini oluşturur. Silindir gövdesi elektrik sargılarına sahiptir. Pistonun iki odası, üzerine doğal mıknatısların yerleştirildiği bir bağlantı çubuğuyla birbirlerine bağlıdır. Sistemin çalışması krank mili içermeyen bir motorun çalışma prensiplerini andırmaktadır. Pistonun lineer hareketinden elde edilen elektrik gücünü üretme yöntemi, pistona yüklenmiş mıknatıslarla ve silindire sarılan sargılarla sağlanmıştır. Çalışma sürecinde, her odadaki parametreler eş zamanlı olarak değişir ve bir odada sıkışma gerçekleşip diğer odada genleşme oldukça elektrik gücü üretilir. Silindir gövdesinin her iki tarafında bir yay-conta mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma, pistonun hareket ederken silindir içinde aşırı yer değiştirme yapmasını önler. Çalışma prosesi Şekil 1’de gösterilmiştir.



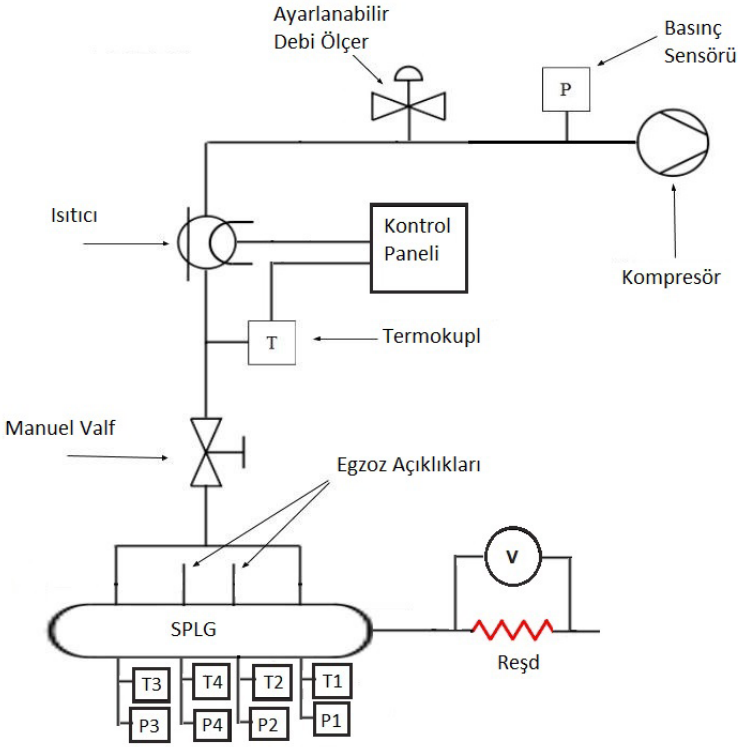
Şekil 1: Odadan odaya çalışma prosesleri: (a) proses 1 → 2: sol odada hava girişi ve sağ odada hava tahliyesi, (b) proses 2 → 3 (güç elde edinimi): sol odada genleşme ve sağ odada sıkıştırma, (c) proses 3 → 4: sağ odada hava girişi ve sol odada hava tahliyesi, (d) proses 4 → 1 (güç elde edinimi): sağ odada genleşme ve sol odada sıkıştırma

SPLG’nin performansını analiz etmek ve literatürdeki diğer genleştirici tipleriyle karşılaştırmak için, basınç ve sıcaklık sensörleri gibi ölçüm cihazlarıyla, veri

edinim sistemiyle, ve bir debi ölçer ile bir test düzeneği geliştirilmiştir. Akışkan olarak hava kullanılmıştır ve bir kompresör aracılığıyla sağlanmıştır. SPLG'ye girişinden önce hava istenen basınçta kompresör tankında depolanmıştır. Kontrol vanası açıldığı anda, SPLG basınçlı hava ile harekete geçirilmiştir. SPLG'ye girişinden önce, bir proses hava ısıtıcısı havayı ısıtmak için kullanılmıştır. SPLG çalışır konumdayken giriş havası kademeli olarak istenen sıcaklıklara getirilmiştir. Her SPLG testinden sonra pistonun soğuması için yeterli süre beklenmiştir. Silindir gövdesi ve giriş hava boru hattı bir fiberglas yalıtım malzemesiyle yalıtılmıştır. SPLG'ye dış yük yüklemek için, birden fazla direnç sistemi deney düzeneğinde kurulmuştur. Test düzeneğinin tümünü gösteren resim Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 3, test düzeneğinin şematığını göstermektedir.



Şekil 2: SPLG test düzeneğinin resmi; 1) SPLG, 2) Elektrikli ısıtıcı, 3) Basınç ölçer, 4) Debi ölçer, 5) Kontrol paneli, 6) Akış kontrol vanası, 7) Direnç bankası, 8) Voltaj ölçümü için LabJack, 9) Sıcaklık ve basınç ölçümleri için LabJack, 10) Masa için C-kelepçesi, 11) Genleştirici tutucusu için L-kelepçesi, 12) SPLG kelepçesi, 13) Giriş hava sıcaklığı ölçümü için termokupl



Şekil 3: Test düzeneğinin şematiği

Giriş hava sıcaklığını ve SPLG odalarının giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetine sahip K-tipi termokupllar kullanılmıştır. SPLG'nin iki odasındaki giriş ve çıkış deliklerine %2,5 doğruluğuna sahip 4 adet gösterge basınç sensörleri yerleştirilmiştir. Odalardaki termokupllar ve basınç sensörler veri edinim cihazına bağlanmıştır ve bir yazılım aracılığıyla sıcaklık/basınç değerleri görüntülenip kaydedilmiştir. Panele yerleştirilen debi ölçer ile tam ölçeğin %3,0 doğruluğunda genleştiriciye giren ve çıkan debi ölçülmüştür. Ek bir veri edinim cihazı SPLG'nin elektrik devresine bağlanmıştır ve çalışma esnasında üretilen voltaj çıktısı görüntülenip kaydedilmiştir. Voltaj kaydı esnasındaki frekans doğruluğu, tarama hızının (Hz) tarama sayısına oranıdır. Çalışmada izlenen deneylerin tasarımı Tablo 1'de bağımsız değişkenler ve kontrol edilen değişkenler değerleri ile birlikte sunulmuştur.

Tablo 1: Deneylerin tasarımı

Test Seti #	Bağımsız Değişken	Kontrol Edilen Değişkenler
1	Giriş Hava Basıncı Değer Aralığı: 275.8-551.6 kPa Artış Oranı: 68.9 kPa	Giriş Hava Sıcaklığı (90 °C) Direnç Büyüklüğü (0.667 ohm)
2	Giriş Hava Sıcaklığı Değer Aralığı: 50–90 °C Artış Oranı: 10 °C	Giriş Hava Basıncı (413.7 kPa) Resistance Magnitude (0.667 ohm)
3	Direnç Büyüklüğü Değerler: 0.667, 1.667, 3.333, 8.333 ohm	Giriş Hava Basıncı (413.7 kPa) Giriş Hava Sıcaklığı (90 °C)

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3. Veri Analizi

Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılarak, analiz yürütülmüştür. Eşitlik 1-5 sürekli rejim durumu altındaki kütle ve enerji korunumlarından ve entropi dengesinden elde edilmiştir. 1, 2, 3, ve 4 alt simgeleri sırasıyla sağ oda girişi, sağ oda çıkışı, sol oda girişi ve sol oda çıkışı temsil eder (Şekil 1’de işaretlenmiştir). Isı kayıpları gözardı edilecek seviyede olduğu varsayılmıştır. Ek olarak, kinetik ve potansiyel enerjilerdeki değişimler gözardı edilecek kadar düşük değerlerdedir ve bu analizde sıfıra eşit sayılmıştır. Hava bir anda sadece bir odaya girdiğinden, her odaya sağlanan hacimsel debi toplam hacimsel debiye eşittir (Eş. 1). Hava ideal gaz olarak ele alınmıştır. Gerçek genleştirici gücü Eş. 2’de ve izantropik genleştirici güç çıkışı Eş. 3’te gösterilmiştir. Özgül ısı (c_p) ve hava gaz sabiti (R_a) sırasıyla 1,005 kJ/kg-K ve 0,2869 kJ/kg-K sabit değerleri olarak ele alınmıştır. Sıcaklık ölçeği sadece 50 °C ile 90 °C arasında değiştiğinden sabit özgül ısı varsayımı uygun görülmüştür. Genleşme işlemi sonrasındaki havanın çıkış sıcaklıkları ($T_{2,c,s}$ and $T_{4,c,s}$), ideal gazların izantropik genleşme bağıntısı kullanılarak ve özgül ısı katsayısı $k=1,401$ alınarak hesaplanmıştır. Üretilen entropi ve tersinmezlik (I) sırasıyla Eş. 4 ve 5’te gösterilmektedir.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c = \dot{m}_{1,g} = \dot{m}_{2,c} = \dot{m}_{3,g} = \dot{m}_{4,c} = \dot{m} = \rho_h \dot{V}_g \quad (1)$$

$$\dot{W}_{c,h} = \dot{m} c_p \{ (T_{1,g} - T_{2,c,h}) + (T_{3,g} - T_{4,c,h}) \} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{c,s} = \dot{m} c_p \{ (T_{1,g} - T_{2,c,s}) + (T_{3,g} - T_{4,c,s}) \} \quad (3)$$

$$\dot{S}_u = \dot{m} \left\{ \left[c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R_a \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] + \left[c_p \ln \left(\frac{T_4}{T_3} \right) - R_a \ln \left(\frac{P_4}{P_3} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

$$I = T_s \dot{S}_u \quad (5)$$

Hacimsel debi scfm biriminde ölçüldüğü için hesaplamalarda havanın yoğunluğu (ρ_h) 1.225 kg/m³ olarak alınmıştır. T_s değeri 20 °C olarak varsayılmıştır. Eş. 6 kullanılarak kontrol hacmi için izantropik verim hesaplanmıştır. SPLG’nin hacimsel verimi, gerçek kütleli debinin ideal prosesin kütleli debisine oranı olarak tanımlanmıştır. Böylece, hacimsel verim Eş. 7 tarafından belirlenmiştir. Eş. 7 odaların birine sağlanan havanın kütleli debisine, yer değiştirme hacmine ve piston hareketinin frekansına bağlı bir fonksiyondur. Genleştiricinin çalışma frekansı

voltaj-zaman çıktı verisi üzerine uygulanan Fast Fourier Dönüşümü aracılığıyla hesaplanmıştır. Eş. 8 ve Eş. 9 kullanılarak, sırasıyla ortalama elektrik güç çıktısı ve mekanik-elektriksel dönüşüm verimi hesaplanmıştır. Ortalama elektrik güç çıktısı, voltaj ortalama karekök değerine ve dış yükün eşdeğer direncine bağlıdır.

$$\eta_s = \frac{\dot{W}_{c,h}}{\dot{W}_{c,s}} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_h}{\rho_h V_y f} \quad (7)$$

$$W_{e,ort} = \frac{V_{RMS}}{R^2_{eşd}} \quad (8)$$

$$\eta_d = \frac{W_{e,ort}}{W_{c,gerçek}} \quad (9)$$

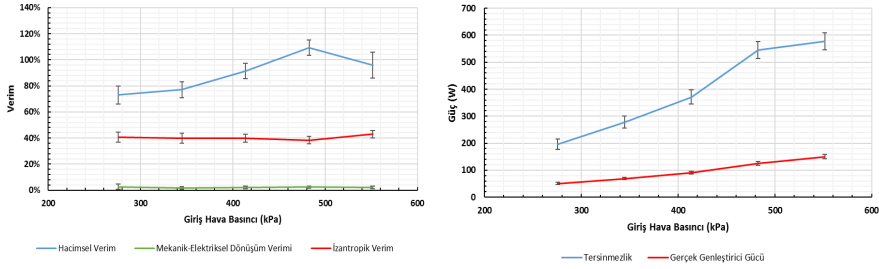
Verilerin hesaplanmasında birçok enstrümandan ölçüm alındığı için ve hesaplanan parametrelerin doğruluklarını belirlemek adına, belirsizlik analizi yürütülmüştür. Hesaplanan parametrelerin standart sapmaları, hatanın yayılması formülü kullanılarak belirlenmiştir (Eş. 10).

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\delta x}{\delta a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\delta x}{\delta b}\right)^2 \sigma_b^2 + \left(\frac{\delta x}{\delta c}\right)^2 \sigma_c^2 \quad (10)$$

4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

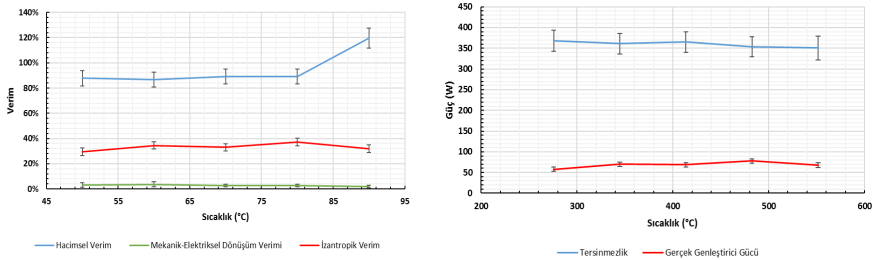
SPLG'nin sürekli rejim çalışması elde edildikten sonra, SPLG'nin performansını analiz etmek adına deneyler yürütülmüştür. Deneylerde havanın giriş basıncı ve giriş sıcaklığı ve genleştiriciye dış yük olarak bağlanan elektrik direnci değiştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde sabit değerlere ulaşıldığı gözlemlenen aralık sürekli rejim alanı olarak seçilmiştir. Sürekli rejim alanındaki termodinamik ve voltaj verilerinin ortalama değerleri her deneyin analizi için sürekli rejim özellikleri olarak kullanılmıştır.

Giriş hava sıcaklığını 90 °C'de ve direnci 0,67 ohm'da tutarken, 276 kPa-552 kPa (40-80 psi) aralığında 69 kPa aralıklarla değişken hava giriş basıncının etkileri incelenmiştir. Sonuçlar genleştiricinin %21.5 maksimum izantropik verime eriştiğini göstermektedir. Gerçek genleştirici gücü ve elektrik güç çıktısı sırasıyla 150,3 W ve 3,30 W olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Özellikle, yüksek giriş hava basınçlarında genleştiricinin çalışma frekansı yükselmiştir. Bu durum piston hızıyla bağlantıyı göstermektedir. Deneyler giriş basıncıyla hacimsel debi ve voltaj çıktısı arasında direkt bir bağlantı göstermektedir. Hacimsel debi 483 kPa'da %109 olarak zirve yaparken, voltaj çıktısı maksimum 1,47 V'a erişmiştir. Bu volt değerindeki elektrik güç en yüksek değerine ulaşmıştır. Fakat, mekanik-elektriksel dönüşüm verimi %1,5 ve %2,6 arasında değişmiştir (Şekil 4a). Bu durum özellikle optimize edilmemiş güç üretim devresi tasarımından dolayı genleştirici gücünü elektrik gücüne dönüştürmedeki verimsizliği göstermektedir. Farklı basınçlarda sabit izantropik verimlerinin elde edilmesinin yanında, gerçek genleştirici gücü tersinmezlik ile beraber artış göstermiştir. Bu durum yüksek basınçlarda sürtünme kayıplarının artmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4b).



Şekil 4: Farklı giriş hava basınçlarındaki performans: (a) verimler (b) gerçek genleştirici gücü ve tersinmezlik.

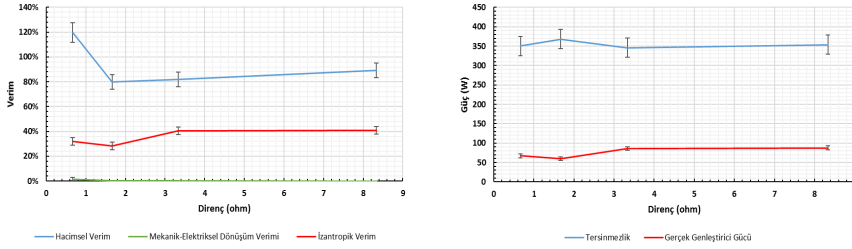
Giriş hava basıncını, hacimsel debiyi ve direnci sırasıyla 414 kPa, 6,1 m³/hr, ve 0,67 ohm'da sabit tutarken, giriş hava sıcaklığı 50 °C ile 90 °C aralığında değiştirilmiştir. Özellikle, maksimum izantropik verimin 80 °C'de %19 olarak görülmüştür, ve deneydeki gerçek genleştirici gücünün 78 W ve elektrik gücünün 1,95 W olduğu gözlemlenmiştir. Frekans değerleri bu deney setinde 50 °C'de 35 Hz'den 90 °C'de 31 Hz'e kadar sıcaklık arttıkça düşüş göstermiştir. En yüksek voltaj ortalama karekök değeri (1,83 V) ve elektrik gücü (2,48 W), 60 °C'de kaydedilmiştir. Bu çalışma izantropik verimin %15 ile %19 arasında değiştiğini göstermiştir. Hacimsel debi 90 °C'de %120 olarak zirve yapmıştır. Bu durumda sızdırmazlık halkalarından iç sızıntı oluştuğu düşünülmektedir (Şekil 5a). Gerçek genleştirici gücü 80 °C'de zirve yaparak 78,06 W değerine ulaşmıştır, fakat, farklı sıcaklıktaki değerler birbirine yakın olarak görülmüştür (Şekil 5b). Diğer tarafta, tersinmezlik giriş hava sıcaklığı arttıkça azalma yönünde eğilim göstermiştir.



Şekil 5: Farklı giriş hava sıcaklıklarındaki performans: (a) verimler (b) gerçek genleştirici gücü ve tersinmezlik.

Son deney serisinde, giriş hava sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 90 °C'de ve 414 kPa'da sabit tutulmuştur ve elektrik yükü 0,67 ohm'dan 8,33 ohm'a kadar değiştirilmiştir. SPLG 8,33 ohm'da maksimum izantropik verimini (%20) göstermiştir. Bu deneyde 87,3 W gerçek genleştirici gücü hesaplanırken sadece 0,03 W elektrik gücü üretilmiştir (Şekil 6). Voltaj ortalama karekök değeri 8,33 ohm dirençte 2,32 V olarak zirve yaparak yük direnci arttıkça artış göstermiştir. Fakat, elektrik gücü yük ile ters orantılı bağıntı göstermiştir ve 1,13 W olarak en düşük direnç olan 0,67 ohm'da zirve yapmıştır. SPLG'nin frekansı rezistans ile değişim göstermiştir. İlk olarak 1,67 ohm'da 38 Hz olarak maksimuma ulaşırken, daha yüksek

dirençlerde düşüşe geçmiştir. İzantropik verim %14 ile %20 arasında değişirken, en yüksek elektrik gücü çıktısı, %1,7'lik düşük mekanik-elektriksel dönüşüm verimine (Şekil 6a) rağmen en düşük dirençte gözlemlenmiştir. Hacimsel verim en düşük dirençte %120 olarak elde edilmiştir. Bu durum potansiyel bir iç sızıntının olduğunu göstermektedir. Direnç arttıkça, gerçek genleştirici gücü de artmıştır. Bu eğilim, yüksek dirençlerde gerçek genleştirici gücünün, tersinmezlik değişimi ihmal edilecek seviyede kalırken daha da artacağını göstermektedir (Şekil 6b).



Şekil 6: Farklı dirençlerdeki performans: (a) verimler (b) gerçek genleştirici gücü ve tersinmezlik.

Şekil 4-6'larda sunulan hata çubukları her bir deney için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışmanın kısa tutulması için sadece farklı giriş hava basınçlarındaki performans testlerinde elde edilen hata değerleri yüzdelik olarak Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Farklı giriş hava basınçlarındaki performans testlerinde elde edilen yüzdelik hata değerleri

Standart Sapma Yüzdeleri					
Giriş Hava Basıncı	276 kPa	345 kPa	414 kPa	483 kPa	552 kPa
Gerçek Genleştirici Gücü	%16	%14	%12	%11	%10
Tersinmezlik	%19	%16	%14	%11	%11
İzantropik Verim	%20	%20	%15	%16	%14
Mekanik-Elektriksel Dönüşüm Verimi	%38	%32	%25	%22	%23
Hacimsel Verim	%10	%8	%7	%5	%10

5. Sonuçlar

Vanasız SPLG'nin uzun süreli sürekli rejim çalışması başarılı bir şekilde elde edilmiştir. SPLG'nin performansını analiz etmek için, giriş hava basıncını, giriş hava sıcaklığını ve elektriksel direnci değiştirilerek üç farklı deney seti uygulanmıştır.

SPLG'nin frekans çıktısı giriş hava basıncı arttıkça artış, giriş hava sıcaklığı arttıkça düşüş göstermiştir. Tüm deneylerdeki maksimum frekans 44 Hz olarak belirlenmiştir. SPLG maksimum 2,32 V voltaj ortalama karekök değerini üretmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere, üretilen voltaj giriş hava basıncı ve direnç arttıkça artma eğilimindedir. Voltaj için optimum giriş hava sıcaklığı 60 °C olarak belirlenmiştir.

SPLG'nin maksimum izantropik verimi %21.5 olarak elde edilmiştir. Bu noktadaki maksimum gerçek genleştirici güç ve maksimum elektrik güç sırasıyla 150,3 W ve 3,30 W olarak gözlemlenmiştir. Mekanik-elektriksel dönüşüm verimi %0,04 ile %3,5 arasında değişim göstermiştir. Bu düşük verim aralığı optimize edilmiş güç üretim elektrik devresinden kaynaklanmaktadır ve gelişmeye açık bu alan ayrı bir çalışmanın konusu olmalıdır. Giriş hava sıcaklığını değiştirmek hacimsel verimi önemli ölçüde değiştirmedir (hata toleransı dahilindedir). Göreceli olarak yüksek hacimsel verim 90 °C ve 0,67 ohm'da gözlemlendi. Bunun muhtemel sebebinin, sızdırmazlık halkaları ile silindir duvarları arasında meydana gelen aşırı iç sızma olduğu düşünülmektedir.

Giriş hava basıncı arttıkça SPLG'nin gerçek genleştirici gücü artmıştır ve 552 kPa'da maksimuma erişmiştir. Direnci 1,67 ohm'dan 8,33 ohm'a kadar arttırmak ayrıca daha yüksek gerçek genleştirici güç çıktılarına sonuç vermiştir. Diğer tarafta, tersinmezlik değerleri giriş hava basıncı arttıkça artış, giriş hava sıcaklığı arttıkça azalış göstermiştir. Fakat, farklı giriş hava sıcaklığında olan tersinmezlik değişimleri hata toleransı içindedir.

SPLG'nin maksimum izantropik verimi %21,5 olarak belirlenmiştir. Bunun, bu vanasız SPLG tasarımının ilk iterasyonu olduğu not edilmelidir. Gelecek çalışmalar için, O-ring malzemesi geliştirilmelidir. Böylece daha iyi sızdırmazlık ve O-ringler ile silindir duvarı arasında daha düşük sürtünme elde edilebilir. Ek olarak, gerçek genleştirici gücü ve elektrik güç üretimi arasındaki farkı düşürmek için, mekanik-elektriksel dönüşüm mekanizması iyileştirilmelidir. Bu sebeple, mıknatıs seçimi, tel sarımı ve elektriksel devre tasarımı üzerine daha fazla araştırma yürütülebilir.

Teşekkür

Bu çalışma University of North Florida Mühendislik Fakültesi ve Hank Bonar tarafından desteklenmiştir. Ek olarak, Matt Hawn, Miranda Johanning, Kyle Parker, ve Blair Clarkson ilk prototipin imalatında yardım etmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir

Simgeler (Symbols)

c_p : Özgül ısı katsayısı (kJ/kgK)

f : frekans (Hz)

I : Tersinmezlik (W)

$\dot{m}$: Kütsel debi (kg/s)

P : Basınç (kPa)

R_{esd} : Eşdeğer direnç (ohm)

S : Entropi (kJ/K)

T : Sıcaklık (°C)

$\dot{V}$: Hacimsel debi (m^3/s)

V_{RMS} : Ortalama karekök voltajı (V)

V_y : Yer değiştirme hacmi (m^3)

$\dot{W}$: Güç (W)

Yunan Harfleri (Greek Letters)

η_d : Mekanik-elektriksel dönüşüm ve

η_s : İzantropik verim

λ : Hacimsel verim

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

σ : Standart sapma

Alt İndis (Subscript)

1: Silindir 1. port

2: Silindir 2. port

3: Silindir 3. port

4: Silindir 4. Port

$\dot{c}$: çıkış

$\dot{c}_{gercek}$: gerçek çıkış

e,ort: ortalama elektrik

g: giriş

h: hava

s: izantropik

ü: üretilen

Referanslar

Aliahmadi M., Moosavi A., Sadrhosseini H. (2021). Multi-objective optimization of regenerative ORC system integrated with thermoelectric generators for low-temperature waste heat recovery, *Energy Reports*, 7, 300-313. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.12.035>

Braimakis K. (2024). Mapping the waste heat recovery potential of CO2 intercooling compression via ORC. *International Journal of Refrigeration*, 159, 309-332. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.01.008>

Bonar H. (2002). U.S. Patent No. 6,484,498, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Fatigati F, Bartolomeo M.D., Cipollone R. (2024). Model-based optimisation of solar-assisted ORC-based power unit for domestic micro-cogeneration, *Energy*, 308, 132785. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132785>

Glavatskaya Y., Podevin P., Lemort V., Shonda O., Descombes G. (2012). Reciprocating expander for an exhaust heat recovery Rankine Cycle for a passenger car application, *Energies*, 5(12), 1751-1765. Doi: <https://doi.org/10.3390/en5061751>

Harada K.J. (2010). Development of a small scale scroll expander (Yüksek Lisans Tezi). Oregon State University, ABD. Erişim adresi: <https://ir.library.oregonstate.edu/concern/graduate-thesis-or-dissertations/dj52w838c>

Hu J., Li M., Zhao L., Xia B., Ma Y. (2015). Improvement and experimental research of CO₂ two-rolling piston expander, *Energy*, 93, 2199-2207. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.097>

Imran M., Usman M., Park B. S., Lee D.H. (2016). Volumetric expanders for low grade heat and waste heat recovery applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1090-1109. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.139>

International Energy Agency (2013). World Energy Outlook 2013, Paris, 708. Erişim adresi: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a22dedb8-c2c3-448c-b104-051236618b38/WE02013.pdf>

Ismael M.A., Aziz A.R.A., Zainal E.Z., Mohammed S.E., Ayandotun W.B., Baharom M.B., Sallehudin M.S., Syakirin M., Anwerudin A.R.T., Masri M.M. (2021). Investigation on free-piston motion and power generation of a dual-piston air-driven expander linear generator, *Energy Reports*, 7, 2388-2397. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.035>

Li X, Han S., Liu Z., He C., Zhang B., Chen Q. (2023). Design optimization and analysis of a multi-temperature partition and multi-configuration integrated organic Rankine cycle for low temperature heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 293 (1), 117504. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117504>

Li G., Zhang H., Yang F., Song S., Chang Y., Yu F., Wang J., Yao, B. (2016). Preliminary development of a free piston expander-linear generator for small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system, *Energies*, 9(4), 300. Doi: <https://doi.org/10.3390/en9040300>

Mathias J. A., Johnston J.R., Cao J., Priedeman D.K., Christensen R.N. (2009). Experimental testing of gerotor and scroll expanders used in, and energetic and exergetic modeling of an Organic Rankine Cycle, *Journal of Energy Resources Technology*, 131(1), 012201-1-012201-9. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.3066345>

Pambudi N.A., Wibowo S., Ranto, Saw L.H. (2021). Experimental investigation of Organic Rankine Cycle (ORC) for low temperature geothermal fluid: Effect of pump rotation and R-134 working fluid in scroll-expander, *Energy Engineering*, 118(5), 1565-1576. Doi: <https://doi.org/10.32604/EE.2021.016642>

Peng B., Tong L., Guo C., Huo W. (2021). Experimental research and performance analysis of a free piston expander-linear generator coupled with a driving motor. *Energy Reports*, 7, 1349-1359. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.02.066>

Peng B., Tong L., Yan D., Huo W. (2022). Experimental research and artificial neural network prediction of free piston expander-linear generator, *Energy Reports*, 8, 1966-1978. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.021>

Permana D.I., Fagioli F., Lucia M.D., Rusirawan D., Farkas I. (2024). Energy, exergy, environmental and economy (4E) analysis of the existing of biomass-ORC plant with capacity 150 kW_e: A case study, *Energy Conversion and Management*: X, 23, 100646. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100646>

- Preetham B., Weiss, L. (2016). Investigations of a new free piston expander engine cycle, *Energy*, 106, 535-545. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.082>
- Smith I. K., Stosic N., Aldis C. A., Kovacevic A. (2000). Twin screw two-phase expanders in large chiller units, London: City University London. Erişim adresi: <https://www.staff.city.ac.uk/~sj376/smith99a.htm>
- Smith I.K., Stosic N., Kovacevic A. (1999). Power recovery from low cost two-phase expanders, London: City University London. Erişim adresi: <https://www.staff.city.ac.uk/~ra601/exp.pdf>
- Smith I.K., Stosic N., Kovacevic A. (2005). Screw expanders increase output and decrease the cost of geothermal binary power plant systems, London: City University London. Erişim adresi: <https://www.staff.city.ac.uk/~ra601/grc2005.pdf>
- Stainchaouer A., Schiffelechner C., Wieland C., Sakalis G., Spliethoff H. (2024). Evaluating long-term operational data of a very large crude carrier: Assessing the diesel engines waste heat potential for integrating ORC systems, *Applied Thermal Engineering*, 255, 123974. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123974>
- Tian Y., Zhang H., Li G., Hou X., Yu F., Yang F., Yang Y., Liu Y. (2017). Experimental study on free piston linear generator (FPLG) used for waste heat recovery of vehicle engine, *Applied Thermal Engineering*, 127, 184-193. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.031>
- Wang Y., Chen L., Jia B., Roskilly A.P. (2017). Experimental study of the operation characteristics of an air-driven free-piston linear expander, *Applied Energy*, 195, 93-99. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.032>
- Wang T., Zhou T., Feng Y., Zhang M., Zhu S., Yang H. (2024). Poly-generation system with waste heat of low-temperature flue gas in power plants based on organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, 242, 122513. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122513>
- Wu Z., Zhang H., Liu Z., Hou X., Li J., Yang F., Zhang J. (2021). Experimental study on the performance of single-piston free-piston expander-linear generator, *Energy*, 221, 119724. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119724>
- Xu X., Zhang L., Zhang H., Ma J., Sambatmaryde K. (2024). Performance analysis of a novel small-scale integrated solar-ORC system for power and heating, *Solar Energy*, 274, 112605. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112605>
- Yagoub W., Doherty P., Riffat S. (2006). Solar energy-gas driven micro-CHP system for an office building, *Applied Thermal Engineering*, 26(14-15), 1604-1610. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.021>
- Yan L., Liu J., Ying G., Zhang N. (2023). Simulation analysis of flue gas waste heat utilization retrofit based on ORC system, *Energy Engineering*, 120 (8), 1919-1938. Doi: <https://doi.org/10.32604/ee.2023.027546>
- Yang B., Peng X., He Z., Guo B., Xing Z. (2009). Experimental investigation on the internal working process of a CO2 rotary vane expander, *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2289-2296. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.11.023>
- Zhang, B., Peng X., He Z., Xing Z., Shu P. (2017). Development of a double acting free piston expander for power recovery in transcritical CO2 cycle, *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1629-1636. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.05.034>



OPTIMIZATION OF PRINTING PARAMETERS TO ENHANCE THE MECHANICAL PROPERTIES OF PARTS PRODUCED WITH PEEK USING FUSED DEPOSITION MODELLING METHOD

*Oğuzhan NAZLIM:

Biruni Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstriyel Tasarım, İstanbul

e-posta : oguzhannazlim@gmail.com,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-7557-6333>

Keywords

Durability, Additive Manufacturing, 3D Printing, Polyether Ether Ketone (PEEK), Printing Parameters, Optimization.

Abstract

3D printing or additive manufacturing, has revolutionized the production of complex structures by facilitating the use of high-performance polymers. This study was conducted to obtain optimum printing settings to optimize the mechanical properties of parts produced from high-performance PEEK polymer. By systematically varying parameters such as layer height, printing speed, extrusion temperature, and filling density, the effects on the tensile strength, impact resistance, and durability of printed materials were analyzed. To this aim, impact and tensile tests was applied to each sample and the printing parameters was analyzed with Analysis of Variance (ANOVA). The optimal printing parameters, determined through tests conducted in accordance with printer specifications, are as follows: a printing speed of 20 mm/s, a layer height of 0.3 mm, an extrusion temperature of 400°C, and a filling rate of 100%. These parameters demonstrated noteworthy mechanical qualities, such as a Young's modulus of 4.1 GPa, an impact strength of 7.1 J, and a tensile strength of 82.5 MPa. The findings reveal that specific combinations of these properties significantly improve the mechanical performance of PEEK.

* oguzhannazlim@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1603637

ERİYİK YIĞMA MODELLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK PEEK İLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ İYİLEŞTİRMEK İÇİN BASKI PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Anahtar Kelimeler

Öz

Dayanıklılık, Katmanlı Üretim, 3D Baskı, Polyether Ether Ketone (PEEK), Baskı Parametreleri, Optimizasyon.

3D baskı veya katkı maddesi imalatı, yüksek performanslı polimerlerin kullanımını kolaylaştırarak karmaşık yapıların üretiminde devrim yaratmıştır. Bu çalışma, yüksek performanslı PEEK polimerinden üretilen parçaların mekanik özelliklerini optimize etmek için optimum baskı ayarlarını elde etmek amacıyla yürütülmüştür. Katman yüksekliği, baskı hızı, ekstrüzyon sıcaklığı ve dolum yoğunluğu gibi parametreleri sistematik olarak değiştirerek, basılı malzemelerin çekme mukavemeti, darbe direnci ve dayanıklılığı üzerindeki etkiler analiz edilmiştir. Bu amaçla, her numuneye darbe ve çekme testleri uygulanmış ve baskı parametreleri Varyans Analizi (ANOVA) ile analiz edilmiştir. Yazıcı özelliklerine uygun olarak gerçekleştirilen testlerle belirlenen optimum baskı parametreleri şunlardır: 20 mm/s baskı hızı, 0,3 mm katman yüksekliği, 400°C ekstrüzyon sıcaklığı ve %100 dolum oranı. Bu parametreler, 4,1 GPa Young modülü, 7,1 J darbe dayanımı ve 82,5 MPa çekme dayanımı gibi dikkate değer mekanik nitelikler göstermiştir. Bulgular, söz konusu özelliklerin belirli kombinasyonlarının PEEK'in mekanik performansını belirgin bir şekilde iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 18.12.2024

Kabul Tarihi : 07.04.2025

Research Article

Submission Date : 18.12.2024

Accepted Date : 07.04.2025

1. INTRODUCTION

The manufacturing process has undergone a revolutionary development through 3D printing or otherwise known as Additive Manufacturing (AM). This manufacturing method has enabled the creation of very complex geometries with high accuracy, customization and less waste, appealing to consumers in the aerospace, automotive, medical and consumer products sectors. One of the major breakthroughs in 3D printing has been achieved through the use of high-performance polymers. These polymers show high performances in terms of mechanical properties, thermal stability and chemical resistance compared to traditional materials Polylactic acid (PLA) ve Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) (ABS). (Wasti & Adhikari, 2020; Yavuz & Yuran, 2021).

High-performance polymers such as Polyether-Ether-Ketone (PEEK), PolyAmide (PA), and Poly-Carbonate (PC) are gaining more popularity in 3D printing due to their exceptional properties. These materials have the ability to offer high strength, toughness, and resistance to extreme operating temperatures. However, optimizing the mechanical properties of high-performance polymers during 3D printing is a major challenge. The factors that most affect the mechanical properties of printed components are layer height, extrusion temperature, infill density and printing speed. There are also side factors such as infill direction and humidity (Patti et al., 2022; Wu, Geng, Li, Di, et al., 2015).

Although high-performance polymers exhibit improved mechanical properties, the key is the consistent optimization of the printing parameters. The literature shows that significant changes in tensile strength, impact resistance, and overall part durability are observed by adjusting the printing parameters. The extrusion temperature affects the bonding between layers, and parameters such as layer height and infill density change the internal structure and stress distribution of the printed part. However, despite all these data being available in the literature, analyses on the combined effects between the various printing parameters of high-performance polymers are insufficient. (Patti et al., 2022).

In a comprehensive study on the optimization of printing settings to improve the mechanic properties of parts printed with high-performance polymers, the most important printing parameters were systematically changed to explore the effects of optimization on tensile strength and impact resistance. In addition, the research, which aims to improve the mechanical properties and heat resistance of parts produced with Fused deposition modeling (FDM) 3D printers, has focused on the development of biodegradable PLA-based composite materials. Binary and ternary mixtures of PLA, PBAT, PBS prepared in certain proportions were prepared and processed using a twin-screw extruder and then subjected to thermal, mechanical and morphological analyses. The results showed that PBS increased the crystal structure for PLA, thus improving its mechanical strength and heat resistance. In particular, ternary blends provided remarkable benefits, thus overcoming the limitations of PLA, such as low heat resistance and brittleness. (Prasong et al., 2021).

In an article on how printing factors affect the mechanical properties of high-performance polymers, the main factors affecting the mechanical properties of parts printed with additive manufacturing and high-performance polymers were determined. PLA/PBS blends were prepared for FDM printing. These blends were easily processed and extruded with 1.75 mm filaments using a standard single-screw extruder. As the PBS content increased, elongation at break and impact strength increased. In addition, interlayer bond strength improved. In blends containing at least 40% PLA by weight, FDM printing in the chamber was carried out without any problems. (Ou-Yang et al., 2018).

In another study that systematically investigated and optimized printing parameters, it was emphasized that the parts produced using high-performance polymers are increasing every year, and it was taken into account that additive manufacturing is moving towards more complex and difficult-to-print applications every year. It was emphasized that in order to optimize these polymers, their components and their ratios need to be better understood, and it was mentioned that the optimizations made were still insufficient (Alabd & Temiz, 2024).

FDM is a widely used 3D printing technology. Since 3D printed parts are produced layer by layer, they exhibit anisotropic mechanical properties. This means that the tensile properties of a printed part can vary significantly depending on the direction and order of layer addition. This anisotropy results from the layer-by-layer fabrication process, which requires effective adhesion between successive layers. In order to achieve high tensile strength and impact resistance, a strong interlayer bond must be achieved. Critical parameters that affect this bonding include extrusion temperature and printing speed. While higher extrusion temperatures improve layer adhesion, uncontrolled speed and temperature management can lead to the polymer not achieving the desired strength during printing. (Zhao et al., 2020).

One of the most important factors affecting the mechanical characteristics of 3D printed parts is the layer height. Lower layer heights have resulted in better surface quality and stronger parts (maximum tensile strength) due to higher interlayer adhesion. The disadvantage of this, as shown in the article, is that it can lead to longer printing times. The infill percentage and pattern have a great impact on the mechanical properties of the 3D printed part. Higher infill densities generally require more material and time, but have resulted in improved mechanical properties and longer-lasting structures. The correct infill pattern also changes the way stress is distributed throughout the part, making a positive difference in its strength when subjected to load. (Hsueh et al., 2021).

In recent years, research on 3D printing has increasingly focused on optimizing process parameters to enhance mechanical properties. In this context, one study examines how layer thickness and raster angle affect the mechanical properties of 3D-printed polyether-ether-ketone (PEEK). Researchers utilized a PEEK 3D printing system to fabricate samples with varying layer thicknesses (200, 300, and 400 μm) and raster angles (0°, 30°, and 45°). Mechanical testing was conduc-

ted to evaluate the tensile, compressive, and bending strengths of these samples. Optimal mechanical properties for PEEK were identified at a layer thickness of 300 μm and a raster angle of 0° , with PEEK outperforming ABS significantly. This highlights PEEK's potential as a superior material for 3D printing compared to traditional materials like ABS (Wu, Geng, Li, Di, et al., 2015).

Similarly, another study investigates the physical and mechanical properties of PLA, ABS, and nylon 6, produced via FDM and conventional injection molding. Various methodologies were employed, including vacuum drying, water absorption tests, X-ray diffraction, and standardized tensile and impact strength assessments. Data collection focused on density, viscosity, water absorption, and mechanical properties of samples from both fabrication techniques. Results showed that FDM samples had significantly lower tensile strength, Young's modulus, elongation at break, and impact strength than injection molded counterparts, with FDM samples exhibiting higher water absorption. These findings highlight performance disparities between fabrication methods, offering insights for optimizing FDM processes in manufacturing (Bardot & Schulz, 2020; Makara et al., 2019).

Expanding on the effects of process parameters, another study explores how nozzle temperature, layer thickness, and raster angles influence the mechanical properties of 3D-printed ABS and PLA specimens. Tensile tests were conducted to assess the mechanical characteristics of the printed specimens. Data collection involved analyzing tensile strength across various nozzle temperatures, layer thicknesses, and raster angles, with surface fractures examined via scanning electron microscopy (SEM). Findings indicated that higher nozzle temperatures reduced tensile strength for ABS, while PLA achieved peak tensile strength at 250°C . The highest tensile strength for both materials occurred at a raster angle of 0° and lower layer thicknesses, demonstrating the critical impact of these parameters on the mechanical properties of 3D-printed objects (Antonio Morey & Julio, 2025).

Broader reviews have also been conducted on high-performance polymers. One comprehensive study provides a detailed review of PEEK and its composites in additive manufacturing, particularly FDM. It analyzes the impact of FDM parameters on print quality attributes, such as mechanical properties and accuracy. The research notes the complexity and slow progress in FDM due to conflicting parameters. Key findings outline the importance of optimizing process factors for enhanced tensile strength. PEEK is recognized as a multifunctional material applicable in various industries, including medical and aerospace (Kashimatt, 2024).

Building upon these investigations, another study focuses on predictive modeling for optimizing 3D printing parameters. This research centers on the advancement of an artificial neural network (ANN) model designed to forecast the mechanical characteristics of 3D-printed PEEK polymer utilizing FDM. The objective is to optimize key process parameters, namely infill density, layer height, printing speed, and infill pattern, to augment the mechanical properties of the

printed components. The methodologies employed encompass ANN modeling featuring a 4-12-3 network architecture, in conjunction with a teaching and learning-based optimization algorithm (TLBO) and a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) for process optimization. Data acquisition comprised an empirical investigation of the 3D printing procedure, which indicated that TLBO effectively reduced surface roughness to 6.01 μm , while NSGA maximized the elastic modulus to 1253.35 MPa and ultimate tensile strength to 65.55 MPa. The results underscore the critical importance of optimizing printing parameters to enhance the mechanical performance of PEEK components, which is vital for applications across diverse industries such as automotive, aerospace, and medical. (Jyotisman & Chandrasekaran, 2024).

Another study further refines process optimization strategies, emphasizing high-performance polymers such as PEEK in material extrusion-based 3D printing. This research focuses on improving the mechanical characteristics of fabricated components, addressing the complexities associated with variability and quality in FDM. The strategy employed involves an ensemble of Surrogate Assisted Evolutionary Algorithms (SAEA), which optimizes critical parameters including layer height, print speed, print orientation, and nozzle temperature while accounting for print duration. The methodology for data acquisition included a comparative analysis of the SAEA outcomes with those derived from Gray Relational Analysis (GRA) Taguchi, serving as a reference standard. The results indicated that the SAEA methodology yielded a 28.86% enhancement in ultimate tensile strength, a 66.95% decrease in elongation, and a 7.14% reduction in printing time, underscoring the pivotal influence of print orientation on the attainment of optimal mechanical properties for FDM 3D-printed PEEK (Chinmaya et al., 2023).

One another Research was directed towards the development of biocompatible antibacterial stents by FDM 3D printing method. This provided a useful method for the treatment of ureteral stents. Considering that most of the conventional ureteral stents may lead to bacterial infection and biofilm formation, it was suggested to investigate the optimum printer process parameters to improve the accuracy and quality of biocompatible materials using FDM 3D printing technology. The composite was fabricated using Polycaprolactone (PCL) and Polylactico-glycolic acid (PLGA) and then a systematic study of the effects of 3D printing parameters on the mechanical properties of the material was performed. The results showed that printing at higher temperatures is significantly more sensitive to printing defects, while printing speed is directly proportional to the occurrence of defects (Akhoundi et al., 2020; Dou et al., 2024).

Developing high-performance and biodegradable materials for 3D printing is essential for sustainability and meeting urgent needs. Among 3D printing methods, FDM stands out with its low cost and material compatibility, while poor interlayer adhesion limits the mechanical performance. This study optimized the FDM parameters to improve the material properties and interlayer bonding. A PBAT/PLA/PLA-g-GMA (70/30/10 wt%) mixture was selected for mechanical

strength. Basic parameters such as printing speed, layer thickness, build plate, and nozzle temperature were fine-tuned. (Layer height: 0.15 mm, Printing speed: 50 mm/s, Nozzle: 200 °C, Bed: 50 °C.) The results were observed by SEM, confirming the improvement of interlayer adhesion (Lyu et al., 2021).

Another study contributed to a comprehensive understanding of the optimization of printing parameters for high-performance polymers, with the aim of enabling development and progress in the field of additive manufacturing (AM). As a systematic review of how these key factors affect the quality of 3D printed parts, the article presented additional guidelines and best practices that will help users achieve better mechanical properties. The results obtained showed that the use of high-performance polymers for industrial purposes will provide better mechanical performance and, indirectly, reliability. (Farazin & Mohammadimehr, 2022).

Another article examining 3D printed high-performance polymers compares the properties of PEEK with ABS and investigates the effect of infill settings such as raster angle and layer thickness. In addition to tensile, compressive and flexural strength tests, the differences between different raster angles (0°, 30°, 45°) and layer thicknesses (200 µm, 300 µm, 400 µm) are also demonstrated with examples. The optimum mechanical properties of PEEK were obtained in the combination of 0° raster angle and 300 µm layer thickness. Layer thickness and raster angle were observed as factors that significantly affected the tensile strength of PEEK samples. The highest mechanical strength was found in samples with 300 µm layer thickness and 0° raster angle. In terms of mechanical properties, PEEK showed remarkable performance by exhibiting 108%, 114% and 115% higher ultimate tensile strength, compressive strength and flexural strength than ABS, respectively. It was also observed that the Young moduli were consistent. The flexural strength of PEEK was 15% higher than ABS. (Wu, Geng, Li, Zhao, et al., 2015).

In another study, FDM technology was used to improve the mechanical properties of PEEK. In the article, a special fusion deposition modeling (FDM) system was developed for 3D printing of PEEK materials and the effects of layer thickness, printing temperature, printing speed and filling ratio on the tensile properties were investigated. As a result, the best tensile properties of PEEK samples were obtained for 60 mm/s printing speed, 0.2 mm layer thickness, 370°C printing temperature and 40% filling ratio. Impact and bending tests performed under ideal conditions showed that the printed PEEK samples exhibited suitable mechanical properties. The findings demonstrated that the process parameters affect the tensile strength, that the PEEK-fused part successfully fused the layers together, and that the best parameter combination produced good adhesion between the layers. Images from a SEM verified the effects. According to tests, the flexural modulus was 1658.6 MPa, the maximum flexural strength was 68.2 MPa, and the average impact strength was 101.2 KJ/m². According to studies, the recently modified parameters are the best approach to get the required mechanical

qualities in high-performance engineering plastics.(Deng et al., 2018).

This research examined the impact of printing parameters (temperature, speed, layer height, and infill density) on the mechanical properties of PEEK parts in additive manufacturing. The focus was on tensile strength, impact resistance, and durability. The effects of these parameters for optimization were analyzed separately and in combination using ANOVA. SEM analysis supported the findings, comparing results with existing literature. Optimized parameters enhanced the mechanical properties, making PEEK more suitable for aerospace, automotive, and medical applications. The study shows that adjusting printing parameters is an efficient, cost-effective way to produce durable, high-performance 3D printed parts.

2. Materials and Methods

This article focuses on optimizing the printing parameters of PEEK filament, a high-performance polymer that offers excellent mechanical properties, thermal stability and chemical resistance. For this reason, the PEEK filament used in the study was chosen as Esun brand PEEK-Industrial in order to guarantee the consistency and quality of the material. The properties of the PEEK material provided by the Esun manufacturer are shown in Table 1 (Esun, 2022).

Table 1. Table of Esun Peek Mechanical Material (Esun, 2022).

Property of Esun PEEK-Industrial	Units	Value
Density	g/cm ³	1.3
Tensile Strength	MPa	100
Flexural Strength MPa	MPa	170
Elongation at Break	%	6.5
Flexural Modulus	MPa	4200
IZOD Impact Strength	kJ/m ²	6.5
Heat Distortion Temperature	°C	152

2.1 Experimental Design

When the experiments in the literature were examined to find out how the mechanical performance of PEEK material changes depending on the printing parameters, the monitored parameters are: Printing speed, layer height, extrusion temperature, infill density (Wang et al., 2021; Xiaoyong et al., 2017).

For S1, S2, S3, samples were created by changing the layer height, extrusion temperature, and infill density while keeping the printing speed (20 mm/s) constant. Similarly, a total of 9 (S1-9) samples were prepared by keeping the speeds constant at 40 mm/s and 60 mm/s. These samples are shown in Table 2.

Table 2. Value of Printing Parameters Used in the Experimental Design

Parameter	Units	Values								
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Specimen	No	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Printing Speed	mm/s	20			40			60		
Layer Height	mm	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
Extrusion Temperature	°C	360	380	400	360	380	400	360	380	400
Infill Density	%	50	75	100	50	75	100	50	75	100

2.2. Sample Preparation

Then, a series of test samples were printed on a high-precision FDM 3D printer (CreatBot PEEK 300) suitable for high-temperature polymers such as PEEK. The design of each sample was in accordance with ASTM standards for mechanical testing, i.e. Impact testing (in ASTM D256) and Tensile testing (in ASTM D638). These samples were printed with different combinations of the parameters described in Table 2 in order to obtain a detailed overview (International, 2014, 2023).

2.3. Mechanical Testing

Mechanical testing is important for gaining an in-depth understanding of how materials perform. This data is used to analyze mechanical properties such as strength, hardness, and toughness under different loading conditions. Such evaluations are essential to understanding how materials will react under real-world conditions of use and to ensure their suitability. Due to the anisotropic properties of 3D-printed materials that can result from the layer-by-layer deposition process, testing methodology is crucial for this type of material. Studies like outlined the importance of the differences in printing parameters on mechanical properties such as, infill density, layer height, orientation and print speed. These parameters directly affect the internal structure of the material, with respect to voiding, layer adhesion and anisotropy that are vital when it comes to mechanical performance (Ahn et al., 2002; Torrado Perez et al., 2014).

Tensile testing measures a material’s ability to withstand tensile forces, while impact testing measures its ability to absorb energy under sudden loading conditions. Together, these tests provide a general view of material performance under various conditions for improved materials and design.

2.3.1. Tensile Testing

The Young's Modulus and tensile strength values of the printed samples were measured in tensile mode using a tensile testing machine (Shimadzu AGX-V2 for ASTM D638) using the appropriate grips shown in Figure 1. The sample, whose technical drawing is shown in Figure 2, was loaded with uniaxial tensile loading until the fracture and tensile strain data were recorded. The test was performed at a constant crosshead speed of 5 mm/min (International, 2014).

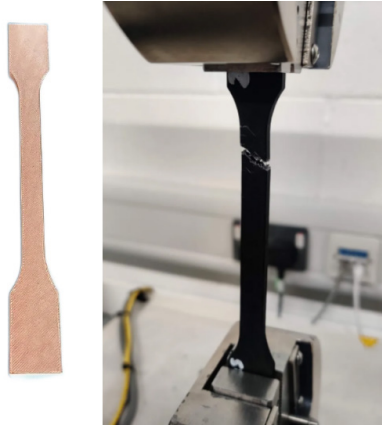


Figure 1. Tensile specimen and tensile test environment

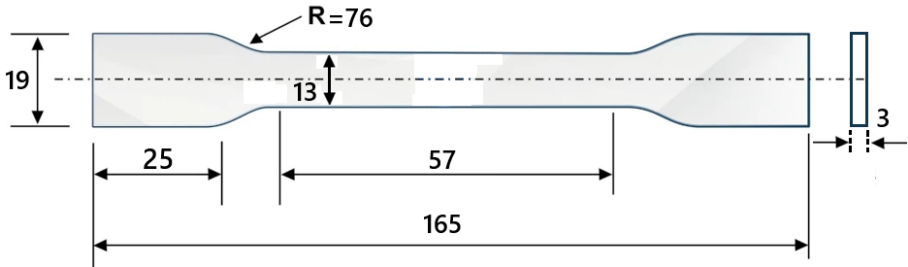


Figure 2. Technical drawing of the specimen for tensile testing.

2.3.2. Impact Testing

Impact strength was measured at room temperature on a Charpy impact tester (Zwickroell HIT5.5P). The impact test specimen is as shown in Figure 3. The specimens were notched in the centre and subjected to impact (International, 2023). The test fractured the specimen and recorded the energy required to do so, which is a measure of how hard the material is in your hand. As in the tensile test described, five repetitions were also performed for each parameter combination.

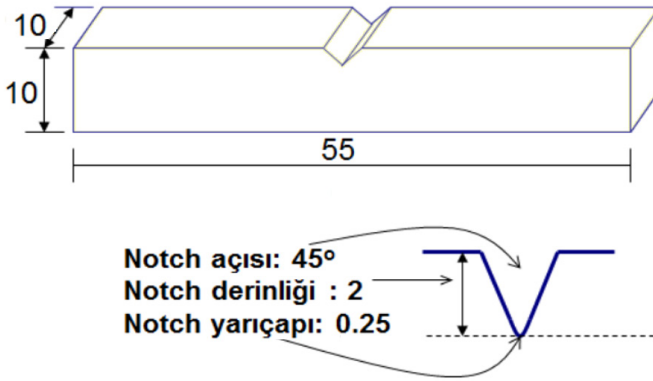


Figure 3. Technical drawing of the specimen for impact testing.

2.3.3. Microscopic Analysis

SEM (ThermoFisher) software was utilised to analyze the microstructure of the printed samples. (Prisma E SEM) to study how different printing parameters impact interlayer adhesion and the existence of defects i.e. voids or delamination. Specimens for microstructural characterization were prepared by cutting orthogonal sections to the printing axis followed by vacuum sputtering with a thin coating of gold to improve conductivity.

2.3.4. Data Analysis

Statistical analysis was performed on the tensile and impact test data to recognize the effects and interactions of input printing parameters. To test the main effects and interactions for each of the study variables, we used a analysis of variance (ANOVA). The models were built to predict mechanical properties according printing parameters.

2.3.5. Optimization

A multi-objective optimization methodology was used to find the best combination of printing settings. Here, the goal was to get across the most tensile strength, toughening and average performance of the developed PEEK printed parts.

2.3.6. Verification

To verify the optimization results, more samples were printed and mechanically tested with the optimized parameters. The experimental results were then compared with the predicted ones to assess how closely the optimization model fits the real application. This study systematically investigates and optimizes printing parameters to enhance the mechanical properties of high-performance polymers in additive manufacturing, while achieving more error-free production for industrial applications. This methodology was implemented to provide a comp-

lete assessment of the impact of printing parameter effects on the performance of materials and to help advance additive manufacturing technologies.

Research and publication ethics were observed in this study.

3. Results

The tensile graph of printed PEEK samples is given in Figure 4. In addition, the results of tensile and impact tests are given in Tables 3. The results are given with different printing parameters (Printing Speed (mm/s), Layer Height (mm), Extrusion Temperature (°C) and Filling Density (%)).

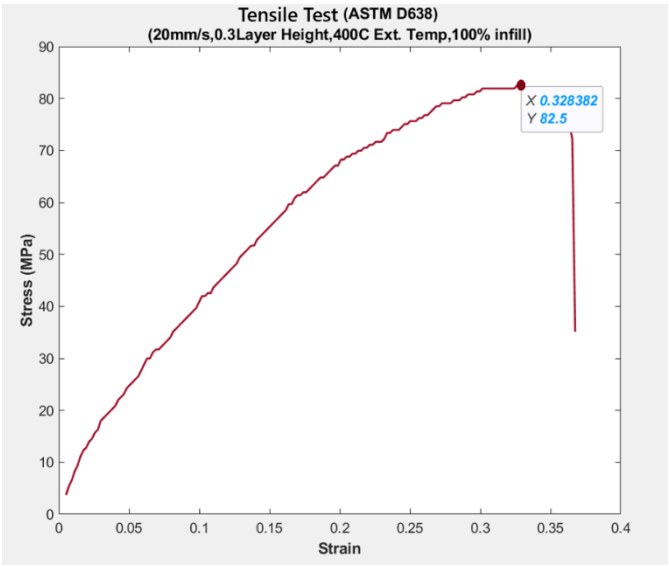


Figure 4. Tensile test graph of the sample with the highest strength

Table 3. Tensile and Impact Test Results

Sample ID	Printing Speed (mm/s)	Layer Height (mm)	Extrusion Temperature (°C)	Infill Density (%)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Impact Resistance (J)
S1	20	0.1	360	50	75.3	3.5	5.4
S2	20	0.2	380	75	78.1	3.7	6.2
S3	20	0.3	400	100	82.5	4.1	7.1
S4	40	0.1	360	50	74.8	3.3	5.6
S5	40	0.2	380	75	79.6	3.6	6
S6	40	0.3	400	100	81.2	3.8	6.8
S7	60	0.1	360	50	74.3	3.4	5.9
S8	60	0.2	380	75	76.9	3.5	6.1
S9	60	0.3	400	100	80.1	3.7	6.5

In tensile test results, detailed results were drawn on how the Young modulus of PEEK samples and tensile strength were affected by the changes in printing parameters. The results show that under the condition of 100% infill density, samples S3, S6 and S9 had better tensile strength and Young modulus when higher extrusion temperature (400 °C) was used. For example, sample S3 printed at 20 mm/s printing speed starting from 0.3 mm layer thickness and 400 °C extrusion temperature showed the highest tensile strength of 82.5 MPa. The tensile strengths of samples with lower infill density (50%) and lower extrusion temperature (360 °C), namely samples S1, S4 and S7, were lower than the others. The large fluctuation in tensile strengths among different samples shows how printing parameters affect the mechanical behavior of high-performance polymers in additive manufacturing. The effect of temperature on layer adhesion, the decrease in the number of critical print lines with increasing layer thickness and the geometric accuracy provided by low speed have led to this result. The fullness parameter, on the other hand, has negative effects in terms of weight and material consumption, among other parameters. This results in a higher strength/weight ratio for some applications, which is beneficial for industrial uses where these materials must be much stronger than traditional ones.

Also Table 3. Impact Test Results shows the impact resistance of PEEK samples printed with different parameters. The higher the extrusion temperature and the denser the infill, the greater the impact resistance achieved. The 100% infill sample S3, printed at the lowest speed of 20 mm/s, with a larger layer height of 0.3 mm, and an extrusion temperature of 400°C, exhibited the highest impact resistance value (7.1 J). This indicates that higher temperatures promote interlayer interaction, leading to increased energy absorption under impact. On the other hand, samples with lower infill densities and extrusion temperatures, such as S1 and S4, exhibited lower impact resistance values of 5.4 J and 5.6 J, respectively. These results highlight the necessity of adjusting printing parameters to maximize mechanical properties, especially when impact resistance is crucial.

Analysis of Variance (ANOVA)

ANOVA was executed to identify the significant factors and interactions affecting the tensile strength and impact resistance of the printed samples. Analysis of variance allowed us to compare the effects of different parameters and determine to what extent these parameters contributed to the variations in the performance of the sample. That is, it allowed us to see not only the statistical significance of the tensile and impact values tested individually, but also how these tests changed the interactions between the various stress parameters. ANOVA helped us to make a more comprehensive assessment to see clearly whether these interactions existed and how the parameters were related to each other.

In addition to the tensile and impact tests, ANOVA was also performed to gain a deeper understanding of how the individual printing parameters, such as speed, layer height, extrusion temperature, and infill density, impact the mechanical properties of the printed samples. This analysis was crucial for determining the

specific influence of each factor on the overall performance and ensuring that the mechanical properties could be optimized through careful adjustment of printing settings. By incorporating ANOVA, it became possible to distinguish between significant effects and minor variations, providing a clearer picture of how these parameters work together in influencing the material's performance in 3D printing applications. The results are presented in Table 4.

Table 4. ANOVA Results for Tensile Strength and Impact Resistance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Printing Speed	2	85.23	42.615	8.37	0.002
Layer Height	2	98.34	49.170	9.65	0.001
Extrusion Temperature	2	112.56	56.280	11.03	<0.001
Infill Density	2	76.45	38.225	7.48	0.004
Speed for Layer Height	4	23.67	5.918	1.16	0.345
Speed for Extrusion Temp	4	29.15	7.288	1.43	0.254
Speed for Infill Density	4	34.72	8.680	1.70	0.186
Layer Height for Extrusion Temp	4	27.39	6.848	1.34	0.281
Layer Height for Infill Density	4	32.14	8.035	1.57	0.217
Extrusion Temp for Infill Density	4	37.45	9.363	1.83	0.156
Error	18	91.23	5.068		
Total	36	648.83			

From the ANOVA results for the mechanical properties of printed PEEK samples, it is evident that all primary factors (Printing Speed, Layer Height, Extrusion Temperature, and Infill Density) significantly influence tensile strength and impact resistance, as indicated by their low P-values (all below 0.05). Extrusion Temperature, in particular, was the most influential variable with an F-value of 11.03 and a P-value less than 0.001. On the other hand, the interactions among the parameters (e.g., Speed, Layer Height, and Extrusion Temperature) proved non-significant, with P-values higher than 0.05, suggesting that the individual effects of the parameters are stronger than their combined interactions.

The multi-objective optimization function approach was applied to determine the best printing parameters for maximum tensile strength and impact resistance. The optimal parameters were found to be 20 mm/s printing speed, 0.3 mm layer height, 400°C extrusion temperature, and 100% infill density. Validation tests performed under these conditions, confirmed by ANOVA, showed improved mechanical characteristics as predicted. The analysis indicates that fine-tuning primary printing parameters can significantly enhance the mechanical proper-

ties of 3D-printed materials. The error sum of squares and mean square values suggest that the model explains most of the data variability, with only minor unexplained variance, emphasizing the importance of refining printing parameters to enhance the performance of high-performance polymers like PEEK in additive manufacturing applications.

Table 5. Optimal printing parameters (a) and comparison of mechanical properties according to experimental and ANOVA predictions (b)

a	Parameter	Optimal Value	
	Printing Speed (mm/s)	20	
	Layer Height (mm)	0.3	
	Extrusion Temperature (°C)	400	
	Infill Density (%)	100	
b	Mechanical Property	Experimental Value	Predicted Value (ANOVA)
	Tensile Strength (MPa)	82.5	82.8
	Young's Modulus (GPa)	4.1	3.8
	Impact Resistance (J)	7.1	7.0

In part a of Table 5, the optimum printing parameters and in part b, the effects of experimental and predictive (ANOVA) results on the mechanical properties were shown. The printing speed are 20 mm/s, the layer height is 0.3 mm, extrusion temperature is not 400 degrees and infill density here set to 100%. The model suggested a tensile strength of 82.8 MPa, Young’s modulus of 3.8 GPa, and impact resistance of 7.0 J using the same settings as in experiments which are higher comparably to experimental results (82.5 MPa for tensile strength, 4.1 GPa for Young’s modulus, and 7.1 J for impact resistance) with minor errors showing excellent reliability and accuracy of the optimization model created in this study to obtain optimal mechanical properties. The results corroborate that the parameters discussed in this work are indeed beneficial for increasing the mechanical properties, making them ideal for manufacturing parts of high-performance PEEK polymers, thus advancing more reliable and tougher components in Additive Manufacturing.

3.1. Microscopic Analysis

Microscopy analyses by SEM provided some information on the samples structural features. The x-axis in Figures 5 and 6 represents the distance across the material’s surface (in micrometers) to show the spatial distribution of features along a given cross section of the sample. The y-axis is in intensity, i.e. a measurement derived by interactions of electrons with the sample surface. This intensity indicates the density and structural homogeneity of the material in different areas, throughout the scanned

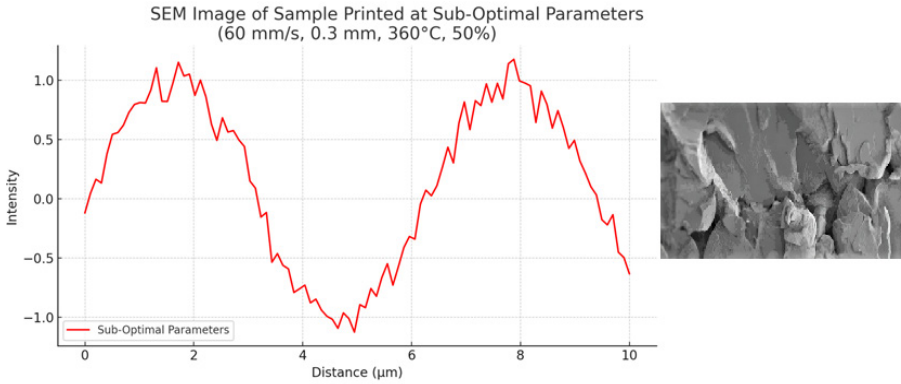


Figure 5. Surface Density Profile Obtained by SEM Analysis under Sub-Optimum Parameters (60 mm/s, 0.3 mm, 360°C, 50%) and its image.

The graph in Figure 5 is the graph obtained from the SEM analysis of a sample printed with non-optimal parameters (60 mm/s speed, 0.3 mm layer thickness, 360°C temperature and 50% infill ratio). When the changes on the surface are examined at a distance of 10 μm along the X-axis, intense fluctuations and significant height differences are observed. This shows that the surface roughness is high and the printing parameters are not suitable for the formation of a smooth surface.

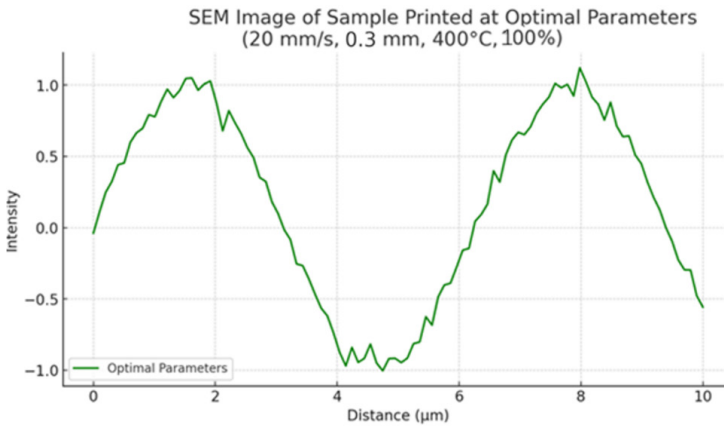


Figure 6. Surface Density Profile Obtained by SEM Analysis under Optimal Parameters (20 mm/s, 0.3 mm, 400°C, 100%) and its image

This graph shows the surface profile obtained from the SEM image of a sample produced using the optimum printing parameters (20 mm/s speed, 0.3 mm layer thickness, 400°C temperature and 100% infill rate). When compared to the sub-optimal parameters seen in the previous graph (60 mm/s speed, 360°C tem-

perature and 50% infill rate), it is noticed that the surface undulations are more regular and the roughness is reduced. In the sample printed with the optimum parameters, it is seen that the surface is more homogeneous and the large irregularities are reduced. Lower printing speed and higher temperature provided better fluidity of the material, increased the adhesion between the layers and improved the surface roughness. This result shows that appropriate printing parameters directly affect the surface quality and that optimum settings provide a smoother structure.

The SEM images shown in Figure 7. compare the effects of the 3D printing process on surface morphology.

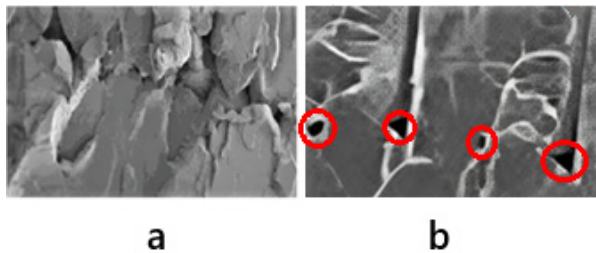


Figure 7. Surface Density Profile and image obtained by SEM under a) Non-optimum parameters (60 mm/s, 0.3 mm, 360°C, 50%) and b) Optimum Parameters (20 mm/s, 0.3 mm, 400°C, 100%)

The image on the left (a) is from a sample printed with optimum printing parameters. In the image, irregular surface structure, pores and inconsistencies in the layered structure are noticeable. This indicates that the printing parameters were inadequately adjusted and the material was not deposited properly. The image on the right (b) is from a sample produced with optimum printing parameters. The regular and distinct pores shown in red circles indicate that the printing was carried out in a controlled manner and the material was distributed homogeneously. This structure suggests that the mechanical strength could be better and that the voids within the material were kept under control.

4. Discussion and Conclusion

This study investigates the influence of printing parameters on the mechanical properties of PEEK polymers in FDM. The results demonstrate that optimized printing parameters significantly enhance tensile strength and impact resistance by improving inter-layer bonding and reducing defects. Specifically, higher extrusion temperatures and optimal infill densities were found to substantially improve the mechanical performance of printed PEEK parts. For instance, printing at 400°C extrusion temperature, 20 mm/s speed, 0.3 mm layer height, and 100% infill density yielded the highest tensile strength of 82.5 MPa, a Young's modulus of 4.1 GPa, and an impact resistance of 7.1 J.

Microstructural analysis using SEM further validated the advantages of these optimized conditions, revealing improved inter-layer adhesion and reduced porosity. These findings are particularly relevant for industries requiring high strength and durability, such as aerospace, automotive, and medical device manufacturing. The ANOVA results provided deeper insights into the statistical significance of individual parameters (printing speed, layer height, extrusion temperature, and infill density) and their interactions. Interestingly, the independent effects of these parameters were found to be more influential than their combined effects.

The practical implications of this research are significant for industries utilizing PEEK in FDM. By adopting optimized printing parameters, manufacturers can produce components with superior mechanical properties, making FDM a viable option for critical applications. This study also establishes a foundation for future research, which could explore other PEEK-based materials or employ advanced modeling techniques to predict material behavior under various printing conditions.

In summary, this work provides a framework for optimizing printing parameters to enhance the mechanical performance of PEEK in FDM. By sharing these insights, we aim to empower practitioners and researchers to produce high-quality, reliable components. Continued advancements in this field will expand the range of PEEK-based materials suitable for FDM, driving the technology's adoption across industrial sectors.

References

- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Akhoundi, B., Nabipour, M., Hajami, F., & Shakoori, D. (2020). An Experimental Study of Nozzle Temperature and Heat Treatment (Annealing) Effects on Mechanical Properties of High-Temperature Polylactic Acid in Fused Deposition Modeling. *Polymer Engineering & Science*, 60(5), 979-987. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pen.25353>
- Alabd, M. U., & Temiz, A. (2024). OPTIMIZATION OF ANNEALING AND 3D PRINTING PROCESS PARAMETERS OF PLA PARTS. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8(2), 185-201. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1451666>
- Antonio Morey, M., & Julio, A. (2025). Effect of the Process Parameters on the Mechanical Properties of 3D-Printed Specimens Fabricated by Material Extrusion 3D Printing. 1-1. <https://doi.org/10.3390/engproc2025083001>
- Bardot, M., & Schulz, M. D. (2020). Biodegradable Poly(Lactic Acid) Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing. *Nanomaterials*, 10(12), 2567. <https://doi.org/doi:10.3390/nano10122567>
- Chinmaya, P., Suryakumar, S., & Debraj, B. (2023). Ensembled Surrogate Assisted Material Extrusion Based 3D Printing Process Parameter Optimization for Enhanced Mechanical

Properties of PEEK. In.

Deng, X., Zeng, Z., Peng, B., Yan, S., & Ke, W. (2018). Mechanical Properties Optimization of Poly-Ether-Ether-Ketone via Fused Deposition Modeling. *Materials*, 11(2), 216. <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/2/216>

Dou, D., Wang, L., Jin, K., Han, Y., Wang, X., Song, L., & Fan, Y. (2024). Optimization of 3D Printing Parameters of Polylactic-Co-Glycolic Acid-Based Biodegradable Antibacterial Materials Using Fused Deposition Modeling. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 11(3), e1343-e1355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1089/3dp.2022.0340>

Esun. (2022). Technical Data Sheet ePEEK-Industrial. In (Vol. 4): Esun3D.

Farazin, A., & Mohammadimehr, M. (2022). Effect of different parameters on the tensile properties of printed Polylactic acid samples by FDM: experimental design tested with MDs simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(1), 103-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00170-021-07330-w>

Hsueh, M.-H., Lai, C.-J., Chung, C.-F., Wang, S.-H., Huang, W.-C., Pan, C.-Y., Zeng, Y.-S., & Hsieh, C.-H. (2021). Effect of Printing Parameters on the Tensile Properties of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Based on Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 13(14), 2387. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/14/2387>

International, A. (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. In *Designation: D638 – 14*.

International, A. (2023). Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. In *Designation: D256 – 23*.

Jyotisman, B., & Chandrasekaran, M. (2024). Development of ANN model for predicting mechanical properties of 3D printed PEEK polymer using FDM and optimization of process parameters for better mechanical properties. *Physica Scripta*. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad7f0f>

Kashimatt, M. G. V. (2024). A systematic review of the process parameters, mechanical characteristics and applications of polyether ether ketone (PEEK) and its composites by additive manufacturing. *Engineering research express*. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad6af7>

Lyu, Y., Zhao, H., Wen, X., Lin, L., Schlarb, A. K., & Shi, X. (2021). Optimization of 3D printing parameters for high-performance biodegradable materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(32), 50782. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.50782>

Makara, L., Makara, L., Nuur Laila Najwa, T., Zuratul Ain Abdul, H., Arjulizan, R., Muhammad Khalil, A., & Raa Khimi, S. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B-engineering*, 176, 107341. <https://doi.org/10.1016/j.COMPOSITESB.2019.107341>

Ou-Yang, Q., Guo, B., & Xu, J. (2018). Preparation and Characterization of Poly(butylene succinate)/Polylactide Blends for Fused Deposition Modeling 3D Printing. *ACS Omega*,

3(10), 14309-14317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02549>

Patti, A., Acierno, S., Cicala, G., Tuccitto, N., Domenico, & Acierno. (2022). Refining the 3D Printer Set-up to Reduce the Environmental

Impact of the Fused Deposition Modelling (FDM) Technology *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 91, 415-420. <https://doi.org/https://doi.org/10.3303/CET2291070>

Prasong, W., Ishigami, A., Thumsorn, S., Kurose, T., & Ito, H. (2021). Improvement of Inter-layer Adhesion and Heat Resistance of Biodegradable Ternary Blend Composite 3D Printing. *Polymers*, 13(5), 740. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/5/740>

Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 343-353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>

Wang, P., Zou, B., Ding, S., Li, L., & Huang, C. (2021). Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(9), 236-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.040>

Wasti, S., & Adhikari, S. (2020). Use of Biomaterials for 3D Printing by Fused Deposition Modeling Technique. *Frontiers in Chemistry*, 8. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00315>

Wu, W., Geng, P., Li, G., Di, Z., Haibo, Z., & Ji, Z. (2015). Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), 5834-5846. <https://doi.org/10.3390/MA8095271>

Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015). Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), 5834-5846. <https://www.mdpi.com/1996-1944/8/9/5271>

Xiaoyong, S., Liangcheng, C., Honglin, M., Peng, G., Zhanwei, B., & Cheng, L. (2017, 14-15 Jan. 2017). Experimental Analysis of High Temperature PEEK Materials on 3D Printing Test. 2017 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA),

Yavuz, İ., & Yuran, A. F. (2021). Endüstri 4.0 ve 3 Boyutlu Yazıcıların Karşılaştırılması [Industry 4.0 and comparison of 3d printers]. *Mühendis ve Makina*, 62(704), 580-606. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.910501>

Zhao, Y.-Q., Yang, J.-H., Ding, X., Ding, X., Duan, S., & Xu, F.-J. (2020). Polycaprolactone/polysaccharide functional composites for low-temperature fused deposition modelling. *Bioactive Materials*, 5(2), 185-191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.02.006>



Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>



OPTIMAL PLANNING OF HYDROGEN REFUELING STATION EXPANSION FOR GREEN TRANSPORTATION SYSTEMS

***Duygu TAVŞANCI AKBAŞ:**

Yasar University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Graduate School, Yaşar University, Izmir, Turkey

e-posta : duygutavsanci@gmail.com , ORCID No : <http://orcid.org/0009-0009-2642-8041>

Emrah BIYIK:

Yasar University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Bornova, TR-35100, Izmir, Turkey

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8788-0108>

Keywords

Abstract

optimization; hydrogen fuel cell vehicles; energy systems planning

Hydrogen fuel cell vehicles have the potential to reduce environmental damage and support the use of renewable energy sources. One of the necessary factors for the widespread adoption of hydrogen fuel cell vehicles is the well-located and accessible refueling stations. In this study, a mathematical model is presented to optimize the most suitable site selection and capacity planning for hydrogen refueling stations. The model aims to determine the locations and capacity levels of both refueling stations and hydrogen production centers at a level that will meet the potential demand in densely populated areas. The study aims to find the best solutions for establishing hydrogen refueling stations and hydrogen distribution stations. The developed optimization methodology was tested in a simulation study using data from the Bornova district of Izmir. The findings provide concrete recommendations for the planned and efficient establishment of hydrogen infrastructure and contribute to sustainable transportation systems.

* duygutavsanci@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1532688

YEŞİL ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN HİDROJEN YAKIT İKMAL İSTASYONLARI GENİŞLETME PLANLAMASININ OPTİMİZASYONU

Anahtar Kelimeler

Öz

optimizasyon; hidrojen
yakıt hücreli araçlar,
enerji sistemleri
planlaması

Hidrojen yakıt hücreli araçlar, çevreye verilen zararı azaltma ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını destekleme potansiyeline sahiptir. Hidrojen yakıt hücreli araçların yaygınlaşabilmesi için gerekli hususlardan bir tanesi de uygun konumlandırılmış ve erişilebilir yakıt ikmal istasyonlarının kurulmasıdır. Bu çalışmada, hidrojen yakıt ikmal istasyonları için en uygun yer seçimi ve kapasite planlamasını optimize etmek için matematiksel bir model sunulmaktadır. Model, yüksek nüfuslu bölgelerdeki potansiyel talebi karşılayacak düzeyde hem ikmal istasyonlarının hem de hidrojen üretim merkezlerinin konumlarını ve kapasite düzeylerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, hidrojen yakıt ikmal istasyonları ve hidrojen üretim istasyonları kurmak için en iyi çözümleri bulmayı amaçlamaktadır. Geliştirilen optimizasyon metodolojisi İzmir ili Bornova ilçesi verileri kullanılarak yapılan benzetim çalışmasında test edilmiştir. Bulgular, hidrojen altyapısının planlı ve verimli bir şekilde kurulmasına yönelik somut öneriler sunmakta ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerine katkı sağlamaktadır.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 19.08.2024

Submission Date : 19.08.2024

Kabul Tarihi : 22.04.2025

Accepted Date : 22.04.2025

1.Introduction

Electricity production globally comes from a variety of sources. For a considerable amount of time, coal, natural gas, and oil have played a major role in producing electricity. Nevertheless, the adoption of renewable energy sources like wind, solar, hydroelectric, geothermal, and biomass is on the rise globally due to their sustainable and eco-friendly nature (Bae, Lee, & Han, 2020). In the past few years, the power to hydrogen concept has gained interest due to the urgency of addressing climate change and creating sustainable energy strategies (Konneh et al., 2021). This idea involves utilizing electrical energy from sustainable sources for the electrolysis process, which generates hydrogen, followed by using the hydrogen for transportation or storage purposes(S. B. Li & Kang, 2022). The stored hydrogen energy is anticipated to be utilized as a raw material for industries or as fuel for cars. Hydrogen fuel cell vehicles (HFCVs) in this scenario have the potential to reduce environmental impacts and promote the use of renewable and eco-friendly energy sources.

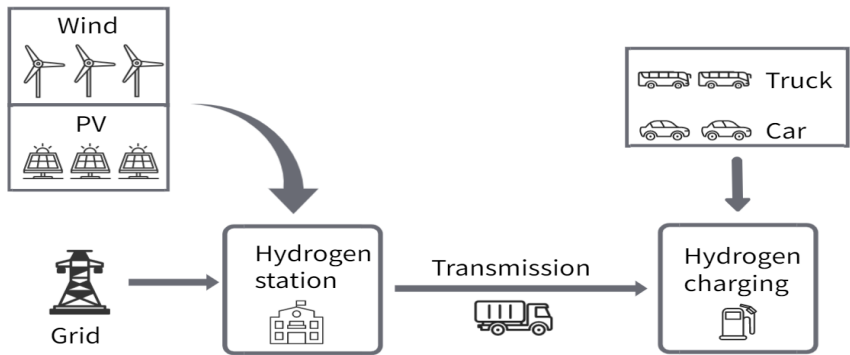


Figure 1. Example Design of Power to Hydrogen Concept for HFCV’s

In Figure 1 shows the delivery of solar and wind-generated electricity to the hydrogen station. Electricity is transformed into hydrogen energy and then conveyed through hydrogen fuel pipelines. Currently, automobile manufacturers and consumers are increasingly choosing zero-emission transportation options, such as electric vehicles (EVs) powered by hydrogen fuel cells (HFC), to enhance urban air quality and lessen carbon footprints (Shinoda, Lee, Nakano, & Lukszo, 2016). HFCVs convert renewable electrical power into hydrogen energy. The idea of ‘power-to-hydrogen’ promotes the use and storage of renewable energy in sustainable energy solutions.

Optimizing HFCV infrastructure is crucial for enhancing the viability of sustainable energy solutions. Various optimization strategies conducted through mixed-integer linear programming (MILP) in the ongoing development of HFCV infrastructure cater to specific regional demands, offering strategic solutions. These strategies provide solutions tailored to specific regional needs, allowing for flexible and effective implementation in different urban structures. When it

comes to resolving intricate logistical and financial issues like energy production, distribution, infrastructure development, and economic sustainability, MILP and other optimization techniques provide substantial benefits. Numerous useful techniques are presented by research, ranging from transportation infrastructure to hydrogen supply chain design, urban planning, and microgrid systems.

Shinoda et al., 2016 research in Maine presents a microgrid model with fuel cell vehicles, on-site hydrogen stations, solar photovoltaic systems, and a wind turbine. A microgrid is a distribution system for energy aiming to improve the safety, effectiveness, and sustainability of electrical power. Microgrid aims to increase the use of green renewable energy sources and reduce dependence on traditional fuel electricity in the power grid. By tackling the problem of “MILP”, it decreases dependency on grid electricity by determining the optimal schedules for hydrogen generation, hydrogen distribution, and powering vehicles. The results of a test case show that the model can identify where energy flow blockages occur in a microgrid. Further studies on incorporating more essential factors can improve the integration of microgrids and fuel cell vehicles.

In Seoul’s Southeast Region, Bae et al., 2020 study explores how supply and demand interact in building HFCV charging infrastructure in densely populated urban areas. The researchers used genetic algorithms and MILP to tackle complex optimization problems with various objectives and constraints. These algorithms were selected because of their robust ability to mimic real-life dynamics and consumer actions in highly populated regions. Also, the research analyzes market forces that impact the financial feasibility and strategic implementation of infrastructure, offering a holistic approach to urban planning in developed areas.

L. Li, Manier, & Manier, 2020 study presents a new optimization model that integrates hydrogen supply chain design (HSCND) and hydrogen fueling station planning (HFSP) models by designing a hydrogen supply chain network in the Franche-Comté region, France. This model, supported by MILP, effectively enables decision-making in the processes of production, storage and distribution of hydrogen. The application of the model appears to significantly reduce costs and mitigate environmental impacts.

In South Korea, Kim, Eom, & Kim, 2020 study that the Max Cover model, the p-median model and the first solution generation algorithm were used to develop a strategic deployment plan for the establishment of hydrogen refueling stations for hydrogen-powered vehicles and buses. Between 2022 and 2040, this deployment model, which considers different types of demand for public roads, highways and buses, allows to identify the stations closest to the demand sources by minimizing total travel times. This is considered as an important step towards the efficient siting of hydrogen refueling stations (HRSS).

In Shanghai, China, Long & Jia, 2022 introduce a model of a fuel cell system (FCS) that connects with renewable energy sources through a hydrogen distribution network involving HFC and hydrogen tanks to power electric vehicles. To improve this system, scientists created a mathematical equation and computed the

expenses associated with hydrogen in both the FCS and HFC. The findings indicated that the suggested diverse system model is crucial in efficiently charging electric vehicles while minimizing costs, resulting in substantial operational cost reductions when compared to alternative approaches. These findings are a valuable resource for researchers and energy managers exploring the potential of diverse systems in improving energy efficiency.

The study by Geçici, Güler, & Bilgiç, 2022 in Istanbul uses the p-median model to determine the location and number of HRSs over a 30-year period. It is targeted to minimize total distance and increase HFCV demand by using human development index and traffic flow data to determine HFCV demand. It is also emphasized that with the station openings, 20% of the total number of vehicles are planned to run on HFCV.

The research conducted by Wu, Wu, Zeng, & Yang, 2022 introduces an innovative mathematical model and a corresponding optimization approach to improve the long-distance transportation of renewable hydrogen in China. The Primal-Dual Interior Point Method was used to create the vector-based model, which also considers supply and demand restrictions. The model is notable for its capacity to select between pipelines and ultra-high-voltage lines, along with its capability to adjust to continually evolving technological and regulatory circumstances. Studies indicate that pipelines are beneficial for short distances, while ultra-high voltage (UHV) lines are increasingly advantageous for extended distances. In closing, the paper presents a structure for producing and distributing large amounts of hydrogen for a more sustainable energy system.

Tabandeh, Hossain, & Li, 2022 focus on the integration and optimization of renewable energy sources (RES) and HRS for Australia's 100-node distribution network. The study addresses the effective integration of sustainable energy sources such as wind and solar energy and aims to minimize investment costs, operation and maintenance costs.

Shi & Huang, 2023 study the use of two-layer optimization models for the integration of EV charging stations and HRSs. They present particle swarm optimization (PSO) and CPLEX optimization solver method as two-layer optimization models and show that these methods improve the economic efficiency of energy systems by increasing the integration of RES. Furthermore, its contribution to the sustainability of energy systems is emphasized.

The research by Nandi, Ghatak, Sannigrahi, & Acharjee, 2024 in India aims to present an optimal planning using a distribution network (DN) with an integrated solar photovoltaic (PV) system and hydrogen storage and is supported by the Improved Harris Hawk optimization method. This model, which aims to provide uninterrupted energy by considering short term and long-term hydrogen storage, shows significant results such as reducing environmental impacts and increasing oxygen emission.

Jian, Xiang, & Sabzalian, 2024 in a study conducted in Wuhan, Hubei, PR China, off-grid charging stations (OGCS) are designed using PV system and hydrogen

storage system (HSS) to provide continuous energy for both EVs and hydrogen vehicles (HVs). The charging station design utilizes RES such as solar energy and wind energy in an integrated system. Furthermore, the performance of the system is simulated with Stochastic Optimization Technique (SOT) and (Stochastic p-Robust Optimization Technique (SPROT) optimization models. In addition, the design has the objective of providing an uncertainty-tolerant structure.

The research performed by Tan et al., 2025 presents a mathematical model for coordinated planning of HRS and DN to reduce the safety risks of HRS with the explosion energy of Trinitrotoluene (TNT). A gas-liquid two-phase hydrogen storage method is used to reduce the operational risks of hydrogen and increase the safety of storage. Finally, the study aims to contribute to the development of hydrogen economy and sustainable energy systems.

These optimization strategies guide the development of HFCV infrastructure to adapt to different geographical, demographic, and economic conditions. Using different types of mathematical modeling, mostly MILP, can help with real-world problems like integrating green energy, transporting hydrogen over long distances, planning for sustainable infrastructure, and lowering risk. By developing workable models from both a technical and economic perspectives, each study advances sustainable urbanization and energy systems.

A study is being carried out for Bornova, a highly populated district of Izmir, with the goal of introducing HFCVs in the area over a 10-year timeframe. In this study, possible locations for hydrogen distribution stations (HDSs) and HRSs were selected. The selected locations are applied to implement the MILP optimization model to apply the constraints. The remaining part of this research is structured as follows: Section 2 discusses the problem definition, while Section 3 presents the optimization model. The information and location utilized in a research project conducted in Bornova can be found in Section 4. Chapter 5 explores the outcomes of the optimization model in a city setting. Chapter 6 provides the summary and guidance for upcoming research in this area.

2. Problem Definition

Hydrogen energy can be generated from fossil fuels as well as from RES. Thermochemical, electrolysis, and photoelectrochemical processes can be utilized in the production of hydrogen energy. In recent times, particularly in large urban areas, there has been a surge in the use of EVs and buses, with HFCVs also gaining traction for their ability to run on eco-friendly and sustainable energy sources (S. B. Li & Kang, 2022).

In Bornova, a densely populated district in Izmir with 452,867 residents spread over 205 square kilometers, researchers are investigating the feasibility of producing hydrogen to pinpoint the best locations for HRSs (Tarihçe. (n.d.-a).). On average, the transportation network in Bornova stretches from 13 to 15 kilometers and sees approximately 40,000 vehicles using it each day. Estimations of possible HDS will dictate the site chosen for Bornova district in Izmir. To enhance the system's performance, hydrogen stations will be strategically organized and overseen with the goal of connecting them to the grid (Shinoda et al., 2016). Ex-

cess hydrogen and electricity not used for vehicles will be sold back to the grid. Moreover, existing gas stations in Bornova, even those equipped with solar panels, will be repurposed for HRS. Factories in nearby industrial areas will provide the materials for producing hydrogen.

The Toyota Mirai hydrogen car, which can travel up to 1000 km on one tank of hydrogen, has been chosen for use in this area. It is expected that the Toyota Mirai will lead to a decrease in the number of cars required and shorter gas station lines in Bornova, enhancing the overall effectiveness of the transportation system.

To satisfy the refueling needs of densely populated areas like Bornova, setting up a HDS near current refueling stations can reduce losses during the transportation of the produced hydrogen. Nevertheless, setting up HDSs in urban areas leads to higher expenses because of the cost of land and its closeness to residential zones. As a result, production facilities located in industrial areas will operate with higher efficiency. The HDSs that will be built will be chosen to support around two-three HRSSs, preventing the generation station from being overloaded. Operating production stations based on the required hydrogen levels using various equipment will yield greater economic advantages. As the economy grows, a multi-period optimization issue has been selected for the hydrogen supply chain, which involves setting up HDSs and converting refueling stations over time.

3. Optimization Model

The optimization model selected is the MILP model. The “intlinprog” function within MATLAB was utilized to determine the optimal solution for the objective function in the MILP model.

MILP is a mathematical optimization method consisting of an objective function, decision variables and constraints (Optimization problem types - mixed-integer and constraint programming. (2024b)). The MILP model is used to find the minimum or maximum outcome of a given problem. MILP is a powerful optimization method that provides many benefits in various industries and applications such as finance, manufacturing, and transportation. Common application areas are supply chain management, planning, and routing, project management and optimization of energy systems. For this reason, it is an optimization method with many advantages (Math. (n.d.)). MILP can be used in many real-world areas such as network design and distance optimization as well as in production and operations research.

In this research, MILP is one of the real-world applications used to minimize the transportation distance between application points (APs) and HRSSs and between HRSSs and HDSs. A hydrogen supply system is created for the refueling of HFCVs. APs, HRSSs, and HDSs are chosen based on the population in the region being considered. The goal is to reduce the distance between the APs and HRSSs to make it more convenient for drivers. The p-median model determines the location of the HRS to provide convenient refueling for drivers living nearby (Bae et al., 2020).

The given formula is used to create and evaluate the optimization model for the multi-period hydrogen distributing network in urban areas (Bae et al., 2020).

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} DIST_{ij} H_{it} y_{ijt} + p \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} DIST_{jk} w_{jkt} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j \in J(i)} y_{ijt} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2)$$

$$y_{ijt} \leq x_{jt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3)$$

$$x_{jt} \leq x_{j(t+1)} \quad \forall j \in J, t \in T \setminus \{\tau\} \quad (4)$$

$$z_{jt} = x_{jt} - x_{j(t-1)} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} w_{jkt} = x_{jt} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} z_{jt} = P_t \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} w_{jkt} \leq CAP_{kt} u_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (8)$$

$$u_{kt} \leq u_{k(t+1)} \quad \forall k \in K, t \in T \setminus \{\tau\} \quad (9)$$

$$v_{kt} = u_{kt} - u_{k(t-1)} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} v_{kt} = Q_t \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$x_{jt}, y_{ijt}, z_{jt}, u_{kt}, v_{kt}, w_{jkt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (12)$$

The MILP model is made up of ten constraints and one objective function. Function (1) is an objective function. The distance from the APs calculated via Google Earth to the HRSs is denoted as $DIST_{ij}$, while the distance from the HRSs to the HDSs is denoted as $DIST_{jk}$. The goal of function (2) is to reduce the distances between AP and HRS ($DIST_{ij}$) as well as between HRS and HDS ($DIST_{jk}$). Constraint (3) states that each application point can be assigned to refueling stations. Constraint (4) makes sure that every AP is allocated to the HRS currently functioning. Constraint (5) specifies that once a HRS is functioning, it cannot be halted. Constraint (6) states that the HRS functions starting from the year of its construction. Constraint (7) states that each refueling station can be assigned to distribution stations. Constraint (8) specifies that a set quantity of HRSs must be constructed annually. Constraint (9) states that the number of fuel stations covered by the distribution station will not exceed the specified maximum number of refueling stations that can be connected to the HDS (CAP_{kt}). Constraint (10) requires that a HDS must operate continuously once it has started. Constraint (15) dictates that the hydrogen distribution facility must start operating in the year of its construction. Constraint (11) specifies that the hydrogen distribution plant operates beginning from the year it was built. Constraint (12) enforces a restriction on each variable to be binary.

4. Area, Data and Scenarios

In this section, general information about the region where the green transportation system will be implemented and general data about hydrogen refueling stations, HFCVs will be examined and detailed explanations about the scenarios will be made in three categories.

In the area section, general information is given about the Bornova region. In addition, the locations of HRSs, and APs are selected. The data section includes information on the transportation system of Bornova region, targeted annual HFCV information and HRS information according to the targeted years according to the scenarios. In the scenario section, four different scenarios were developed. The developed scenarios include the scenarios in which HRSs and HDSs are planned to be installed over time in detail.

4.1 Area

The study was conducted in the Bornova region, located in the eastern part of Izmir. Due to its location near the industrial zone, university, city center, high population density, and connection to Manisa province, Bornova ranks as the third busiest district in Izmir in terms of vehicle traffic, with a total of forty-five neighborhoods. Refueling stations for HFCVs are conveniently located in the area. The limits of Bornova are illustrated in Figure 2(a). The settlement of the Bornova region, situated in a vast area, is easily distinguishable from the green spaces, as shown in the image. The area to be implemented is the most densely populated area. In this study, APs were created by selecting 10 regions with high population density of the neighborhood. The location of the refueling stations were selected as the nearest points on the map to the location of the current refueling stations. Finally, HDSs were selected within the available industrial zones.

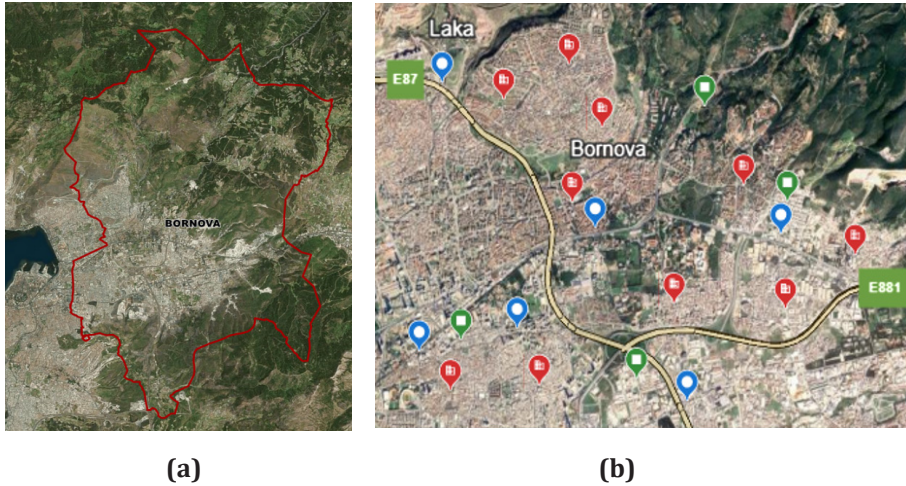


Figure 2. (a) The area of Bornova district. (b) Distribution of APs, HRSs and HDSs.

In Figure 2(b), APs are shown as red icons, HRSs as blue icons and HDSs as green icons using Google Earth. The specified locations are fixed. Optimization will provide results based on the developed scenarios for the installation of the stations.

4.2 Data

In this section, the vehicle density of the Bornova region, the targeted change in HFCVs over the years and the changes in the number of HRSs planned to be es-

tablished according to the scenarios over the years will be examined.

The data provided in the Bornova traffic transport Table 1 for 2021 categorizes vehicle types and emphasizes the significant amount of transportation in the region. Due to this increased usage, existing refueling stations are expected to see a lot of traffic. However, it is estimated that a HRS after conversion from a conventional refueling station can support around 240 HFCVs per day. Furthermore, refueling stations in Izmir sell an average of 8.6 cubic meters of fuel per day.

Table 1. 2021 Bornova Traffic and Transportation Information

Vehicle Type	Number of vehicles
Car	31770
Medium Load Commercial Vehicle	2552
Bus	598
Truck	2355
Truck + Trailer, Tractor + Semi Trailer	1669
Total	38944 vehicle / day

The number of HFCV (H_{it}) adopted by application points over time is based on the annual activation of HRSs and the annual HFCV target is calculated by multiplying it by the capacity of each HRS. Figure 3. displays the annual distribution of the HFCV target for Bornova. The targets have increased linearly over the years.

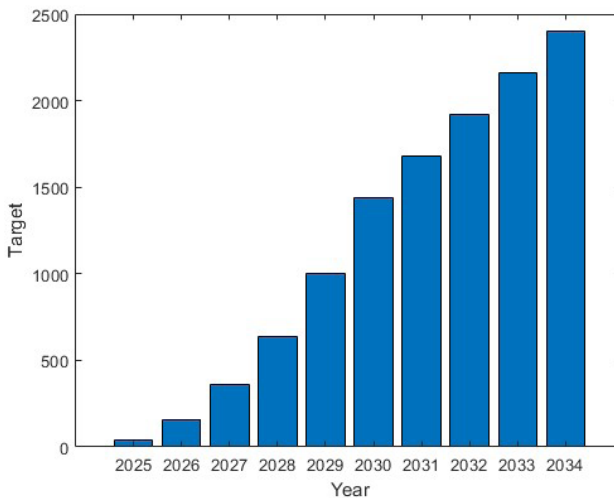


Figure 3. Annual total goal of HFCVs in Bornova.

The HRSs were created using the current fuel stations' locations. There are plans to upgrade the infrastructure of the chosen six refueling stations to enable them to offer hydrogen fuel alongside gasoline and diesel. Therefore, the budget allocated for installation can enable the modification of additional refueling stations.

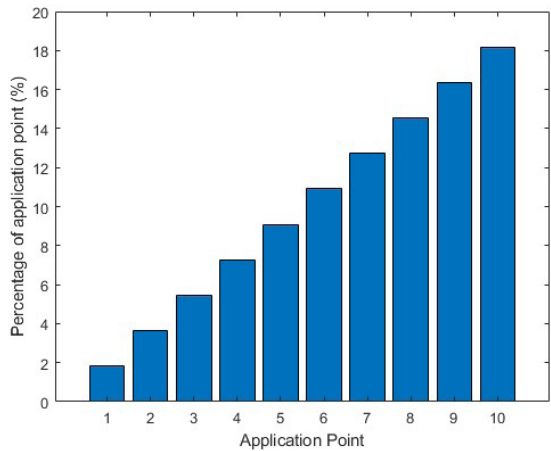


Figure 4. Percentage of each AP to the total HFCV target.

The number of registered vehicles at the designated APs has been found by multiplying it by the ratio of the targeted number of HVs. The percentage ratios of each AP to the total HFCV target are shown in Figure 4. The ratio of APs to targeted HF-CVs increases linearly. Figure 5 contains data showing the conversion of the refueling stations planned to be established in each year’s scenario to HRSs over time. The number of HRSs (P_i) planned to be established over time has been determined in scenarios. Refueling stations will be converted to be suitable for hydrogen fuel. However, in the results section, instead of using the term “conversion,” it will be referred to as “commissioning” or “installation” according to the scenarios in the optimization. The scenarios are described in detail in the next section.

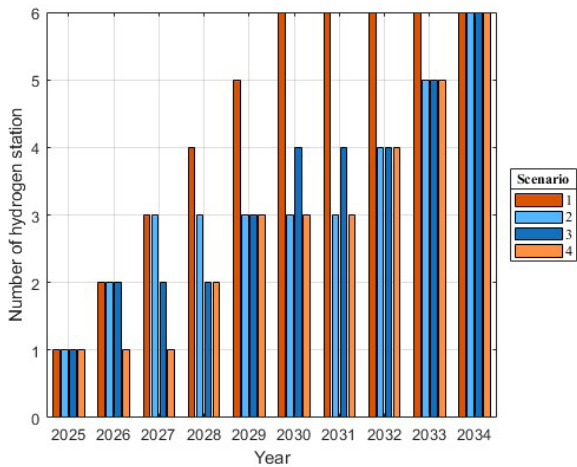


Figure 5. Annual conversion of current refueling stations into HRSs for different scenarios

Out of the four HDSs being considered, three were chosen within the industrial zone and one was selected near the Solar Power Plant (SPP) location. Given that the industrial zones are located within a specific area and are relatively close to the district center, transportation losses will be minimal. Furthermore, industrial areas will become more effective in meeting the needs for HDS infrastructure. The number of HDSs (Q_i) planned to be established over time has been determined in scenarios. The scenarios are described in detail in the next section.

Finally, the transportation distance to be used in the optimization problem was calculated on Google Earth. Since the transportation distances are taken from the map increases of 50% have been applied. The transportation distance from the APs to the refueling stations is called $DIST_{ij}$. Transportation distances from the APs to the HRSs are given in Table 2.

Table 2. The transportation distance from the APs to the HRSs

	#	Number of Hydrogen Refueling Stations					
		1	2	3	4	5	6
Number of Application Point	1	5.45	7.50	6.15	2.31	9.30	1.22
	2	0.86	4.43	5.66	3.38	5.43	5.34
	3	2.40	4.28	6.99	5.33	5.28	7.17
	4	3.92	1.62	8.67	5.54	7.83	6.44
	5	3.95	3.29	8.72	6.51	6.83	7.97
	6	4.11	7.73	3.84	1.53	7.23	3.23
	7	2.76	8.01	2.37	4.10	3.21	6.69
	8	5.27	10.41	3.39	6.93	1.83	9.51
	9	3.96	8.16	5.46	6.81	1.55	9.29
	10	6.75	11.45	5.57	8.90	1.98	11.48

The transportation distance from HRSs to HDSs is called $DIST_{jk}$. Table 3 shows the transportation distances of refueling stations to distribution stations. The values given are in kilometers (km).

Table 3.The transportation distance from HRSs to HDSs

	#	Number of Hydrogen Distribution Stations			
		1	2	3	4
Number of Application Point	1	3.80	5.00	4.05	4.43
	2	8.75	9.35	6.78	6.27
	3	1.41	5.51	7.16	6.03
	4	3.32	7.61	7.22	1.49
	5	5.13	0.83	3.63	8.66
	6	5.66	10.20	9.44	1.11
	7	4.80	3.30	2.13	6.41
	8	3.72	4.14	6.81	8.22
	9	1.92	7.70	8.40	3.68
	10	5.04	8.70	7.70	1.26

4.3 Scenarios

The scenarios are developed for HRSs and HDSs that are planned to be established over time. First, the installation times of HRSs and HDSs will be analyzed in years for 4 different scenarios. The differences between the scenarios and the layouts in the scenarios will be shown and explained in detail. In all scenarios, installation of a HRS and HDS is mandatory in the first year. The graphic illustrations of the scenarios will examine the installation years of refueling stations (circles) and distribution stations (squares) in Figure 7, Figure 9, Figure 11 and Figure 13.

4.3.1 First Scenario

In the first scenario, HRSs will be installed from the first year and will be installed every year until the planned number of HRSs(P_r) is completed. Stations will be installed annually until the target number is reached. The optimization itself determines the order of the stations to be set up. Similarly, HDSs will be installed starting in the first year and continuing each year until the planned number of HDSs (Q_d) is reached. Figure 6 shows the distribution of planned (a) HRSs and (b) HDSs over the 10 years and when they were installed.

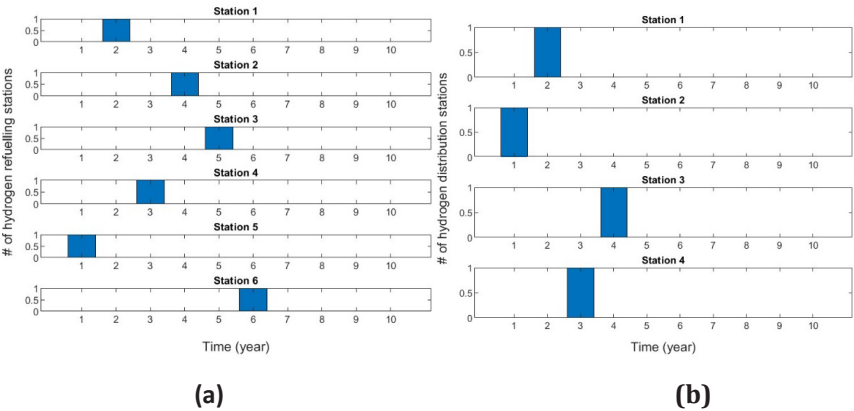


Figure 6. Years of installation of (a) HRSs and (b) HDSs stations commissioned over time for Scenario 1.

The facilities on the maps have different colors depending on the year each facility was built. The locations of the refueling stations and distribution stations in the scenarios are fixed locations determined by Google Earth. The timing and sequence of installation changes over the years. Figure 7 shows geometrically the years in which refueling stations and distribution stations were established. After 2028, HDSs are not installed. After 2030, HRSs are not installed.

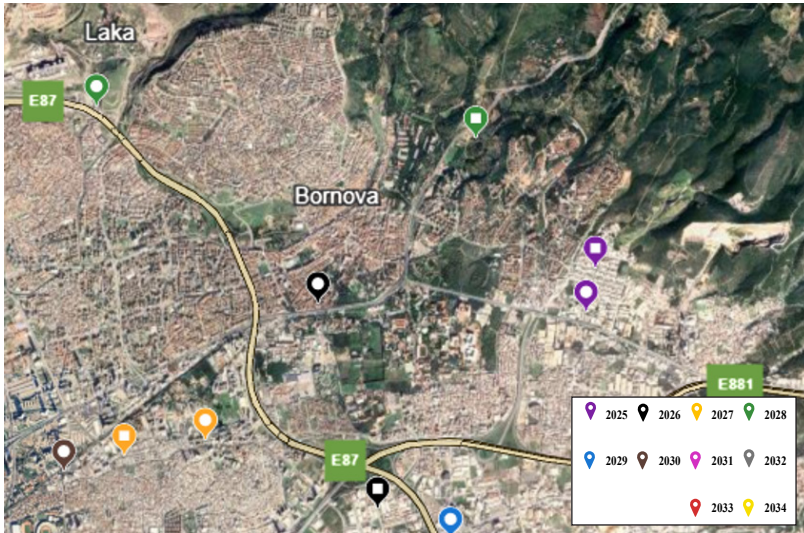


Figure 7. Geographical representation of the locations of HRSs (circles) and HDSs (squares) to be built over the years for Scenario 1.

4.3.2 Second Scenario

In the second scenario, the installation of HRSs (P_i) is scheduled for the first three years and the final three years. In the scenario, installations for the refueling station and distribution station are planned for the initial years and towards the final years. The order of the stations to be established is determined by optimization. HDSs will be installed (Q_i) in the first two years and in the last 2 years. Figure 8 shows the distribution of planned (a) HRSs and (b) HDSs over the 10 years and when they were installed.

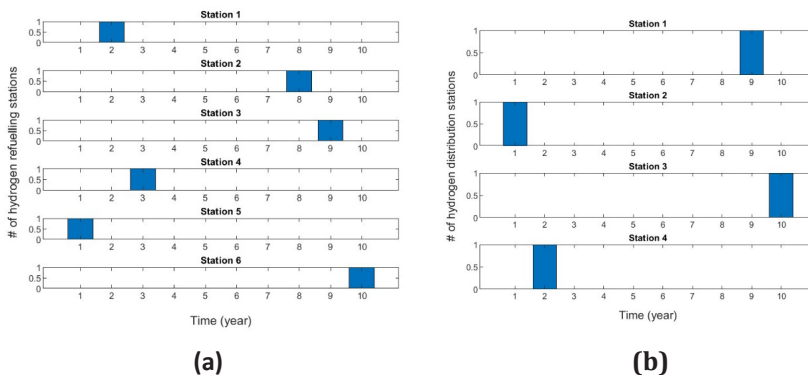


Figure 8. Years of installation of (a) HRSs and (b) HDSs commissioned over time for Scenario 2.

Figure 9 shows the geographical locations of the refueling stations and distribution stations established according to Scenario 2 over the years. 3 refueling sta-

tions and 1 distribution station were established in the same years as scenario 1. Other stations have changed over the years depending on the scenario.



Figure 9. Geographical representation of the locations of HRSs (circles) and HDSs (squares) to be built over the years for Scenario 2.

4.3.3 Third Scenario

In the third scenario, HRSs are planned to be installed for the first 2 years and will be installed periodically. If installed for 2 years, they will not be installed for the other 2 years. The planned number of HRSs will be installed (P_t) in 10 years until they are completed. HDSs will be installed (Q_t) in the first year and will continue to be installed periodically after 2 years. Figure 10 shows the distribution of planned (a) HRSs and (b) HDSs over the 10 years and when they were installed.

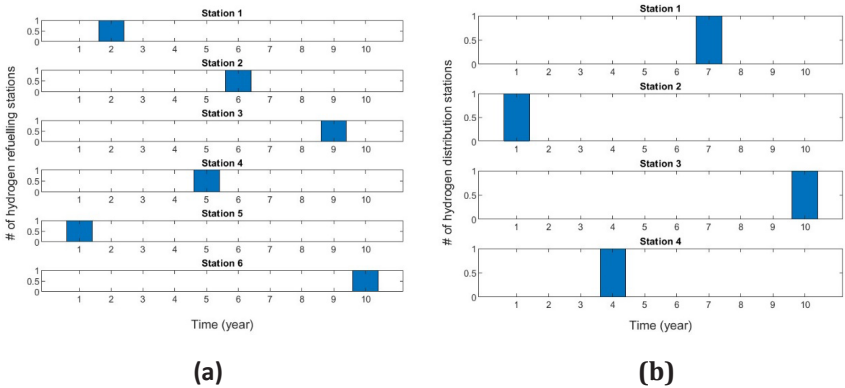


Figure 10. Years of installation of (a) HRSs and (b) HDSs commissioned over time for Scenario 3.

Figure 11 shows the geographical location of the refueling stations and distribution stations established over the years. The refueling stations are almost as installed as in Scenario 2. Half of the distribution stations are similar.



Figure 11. Geographical representation of the locations of HRs (circles) and HDSs (squares) to be built over the years for Scenario 3.

4.3.4 Fourth Scenario

In the fourth scenario, HRs are not installed at two-year intervals as in the third scenario. However, the periodic pattern is different from Scenario 3. In the first year, the period starts after the installation of the hydrogen station. Therefore, the installation period will be 1 year longer than the installation period of the previous hydrogen station. HDSs were built over a period of 5 years. This period repeats itself 2 times. Within the 5-year period, installation is compulsory in the first and last year. Figure 12 shows in more detail the distribution of planned (a) HRs and (b) HDSs over 10 years and when they are installed.

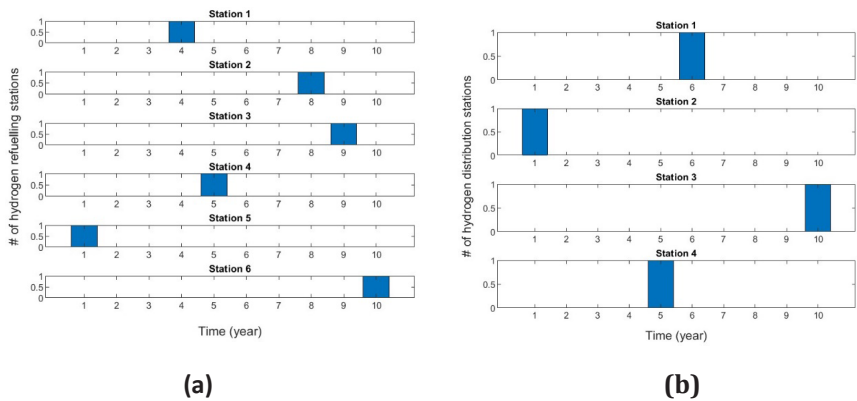


Figure 12. Years of installation of (a) HRSs and (b) HDSs commissioned over time for Scenario 4.

Figure 13 shows the geographical location of the refueling stations and distribution stations established according to Scenario 4 over the years. The refueling stations are almost as installed as in Scenario 3. When the scenarios are analyzed, the first established refueling station and distribution station were the same station in all scenarios. There are similarities between the scenarios. The differences varied according to the years planned to be established depending on the scenarios. Although there are stations to be established in similar years, there are slight differences in the scenarios.

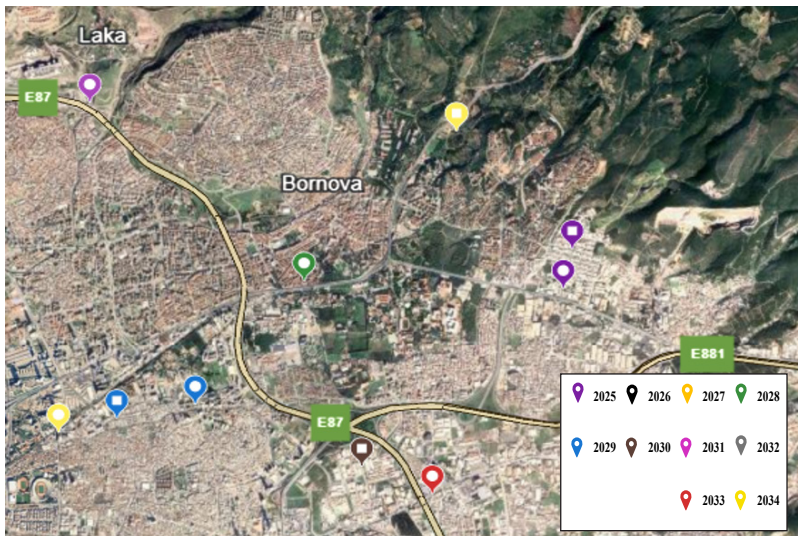


Figure 13. Geographical representation of the locations of HRSs (circles) and HDSs (squares) to be built over the years for Scenario 4.

5. Results

This section contains the findings from the study conducted in the Bornova area. An average time of 5 seconds is needed to solve one optimization problem on a laptop with an Intel Core i7 processor and 8 GB of RAM. A grand total of 1040 models were put into operation.

5.1 Comparison of Different Scenarios

In the optimization model, the number of HRSs and HDSs was gradually assessed according to scenarios every year. The value of parameter p is assumed to be 10. The maximum number of refueling stations that can be connected to the HDS(CAP_{kt}) is set at 3. With the optimization results, it examines the change in the average transport distance from the APs to the supply stations and the change in the distance between the refueling stations and distribution stations for each scenario. It also shows the geographical distribution of the refueling and distribution stations installed during the years of the scenarios. HFCV numbers are assumed to increase periodically each year. The sensitivity analysis will be performed by changing HFCV numbers.

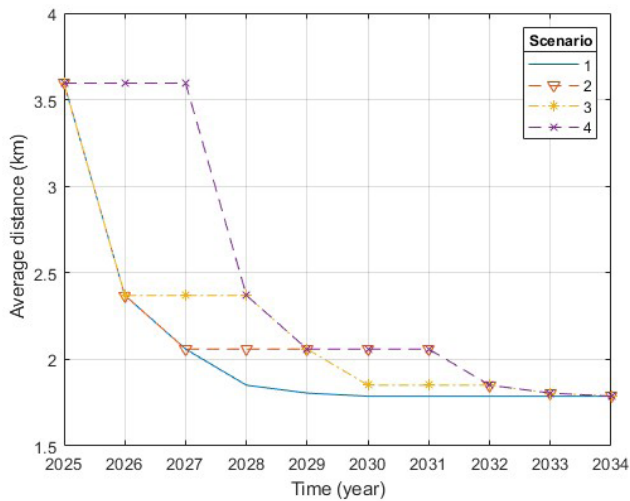


Figure 14. The average distance changes for APs and HRSs for scenarios.

Using the outcomes of the modeling for the scenarios, Figure 14 illustrates how the average transport distance between the APs and the HRSs changes over time. The average travel distance decreases over time as refueling stations are established. Scenarios 1,2 and 3 appear remarkably similar when examining the scenarios. However, there is a difference because the refueling station was established later in Scenario 4. The average distance under all conditions was approximately 3.5 km in 2025, although it had halved by 2034.

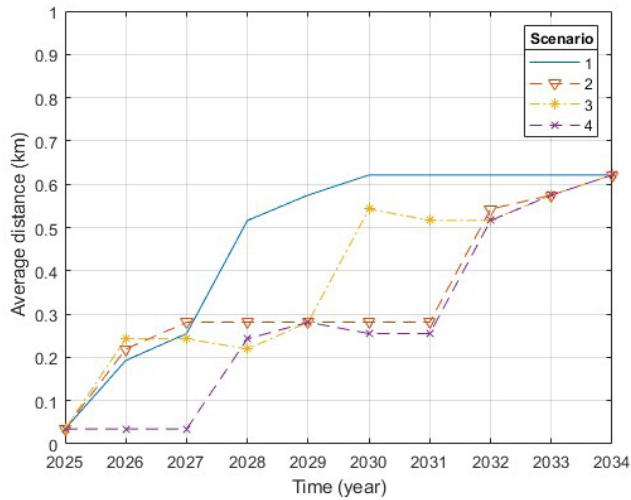


Figure 15. The average distance changes for HRSs and HDSs for scenarios.

Figure 15 displays the variation in the average transportation distance between HRSs and HDSs over time using the modeling outcomes. Due to the optimization of the minimum distance to HDSs based on the installations of HRSs over the years, as measured through Google Earth, there were increases in distances until the installation of HRSs was completed, after which the distances were fixed. One of the reasons for this is that there are no constraints in the optimization problem, and HDSs can serve three HRSs. Therefore, HRSs can serve HDSs at the shortest distance over time.

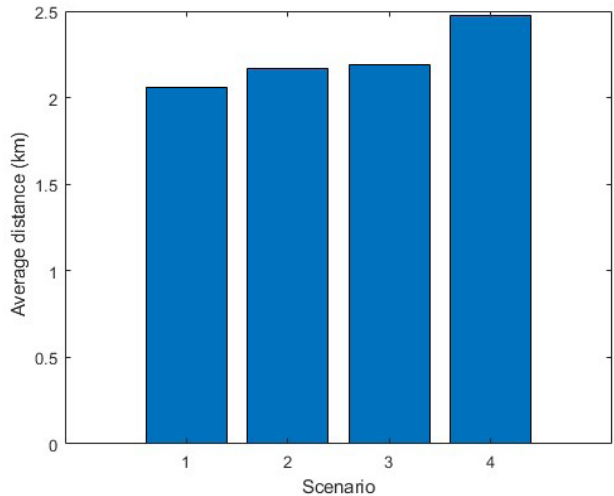


Figure 16. The average distance of APs and HRSs for all scenarios.

Figure 16 shows the average transport distance from the APs to the refueling station for all scenarios. As planned, the average transport distance will be the lowest when all HRSs are first established. When HRSs were established periodically and at the beginning and end, they had the same average travel distance. However, when a HRSs was established over time, the average transport distance reached its highest level.

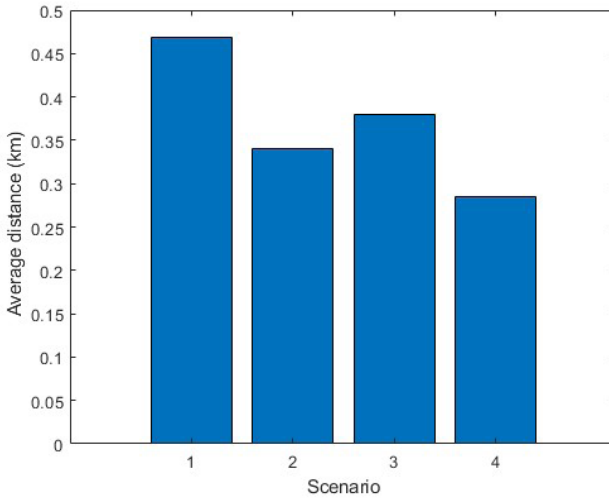


Figure 17. The average distance of HRSs and HDSs for all scenarios.

When all HRSs and all HDSs were installed in the first years, the average transport distance was the largest in Figure 17. The shortest average transportation distance was found in Scenario 4. The number of HDSs grew during the designated period, whereas the number of HRSs climbed progressively over time. As a result, the shortest average travel distance was established.

5.2 Sensitivity Analysis for HFCV number

To analyze the results more accurately, a change has been made to the number of hydrogen fuel cell vehicles (H_{it}) given linearly. The H_{it} expected to serve randomly has been created in the MATLAB program. The H_{it} created was applied in all scenarios. As the H_{it} increases, changes in scenarios will be observed. There is no change in the p parameter of the objective function.

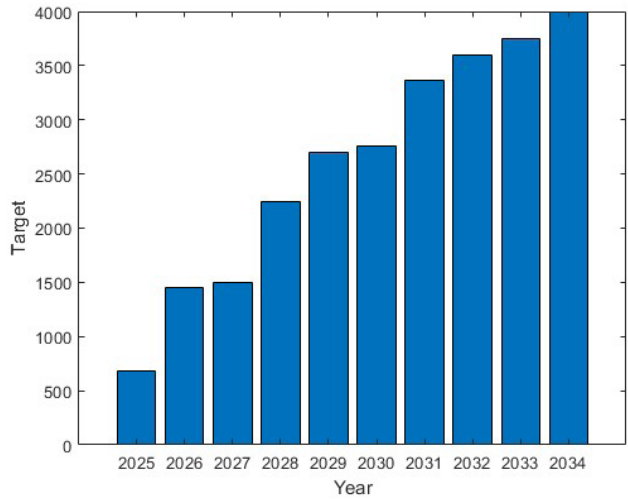


Figure 18. The annual total goal change for modified HFCVs in Bornova.

Figure 18 shows the targeted number of HFCVs over time. At the end of 10 years, a modified dataset of HFCVs has been created to serve 4000 vehicles. The targeted hydrogen fuel cell vehicle data has been done as it was done with the linearly increasing number of HFCVs.

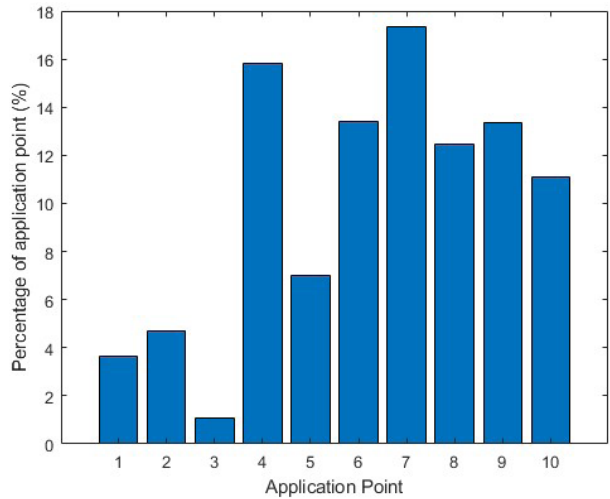


Figure 19. Percentage of each application point to the total HFCV target

The number of registered vehicles at the designated APs has been found by multiplying it by the ratio of the targeted number of HFCVs. The percentage ratios of each AP to the total HFCV target are shown in Figure 19. The total number of APs is 100. Thus, it can be said that all APs are operating at full performance.

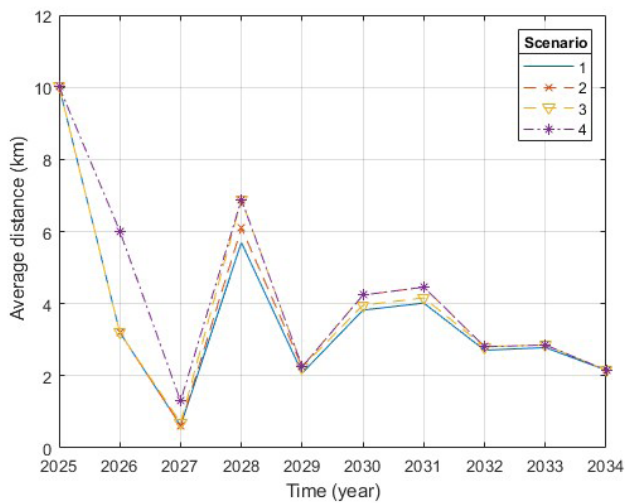


Figure 20. Average distance between APs and HRSs for modified HFCVs data.

In Figure 20, the average travel distance from APs to HRSs is shown for modified HFCVs data. When looking at all the scenarios, they appear to be the same. As the number of refueling stations increases, decreases in average transportation distances are observed. In addition, as the number of HFCVs increased, the average transportation distance increased, while when the number decreased, there were decreases in transportation distance.

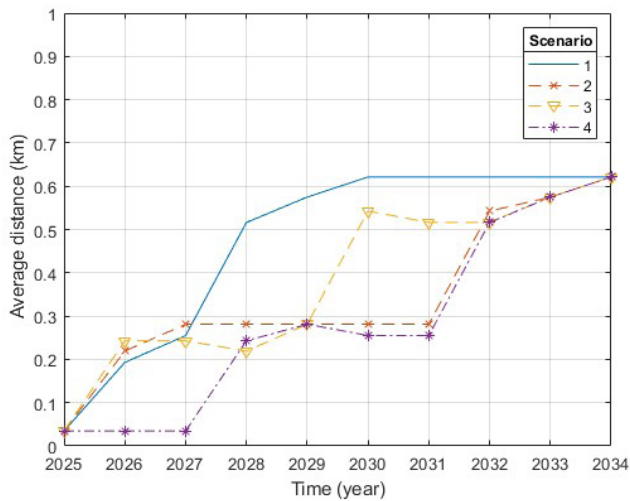


Figure 21. Average distance between HRSs and HDSs for modified HFCVs data.

In Figure 21, the average travel distance from refueling station to distribution stations is shown for modified HFCVs data. It has been observed that changing the number of HFCVs does not cause any change in average distances. The change in average distances depends on the order of installation of refueling stations and distribution stations. Since the installation order is the same in all scenarios, there is no change.

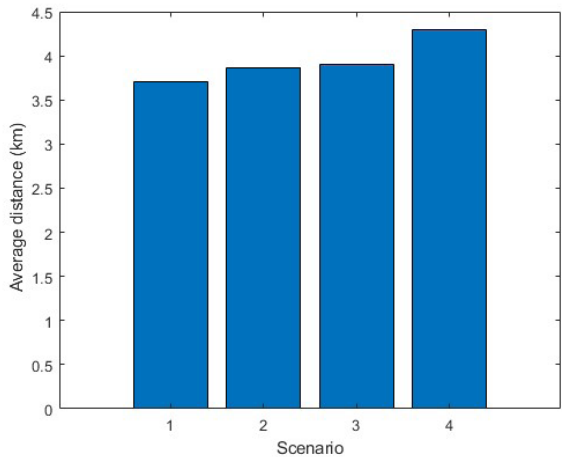


Figure 22. Average distance between APs and HRSs for modified HFCVs data.

In Figure 22, the average transportation distance from the APs to the refueling stations for all scenarios of the modified HFCV data is shown. As seen, until the number of refueling stations to be established is completed, setting them up each year minimizes the average transportation distance. However, when it is established by increasing over time, the average transportation distance is high.

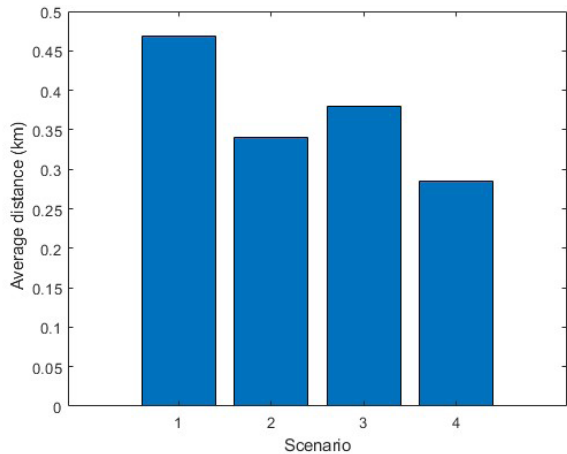


Figure 23. Average distance between HRSs and HDSs for modified HFCVs data.

In Figure 23, the average transportation distance from refueling stations to distribution stations for all scenarios of the modified HFCV data is shown. In the first years, the transportation distance of the refueling and distribution stations, which were completed, was high, while when they were established at certain intervals, the average transportation distance decreased.

6. Conclusions

In this research study, MILP modeling is used since it has linear constraints and binary decision variables. Parameters have been applied based on the capacity of the area to be used and the data of HFCVs to be used in the region.

Focusing on hydrogen distribution in Bornova, a densely populated area of Izmir, the focus is on an optimal green transportation system solution for HRS. The study analyzed the planned implementation of HFCV between 2025-2034, focusing on the early stages of the transition to HFCVs in Bornova. In this process, refueling stations were converted to supply hydrogen and HDSs were established in nearby industrial zones.

In the optimization study, the establishment of an HRS and a HDS is envisioned with 4 different scenarios. In the first scenario, the refueling stations and distribution stations planned to be established are set up every year until they are completed. In the second scenario, half of the planned refueling stations and distribution stations were established in the early years, while the other half were established in the later years. In the third scenario, after the refueling stations are established for 2 years, no installations will be carried out for 2 years. However, after the distribution stations are established, no installations will be carried out for 2 years. In Scenario 4, after the installation at the refueling stations is completed, there will be no installation for 2 years, but when the installation occurs again, it will be 1 year more than the previous installation. The distribution stations, on the other hand, were built over a 5-year period. The setup will be carried out in the first and last year of the period, and the period repeats itself twice.

With geographical representations, the changes in the installations of refueling stations and distribution stations over the years have been analyzed for all scenarios. There are similarities and differences between the scenarios. The first HRS and the HDS are the same in all scenarios. In Scenarios 2, 3 and 4, the last planned HRS and distribution station are similar. However, in other years, the station to be installed may change depending on the scenarios.

The number of HFCVs is increasing periodically every year. In Figure 14, as the number of refueling stations increases, the average transportation distance decreases. The distance, which was initially about 3.5 km, is nearly halved by the end of the study. In Figure 15, while it is expected that the average distance decreases as the number of stations increases, the first established refueling station is the 5th station, and the first established distribution station is the 2nd station. For this reason, the shortest distance in $DIST_{jk}$ values are first examined through Google Earth. Since there are increases in distances compared to the later established refueling station and distribution station, an increase is being observed.

The variations in the transportation distance from the application points (APs) to the hydrogen refueling stations (HRSs) according to the 10-year average of the scenarios are presented in Figure 16. The first scenario is more efficient here because it provides the shortest average travel distance. However, looking at Figure 17, Scenario 4 appears to be more efficient based on the 10-year average of the transportation distance from refueling stations to hydrogen distribution stations (HDSs). However, since Scenario 2 appears to be the lowest in both graphs when considering the two scenarios, implementing Scenario 2 will be more economical.

In the detailed analysis, assuming that the number of HFCVs will not increase periodically, a randomly increasing dataset of HFCVs over the years has been generated using the MATLAB program. The data generated is shown in Figure 18. Additionally, the proportion of each application point in the total HFCV target can be seen in Figure 19.

As the number of refueling stations increases, decreases are observed in the average travel distances from APs to HRSs, while increases are observed in the number of fuel stations despite an increase in the number of HFCVs. However, the similarity of all scenarios is shown in Figure 20. The average transportation distance from HRSs to HDSs has not changed because it is not related to the number of HFCVs. In the sensitivity analysis, an analysis of the p-value in the objective function has not been conducted. Therefore, Figure 15 is the same as Figure 21. When the HFCV data is modified, the average distance from the APs to the HRSs is provided in Figure 22. Scenario 1 has the lowest average transportation distance, while Scenario 4 has an average transportation distance of approximately 1 km more. The number of HFCVs, which has been increasing periodically, has observed an increase of more than approximately 50% based on their average distances. As the number of vehicles increased, the average travel distance in the scenarios also increased. The average transportation distance from HRSs to HDSs is shown in Figure 23. Even if the HFCV data changes, the average transportation distances have not changed. However, if a change had been made to the p-value, a change would have been expected to be observed. When looking at the scenarios, the average transportation distance $DIST_{ij}$ and $DIST_{jk}$ is lowest in Scenario 2.

Optimization results show that the system is feasible for the Bornova region. However, the hydrogen infrastructure should be evaluated in detail in terms of long-term economic and sustainability. While the development of hydrogen infrastructure is of great importance, it also brings some challenges. The main objectives of expanding this infrastructure are to reduce carbon emissions, increase energy storage capacity, support RES and replace fossil fuels in industry. However, there are several challenges, including lack of infrastructure, high investment and production costs, safety concerns, and storage and transportation difficulties. In economic terms, the development of hydrogen infrastructure contributes to energy independence and offers advantages such as lower energy costs and green hydrogen exports. In terms of sustainability, it contributes to a cleaner and healthier environment, more efficient use of renewable energy and reduced carbon emissions.

In the future, technological advances will make it possible to use hydrogen not only in transportation but also in new areas such as the defense industry and hydrogen-powered aircraft. Through research on energy storage and transportation, solutions can be developed for the storage and transportation of hydrogen. Furthermore, by advancing electrolysis technologies, more efficient results can be achieved in hydrogen production.

7.Declaration of Competing Interest

The authors declare that this study adhered to research and publication ethics. There is no conflict of interest among the authors.

Acknowledgements

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Nomenclature

AP	Application Point
EV	Electric Vehicle
HDS	Hydrogen Distribution Station
HFCV	Hydrogen Fuel Cell Vehicle
HRS	Hydrogen Refueling Station
HV	Hydrogen Vehicle
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
RES	Renewable Energy Sources

A. MILP Model Sets and Identifies

i	The number of application points
$i \in I$	Specifies the set of the application points
j	The number of hydrogen refueling stations
$j \in J$	Specifies the set of the hydrogen refueling stations
$J(i)$	Identifies the group of hydrogen refueling stations that can serve the application point.
k	The number of hydrogen production stations
$k \in K$	Specifies the set of the hydrogen production stations
$K(j)$	Identifies the group of hydrogen production stations that can serve the hydrogen refueling station.
$j \in J$	Specifies the set of the hydrogen refueling stations
T	Planned period time
$T = \{1, \dots, \tau\}$	Represents the planned annual period.

B. MILP Model Parameters

$DIST_{ij}$	The travel distance between i to j
$DIST_{jk}$	The travel distance between j to k
H_{it}	The number of HFCVs being used during at application points in the planned time
p	The factor that establishes the significance of two distance terms in the objective function.
P_t	The planned number of hydrogen production stations within time
Q_t	The planned number of hydrogen refueling stations within time

C. MILP Model Decision Variables

u_{kt}	If the HPS is functioning within the scheduled time
v_{kt}	If the HPS is being built within time.
w_{jkt}	When HRS is covered by HPS in time.
x_{jt}	If the HRS is functioning within the scheduled time
Y_{ijt}	When AP is covered by HRS in time.
Z_{ijt}	If current fuel stations are converted into hydrogen fuel stations as planned

References

Bae, S., Lee, E., & Han, J. (2020). Multi-period planning of hydrogen supply network for refuelling hydrogen fuel cell vehicles in Urban areas. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10). Doi: <https://doi.org/10.3390/su12104114>

Geçici, E., Güler, M. G., & Bilgiç, T. (2022). Multi-period planning of hydrogen refuelling stations using flow data: A case study for Istanbul. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(95), 40138–40155. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.068>

Jian, P., Xiang, S., & Sabzalian, M. H. (2024). Planning of a charging station for electric and hydrogen vehicles under hydrogen storage and fuel cell systems using a novel stochastic p-robust optimization technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 88, 702–712. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.228>

Kim, H., Eom, M., & Kim, B. I. (2020). Development of strategic hydrogen refueling station deployment plan for Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 19900–19911. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.246>

Konneh, K. V., Masrur, H., Othman, M. L., Wahab, N. I. A., Hizam, H., Islam, S. Z., ... Senjyu, T. (2021). Optimal Design and Performance Analysis of a Hybrid Off-Grid Renewable Power System Considering Different Component Scheduling, PV Modules, and Solar Tracking Systems. *IEEE Access*, 9, 64393–64413. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075732>

Li, L., Manier, H., & Manier, M. A. (2020). Integrated optimization model for hydrogen supply chain network design and hydrogen fueling station planning. *Computers and Chemical Engineering*, 134. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106683>

Li, S. B., & Kang, Z. T. (2022). Capacity Optimization of Clean Renewable Energy in Power Grid Considering Low Temperature Environment Constraint. *IEEE Access*, 10, 2740–2752. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137279>

Long, T., & Jia, Q. S. (2022). Joint Optimization for Coordinated Charging Control of Commercial Electric Vehicles Under Distributed Hydrogen Energy Supply. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 30(2), 835–843. Doi: <https://doi.org/10.1109/TCST.2021.3070482>

Nandi, S., Ghatak, S. R., Sannigrahi, S., & Acharjee, P. (2024). Coordinated planning and operation of PV- hydrogen integrated distribution network incorporating daily-seasonal green hydrogen storage and EV charging station. *International Journal of Hydrogen Energy*, 90, 134–158. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.402>

Shi, M., & Huang, Y. (2023). Dynamic planning and energy management strategy of integrated charging and hydrogen refueling at highway energy supply stations considering on-site green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(77), 29835–29851. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.201>

Shinoda, K., Lee, E. P., Nakano, M., & Lukszo, Z. (2016). Optimization model for a micro-grid with fuel cell vehicles. In *ICNSC 2016 - 13th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Doi: <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2016.7479027>

Tabandeh, A., Hossain, M. J., & Li, L. (2022). Integrated multi-stage and multi-zone distribution network expansion planning with renewable energy sources and hydrogen refuelling stations for fuel cell vehicles. *Applied Energy*, 319. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119242>

Tan, H., Shao, Z., Wang, Q., Lin, Z., Li, Z., Weng, H., & Mohamed, M. A. (2025). A coordinated planning method of hydrogen refueling stations and distribution network considering gas-solid two-phase hydrogen storage mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 100, 1561–1573. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.282>

Wu, W. P., Wu, K. X., Zeng, W. K., & Yang, P. C. (2022). Optimization of long-distance and large-scale transmission of renewable hydrogen in China: Pipelines vs. UHV. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58), 24635–24650. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.066>



Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>



USE OF LIFE CYCLE ANALYSIS IN CABLE PRODUCTION

Cemal Meran:

Prof.Dr., Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Denizli, cmeran@pau.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-1813-7166>

Ömer Eren:

Nexans Türkiye Endüstri, Denizli Ar-Ge Merkezi, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0006-3041-1224>

Adnan Bahar:

Nexans Türkiye Endüstri, Denizli Ar-Ge Merkezi, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0004-3419-5974>

Duygu Lebeoğlu:

Nexans Türkiye Endüstri, Denizli Ar-Ge Merkezi, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0001-0169-6826>

Oğuzhan Öztürk:

Nexans Türkiye Endüstri, Denizli Ar-Ge Merkezi, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0000-5249-3052>

Ela Kılıç Kara:

Nexans Türkiye Endüstri, İstanbul Ar-Ge Merkezi, ORCID No: <http://orcid.org/0009-0000-9790-1611>

Keywords

Life cycle analysis, Eco Passport, PEP, cable production, LCA, carbon footprint

Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) is a concept that has been on the agenda in recent years and will be of great interest to all manufacturing companies in the near future. LCA is a scientific method in which the environmental impacts and pollution that occur in all stages of a product or service from cradle to grave, such as production, consumption and disposal, are calculated in accordance with ISO 14040/44 standards. In order to gain competitive advantage, companies analyze the environmental impacts of their products in detail, identify the components that cause environmental pollution during production one by one and try to find solutions to reduce them as much as possible. Which raw materials were used in the production process in the LCA calculation, where do they come from? What about soil, seeds and fertilizer? How are the products produced? What about heating, water and ventilation? During the transportation of raw materials to the production facility and the delivery of the final product to the customer, which route were the raw materials and the final product transported, which countries did they pass through, what are the correction factors of these countries? How many kilometers from where to where and how were the products transported? Environmental impacts from transportation such as truck, ship and air transportation should also be taken into account. In this study, how life cycle analysis is performed on a cable type produced in Nexans cable factory is given in detail. The international standards that should be taken as basis during the analysis and their requirements will be explained. In the study, concepts such as PEP, EPD, ECO cable, ECO PASSPORT, BREEAM, LEED certification, which will be faced by many more manufacturers in our country in the near future, are mentioned.

* cmeran@pau.edu.tr

doi : 10.46399/muhendismakina.1647878

YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİNİN KABLO ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Anahtar Kelimeler

Öz

Yaşam döngüsü analizi, Eco Passport, PEP, kablo üretimi, LCA, karbon ayak izi

Yaşam Döngüsü Analizi (daha yaygın bilinen tanımıyla Life Cycle Assessment /LCA) son yıllarda gündemde olan ve yakın gelecekte ise üretim yapan tüm firmaları oldukça fazla ilgilendirecek olan bir kavramdır. LCA bir ürün veya hizmetin üretimi, tüketimi ve bertarafı gibi beşikten mezara tüm aşamalarında ortaya çıkan çevresel etki ve kirliliklerin ISO 14040/ISO 14044 standartlarına uygun olarak hesaplandığı bilimsel bir yöntemdir. Şirketler rekabet avantajı elde etmek için ürünlerinin çevresel etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmekte, üretim esnasında çevre kirliliğine sebep olan bileşenleri tek tek belirleyip, mümkün olabildiğince azaltmak için çözümler üretmeye çalışmaktadır. LCA hesabında üretim sürecinde hangi hammaddeler kullanıldı, bunlar nereden geliyor? Toprak, tohum ve gübre ne olacak? Ürünler nasıl üretiliyor? Isıtma, su ve havalandırma nasıl? Hammaddenin üretim tesisine ulaştırılması ve nihai ürünün müşteriye teslimatı esnasında hammaddeler ve nihai ürün hangi güzergahtan taşındı, hangi ülkelerden geçti, bu ülkelerin düzeltme faktörleri nelerdir? Ürünler nereden nereye kaç km mesafede ve nasıl taşındı? Kamyon, gemi ve hava taşımacılığı gibi nakliyeden kaynaklanan çevresel etkiler de hesaba katılmalıdır. Bu çalışmada Nexans kablo fabrikasında üretilmekte olan bir kablo türü üzerinden yaşam döngüsü analizinin nasıl yapıldığı detayları ile verilmiştir. Analiz esnasında esas alınması gereken uluslararası standartlar ve bunların istekleri açıklanacaktır. Çalışmada PEP, EPD, ECO kablo, ECO PASSPORT, BREEAM, LEED sertifikası gibi yakın zamanda ülkemizde çok daha fazla üreticinin yüz yüze geleceği kavramlardan bahsedilmiştir.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 05.03.2025

Kabul Tarihi : 25.04.2025

Research Article

Submission Date : 05.03.2025

Accepted Date : 25.04.2025

Extended Abstract

Introduction

Life Cycle Assessment (LCA) is a concept that has been on the agenda in recent years and will be of great interest to all manufacturing companies in the near future. LCA is a scientific method in which the environmental impacts and pollution that occur in all stages of a product or service from cradle to grave, such as production, consumption and disposal, are calculated in accordance with ISO 14040/44 standards. LCA measures the environmental impact of a product throughout its entire life cycle. The life cycle is divided into five main stages which are raw material acquisition, production and processing, transportation, consumer use & retail, end of life. In order to gain competitive advantage, companies analyze the environmental impacts of their products in detail, identify the components that cause environmental pollution during production one by one and try to find solutions to reduce them as much as possible. Which raw materials were used in the production process in the LCA calculation, where do they come from? What about soil, seeds and fertilizer? How are the products produced? What about heating, water and ventilation? During the transportation of raw materials to the production facility and the delivery of the final product to the customer, which route were the raw materials, and the final product transported, which countries did they pass through, what are the correction factors of these countries? How many kilometres from where to where and how were the products transported? Environmental impacts from transportation such as truck, ship and air transport should also be taken into account. The environmental impact of the cable needs to be calculated throughout all stages of the cable's life cycle, from the production and supply of raw materials, design and production of the cable, transportation of the produced cable to different locations, installation and use of the cable, end of life and recycling and/or disposal of the cable.

Objectives

This work is prepared to explain how a life cycle analysis is performed on a type of cable produced in the Nexans cable factory. International standards and their requirements that should be taken as basis during the analysis will be explained. In the study, concepts such as PEP, EPD, ECO cable, ECO PASSPORT, BREEAM, LEED certification, which will be faced by many more manufacturers in our country in the near future, are mentioned. In terms of ecological cable production, it is necessary to comply with certain standards, notably ISO 14020, ISO 14021, ISO 14024, ISO 14025, ISO 14040, CPF ISO 14067, and to know some concepts such as PEP, EPD, ECO cable, ECO PASSPORT, BREEAM, LEED Certification. ISO 14020: defines common terms and definitions, principles and general requirements for all environmental practices, declarations (e.g. self-declared environmental claims, eco-labels, EPDs and footprint communications) and related programs to communicate environmental aspects and the environmental impact of products. In the PEP development process, a manufacturer needs to create design teams that have a good command of the process and integrate QHSE (Quality, Health, Safety and Environment) units into the process. In particular, they will need to prioritize eco design that reduces the carbon footprint, underground resources,

energy consumption in the production process and the amount of water consumed, especially the type and amount of material to be used in their production and even in product packaging. When Nexans applies life cycle thinking quantitatively, it can be used to communicate to customers about the environmental performance of products. This is called a Product Environmental Profile. In the PEP, the simulated environmental performance of a Nexans product is measured by different environmental indicators, such as air acidification, global warming or resource depletion, taking into account all life cycle stages of the product (copper extraction, energy losses in use, etc.). To do this, information is collected on everything that is needed from the environment and everything that goes into the environment. They are then classified in terms of which environmental phenomenon they contribute to in order to characterize them in terms of environmental indicators. Within the scope of this study, a PEP report for the Cu/XLPE/SWA/LSZH $S \leq 25 \text{ mm}^2$ cable family manufactured at Nexans is presented. PEP shows the environmental impact of a product or product family. PEP relates to all products in the range CU/XLPE/SWA/LSZH $S \leq 25 \text{ mm}^2$ and the reference product of PEP is CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16.

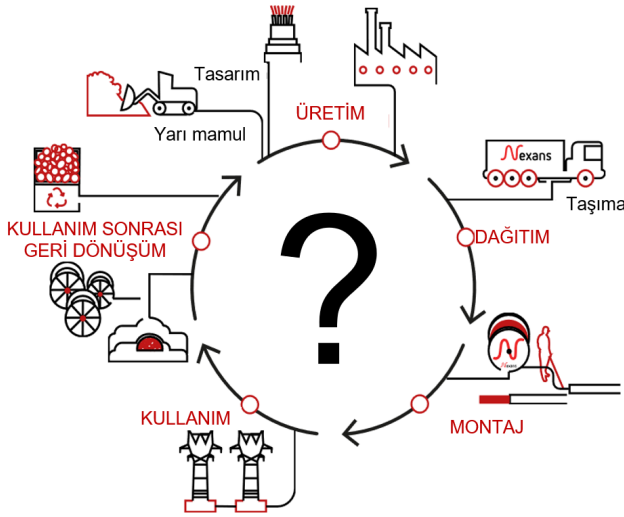
Conclusion

This study emphasizes the importance of eco-passported products, which we will see much more frequently in the near future, through a cable production process. Today, sustainability has become one of the top priorities of consumers and companies. In this context, it is clear that it is very important for our country to be prepared for the Eco PassPorted product issue, which has started to be implemented and will put many manufacturers under pressure in the near future. Regardless of the sector, it will become mandatory for our manufacturers to have an Eco PassPort product in the near future, especially when selling to Europe. While making any purchase, it will be possible to ask for the limits below which the mentioned values should be in the offer and documented proof of this approved by impartial organizations. The fact that brands and manufacturers have eco passports makes them a reliable source. It will be necessary for the relevant institutions and organizations to carry out awareness-raising and informative studies on eco passport without delay and to provide the necessary consultancy services.

1. Giriş

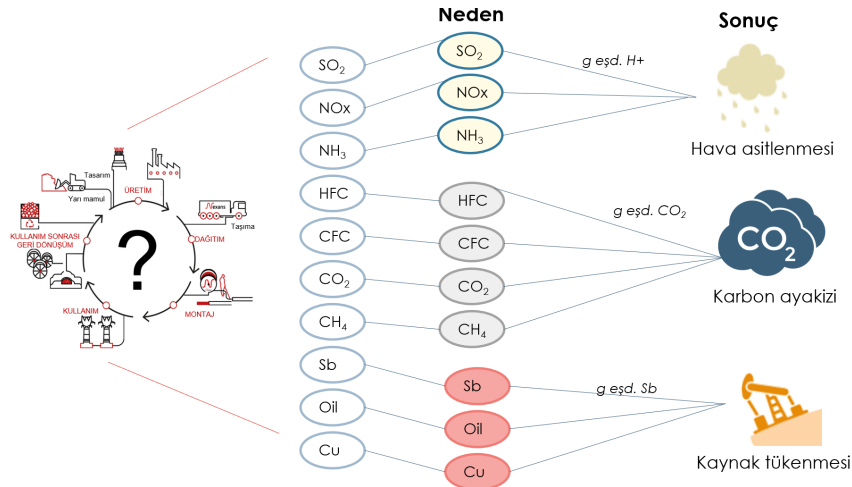
Yaşam Döngüsü Analizi (LCA), bir ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca çevreye olan etkisini ölçer. Yaşam döngüsü beş ana aşamaya ayrılmıştır. Bunlar;

- Hammadde eldesi,
- Üretim ve İşleme
- Taşıma
- Tüketici Kullanımı & Perakende
- Yaşamın Sonu



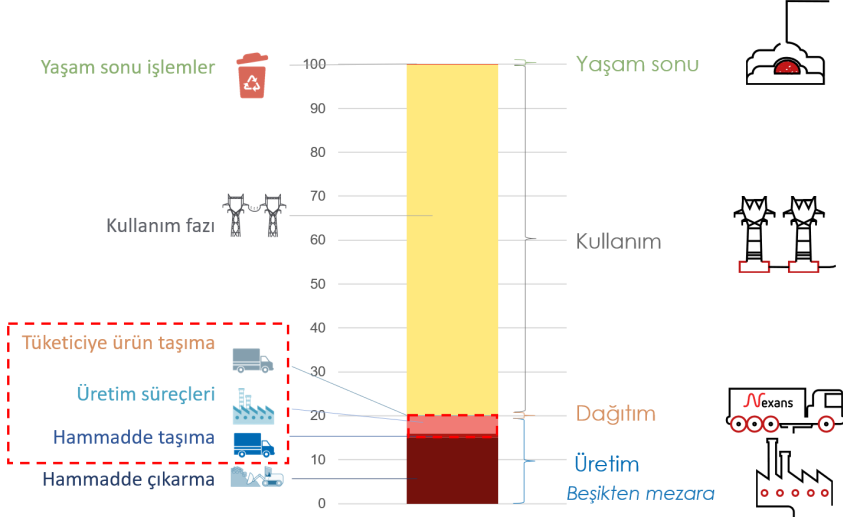
Şekil 1: Kablonun yaşam döngüsünün tüm aşamaları boyunca çevresel etkisini ölçme süreci

Kablonun yaşam döngüsünün tüm aşamaları boyunca hammadde üretimi ve temini, kablounun tasarımı ve üretimi, üretilen kablounun farklı lokasyonlara taşınması, kablounun kurulumu ve kullanımı, kablounun ömrünü tamamlaması ve geri dönüşümü ve/veya bertarafı aşamalarında çevresel etkisinin hesaplanması gerekir, **Şekil 1**. Literatürde kablo üretimine yönelik çok sayıda yaşam döngüsü analizi içeren çalışmalar bulunmaktadır (Bao ve diğ., 2017; Crawford ve diğ., 2010; Na ve diğ., 2021; Simonson ve diğ., 2003; Zackrisson ve diğ., 2014)



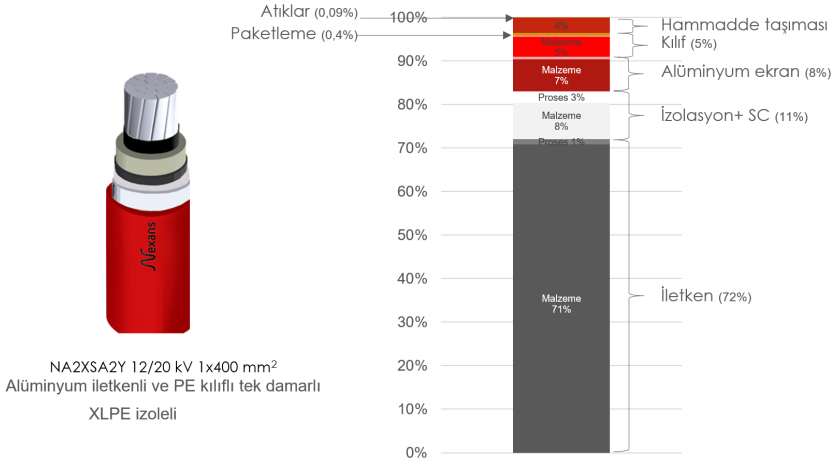
Şekil 2: Kablo üretiminde ortaya çıkan madde ve sonuçlar için akış listesi

Ürün niteliğine bağlı olarak yaşam döngüsü içinde farklı türde gazlar, emisyonlar ve maddeler ortaya çıkabilmektedir. Kablo üretimi yaşam döngüsü içinde ortaya çıkan gazlar ile antimon, yağ ve bakır gibi maddeler **Şekil 2'**de verilmiştir. Bu gazların havada asit miktarının artması yanında önemli bir karbondioksit kaynağı olduğu ayrıca doğadaki sınırlı kaynakların da tükenmesine yol açtığı görülmektedir.



Şekil 3: Kablo karbon ayak izine süreçlerin etkisi

Kablonun yaşam döngüsü içinde karbon ayak izine hammadde çıkarma taşıma, üretim ve dağıtım süreçlerinin etkisinin yaklaşık % 20 civarında olduğu görülürken, asıl etkinin kullanım esnasında ortaya çıktığı görülmektedir, **Şekil 3**.



Şekil 4: NA2XSA2Y 12/20 kV 1x400 mm2 kablonun üretimi esnasında karbon ayak izine etki eden faktörler

Alüminyum iletkenli ve PE kılıflı tek damarlı XLPE izoleli NA2XSA2Y 12/20 kV 1x400 mm² kablo, üretimi esnasında karbon ayak izine etki eden faktörler açısından değerlendirildiğinde, alüminyum iletkenin % 70 civarında etkiye sahip olduğu görülmektedir, **Şekil 4**. Proses ve malzeme birlikte göz önüne tutulduğunda %11 izolasyon ve yarı iletken, % 7 alüminyum ekran, % 5 kılıf ve % 4'de hammadde taşınımının diğer karbon ayak izi kaynakları olduğu anlaşılmaktadır.

2. Çevresel Ayak İzi ve İlgili Standartlar

PEP Ecopassport®, kablo ve elektrik-elektronik ürünler için geliştirilmiş bir Tip III çevresel ürün bildirimi programıdır (URL-1). Ekolojik kablo üretimi açısından ISO 14020, ISO 14021, ISO 14024, ISO 14025, ISO 14040, CPF ISO 14067 başta olmak üzere belirli standartlara uyulması ve PEP, EPD, ECO cable, Ecopassport, BREEAM, LEED Sertifikası gibi bazı kavramların bilinmesi gerekir. ISO14020: tüm çevresel uygulamalar için ortak terimler ve tanımlar, ilkeler ve genel gereklilikler, beyanlar (örn. kendi beyan ettiği çevresel iddialar, eko-etiketler, EPD'ler ve ayak izi iletişimleri) ve çevresel boyutların iletişimini sağlayan ilgili programlar ve ürünlerin çevresel etkilerini tanımlamaktadır. PEP'e ihtiyaç duyulmasının sebepleri dört başlık altında toplanabilir;

- **Mevzuat & Standartlar;** Bina uygulamalarına yönelik ürünler için bir çevre beyanı (PEP) gereksinimi,
- **Pazarlama stratejisi;** İddia, dönüşüm ve iyileştirme için ölçüm. Örneğin Nexans ürünlerini rakiplerden farklılaştırmak
- **Yatırımcılar & Müşteriler;** Son 2 yıldan bu yana ürünlerin çevresel/karbon ayak izlerine yönelik müşterinin talepleri hızla artması
- **Grup İddiası;** Nexans, 2030 yılına kadar karbon nötür ve 2050 yılına kadar karbon net sıfır hedeflerine katkıda bulunmayı taahhüt etmiştir. Karbon emisyonlarının azaltılması için ölçülmesi gerekir.

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), binaların çevresel performansını değerlendiren ve sürdürülebilirlik standartlarına uygunluğunu belirleyen bir yeşil bina sertifikasyon sistemidir.

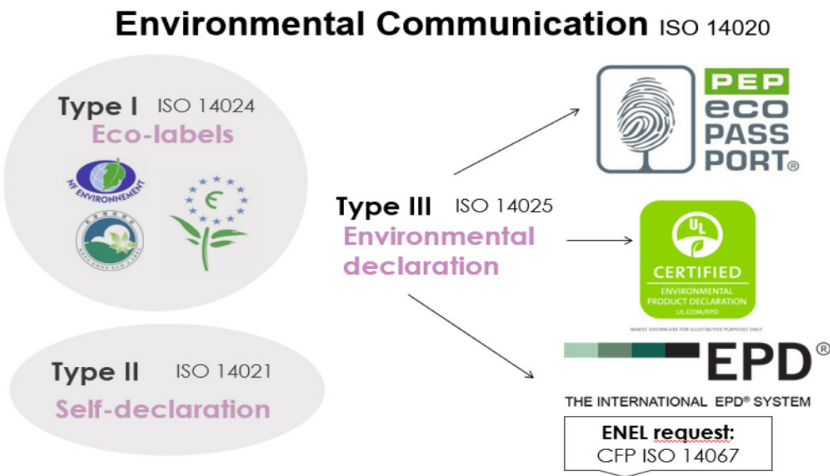
LEED Sertifikası, USGBC (United States Green Building Council), yani Amerikan Yeşil Binalar Konseyi tarafından geliştirilmiş, yeşil binaları derecelendiren bir sistemdir. Sertifikanın amacı, bina ve kent ölçeğinde çevreye duyarlı tasarım, uygulama ve işletme standartlarını geliştirmek ve yaymaktır.

Yeşil Bina Sertifikası, bir yapının sürdürülebilir ve çevre dostu standartları karşıladığını belirtir. Bu sertifika, enerji verimliliği, kaynakların korunması ve çevre dostu malzemelerin kullanımı gibi faktörlere dayanarak verilir.

PEP Ecopassport'a <http://www.pep-ecopassport.org//> web sayfası üzerinden giriş yapılabilmektedir.

Bir imalatçının PEP gelişim sürecinde sürece hakim tasarım takımlarının oluşturulması, QHSE (Kalite, Sağlık, Güvenlik ve Çevre) birimlerini sürece entegre

etmesi gereklidir. Özellikle üretimlerinde ve hatta ürün paketlenmesinde kullanılacak malzeme türü ve miktarının bile karbon ayak izini, yeraltı kaynaklarını, üretim sürecindeki enerji sarfiyatını ve harcanan su miktarını düşürücü eko tasarım(eco design)ı öncelemeleri gerekecektir.



Şekil 5: Çevresel iletişim ISO 14020

Şekil 5’de görülen Tip I, Tip II ve Tip III’ün özellikleri aşağıda detaylıca verilmiş ve birbirlerinden farklılıkları açıklanmıştır.

2.1 ISO 14024 Tip I

ISO 14024, çevresel etiketleme için genel prensipleri belirleyen uluslararası bir standarttır ve özellikle **Tip I çevre etiketlerini** tanımlar. Bu tip etiketleme, bir ürünün veya hizmetin belirli çevresel kriterlere göre bağımsız bir üçüncü tarafça değerlendirildiği gönüllü bir sistemdir.

ISO 14024 Tip I çevre etiketi özellikleri:

- **Gönüllü bir sistemdir:** Firmalar bu etiketi almak için gönüllü olarak başvururlar, zorunlu bir uygulama değildir.
- **Üçüncü taraf değerlendirmesi:** Ürün veya hizmet, bağımsız bir kuruluş tarafından önceden belirlenen çevresel kriterlere göre değerlendirilir ve onaylanır.
- **Çoklu kriter yaklaşımı:** Bu standart, sadece tek bir çevresel faktöre değil (örneğin sadece enerji verimliliği gibi), birden fazla çevresel etkiye (örneğin atık, su kullanımı, enerji verimliliği, malzeme kullanımı vb.) odaklanır.
- **Eko-Etiket:** Bu etiket, tüketicilere ürünün çevresel açıdan tercih edilebilir olduğunu gösterir. Etiket, ürünün yaşam döngüsü boyunca çevreye zarar vermediği veya çevresel performansının yüksek olduğu anlamına gelir.

ISO 14024'ün amacı:

Bu standart, tüketicilere çevresel etkisi daha az olan ürünleri tanımlarını sağlarken, üreticileri de daha sürdürülebilir üretim yöntemleri benimsemeye teşvik eder. Tip 1 çevre etiketleri, özellikle daha yeşil ürünleri tercih eden tüketiciler için önemli bir rehber işlevi görür.

Örnek: **EU Ecolabel** (Avrupa Birliği Eko-Etiketi), ISO 14024'e göre Tip 1 etiketleme sistemine bir örnektir.

Bu tür çevre etiketleri, çevre dostu ürünlerin yaygınlaşmasına ve sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarının gelişmesine katkıda bulunur.

2.2. ISO 14021 Tip II

ISO 14021, çevresel etiketleme ve beyanlar konusunda ikinci tip olarak tanımlanan standarttır ve özellikle **"kendi kendine beyan edilen"** çevresel iddiaları düzenler. Tip 2 çevresel etiketleme, üretici veya hizmet sağlayıcının kendi ürününe dair yaptığı çevresel iddiaları içerir ve bu iddialar **üçüncü taraf onayı olmadan** yapılabilir.

ISO 14021 Tip II'nin özellikleri:

- **Kendi kendine beyan:** Bu tür etiketlemelerde, ürünün çevresel özellikleri üretici veya satıcı tarafından doğrudan belirtilir. Üçüncü taraf sertifikasyonu gerekmez.
- **İddiaların doğruluğu:** Üreticilerin veya satıcıların yaptıkları çevresel iddialar (örneğin "geri dönüştürülebilir", "biyolojik olarak parçalanabilir", "enerji tasarruflu" vb.) doğruluk ve şeffaflık ilkelerine dayanmalıdır. Yanıltıcı veya yanlış bilgi verilmesi engellenmelidir.
- **Tanımlanan kriterler:** ISO 14021, sıkça kullanılan çevresel terimler ve iddialar için rehberlik eder. Bu sayede, firmaların "çevre dostu" gibi genel ifadeler kullanıp tüketicuyu yanıltmasının önüne geçer. Standart, belirli terimlerin nasıl kullanılabileceğini ve hangi kriterlerin karşılanması gerektiğini detaylandırır.

ISO 14021 kapsamında yaygın olarak kullanılan bazı çevresel iddialar:

- **Geri dönüştürülebilir:** Ürünün veya ambalajın geri dönüştürülebileceği anlamına gelir.
- **Biyolojik olarak parçalanabilir:** Ürünün doğal süreçlerle çevreye zararsız şekilde parçalanabileceğini ifade eder.
- **Enerji tasarruflu:** Ürünün kullanımı sırasında enerji tüketiminin düşük olduğunu belirtir.
- **Kompostlanabilir:** Ürünün organik atık olarak kompostlanabilir olduğunu gösterir.

- **Azaltılmış çevresel etki:** Ürünün üretimi, kullanımı veya bertarafı sırasında çevresel etkilerinin azaltıldığını ifade eder.

Temel farklar:

- **Tip I** (ISO 14024) etiketi bağımsız bir üçüncü taraf onayını gerektirirken, **Tip II** (ISO 14021) tamamen üretici veya satıcının kendi beyanlarına dayanır.

Tip II'nin avantaj ve dezavantajları:

- **Avantajlar:** Hızlı ve düşük maliyetli uygulamadır, üçüncü taraf denetimi gerektirmediği için daha esnek bir yöntemdir.
- **Dezavantajlar:** Yanıltıcı veya abartılı iddialar yapılabilir, bu nedenle tüketici güveni genellikle Tip 1 etiketleme sistemlerine göre daha düşük olabilir.

Sonuç olarak, ISO 14021 Tip 2, çevre iddialarını standart bir çerçeveye oturtmayı hedeflerken, bu iddiaların güvenilirliğinin sağlanması büyük ölçüde üreticinin etik anlayışına ve doğrulama süreçlerine bağlıdır.

2.3. ISO 14025 Tip III

ISO 14025, çevresel etiketleme ve beyanlar konusunda **çevresel ürün beyanlarını (EPD - Environmental Product Declaration)** kapsayan üçüncü tip çevre etiketi olarak tanımlanır. ISO 14025, ürünlerin çevresel etkilerinin şeffaf ve tarafsız bir şekilde sunulmasını amaçlayan bir sistemdir ve bu beyanlar, bağımsız bir **üçüncü taraf denetimi** ve doğrulaması gerektirir.

ISO 14025 Tip III'ün özellikleri:

- **Çevresel Ürün Beyanı (EPD):** Tip 3, ürünün yaşam döngüsü boyunca çevreye olan etkilerini ayrıntılı ve sayısal verilerle açıklayan belgeleri içerir. Bu beyanlar, ürünün hammaddeden bertarafına kadar tüm aşamalarındaki çevresel etkilerini kapsar.
- **Üçüncü taraf doğrulaması:** Üreticinin sunduğu bilgiler bağımsız bir üçüncü taraf tarafından doğrulanır ve onaylanır. Bu, EPD'nin doğruluğunu ve güvenliğini artırır.
- **Yaşam Döngüsü Analizi (LCA):** Tip 3 beyanları, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini analiz eden **LCA** raporlarına dayanır. Bu, hammadde çıkarımından üretime, kullanım aşamasından bertarafa kadar tüm süreçleri içerir.
- **Şeffaflık ve karşılaştırılabilirlik:** Tip 3 etiketleme, ürünler arasında karşılaştırılabilirlik sağlar. Çevresel performans verileri objektif ve bilimsel temellere dayalı olarak sunulduğundan, tüketiciler ve profesyoneller bu bilgileri doğrudan kıyaslayabilir.

Tip III çevresel etiketinin temel amacı:

- **Şeffaf bilgi sunumu:** EPD'ler, tüketicilere ve paydaşlara bir ürünün çevresel etkileri hakkında sayısal ve objektif bilgiler sunarak bilinçli kararlar almalarını sağlar.
- **Karşılaştırma imkanı:** Aynı kategorideki farklı ürünlerin çevresel performansını karşılaştırma imkanı verir. Özellikle inşaat sektörü, kamu ihaleleri ve sürdürülebilirlik projeleri gibi alanlarda ürünlerin çevresel etkilerinin şeffaf bir şekilde sunulması önemlidir.
- **Küresel geçerlilik:** ISO 14025 standardı dünya genelinde geçerli olup, uluslararası düzeyde sürdürülebilirlik hedeflerini karşılayan ürünler için önemli bir referans oluşturur.

ISO 14025'in uygulama alanları:

Tip III çevresel beyanlar, özellikle aşağıdaki sektörlerde yaygın olarak kullanılır:

- **İnşaat ve yapı malzemeleri:** Beton, çelik, cam gibi malzemelerin çevresel etkilerinin ölçülmesi ve beyan edilmesi.
- **Enerji sektörü:** Enerji üretim ve dağıtım sistemlerinin çevresel performansının değerlendirilmesi.
- **Tüketim ürünleri:** Elektronik, tekstil ve diğer tüketim ürünlerinin yaşam döngüsü etkilerinin analiz edilmesi.

Temel farklar:

- **Tip I (ISO 14024):** Bağımsız üçüncü taraf onayıyla verilen ve çoklu çevresel kriterlere dayanan bir çevre etiketi.
- **Tip II (ISO 14021):** Üretici veya satıcı tarafından kendi kendine yapılan çevresel beyanlar.
- **Tip III (ISO 14025):** Ürünlerin çevresel performansını, yaşam döngüsü verilerine dayanan ve üçüncü tarafça doğrulanan beyanlarla şeffaf bir şekilde sunan sistem.

Tip III'ün avantajları:

- **Bilimsel ve objektif veriler:** Sayısal temellere dayalı, detaylı ve güvenilir çevresel bilgiler sunar.
- **Güvenilirlik:** Üçüncü taraf doğrulaması olduğu için güvenilir bir kaynaktır.
- **Karşılaştırılabilirlik:** Aynı kategoriye ait ürünlerin çevresel performansını kıyaslama olanağı verir.

ISO 14025 Tip III beyanları, özellikle çevresel etkiler konusunda kapsamlı ve güvenilir bilgi arayan profesyoneller ve kurumlar için önemli bir araçtır.

Tip III'de bahsi geçen Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde (LCA) çevresel açıdan bir kablo yaşam döngüsünü tanımlamak için bir kablonun nasıl elde edileceğinin sorgulanması gerekir. Kablo tasarımı, ürünün hangi malzemeden yapılacağına

dair bir fikir verir ve bu da bize bir ürün yaşam döngüsünün ilk unsurunu sağlar: Hammadde çıkarma, ürüne dönüştürme, dağıtım, kurulum ve tabii ki bu ürünün kullanımı sona erdiğinde ne yapılacağını da sorulması gerekir. Bir kablunun kullanım ömrünün sonunda çeşitli alternatif yollar mevcuttur: örneğin düzenli depolama, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı, vs.

Burada geçen diğer bir kavram ise PEP (Product Environmental Profile) bir ürün veya ürün ailesinin çevresel etkilerini vermektedir. EPD ve PEP ifadeleri aslında ilintilidir. EPD standartta geçen hali iken PEP ise elektronik ekipmanlar için oluşturulmuş olan bir EPD'dir. PEP İngilizce, Fransızca, Almanca, Hollandaca, İspanyolca ve Portekizce olmak üzere altı dilde oluşturulabilir.

3. Bir Kablo İçin Eco Passport Belgesi

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Nexans yaşam döngüsü düşüncesini niceliksel olarak uyguladığında, ürünlerin çevresel performansı hakkında müşterilerle iletişim kurmak için kullanılabilir. : Ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevreye olan etkilerini raporlayan beyanları doğrulama sertifikasına Ürün Çevre Profili denir. PEP'te bir Nexans ürününün simüle edilmiş çevresel performansı, ürünün tüm yaşam döngüsü aşamaları (bakır çıkarma, kullanımdaki enerji kayıpları vb.) göz önünde bulundurularak, hava asitlenmesi, küresel ısınma veya kaynakların tükenmesi gibi farklı çevresel göstergeler ile ölçülmektedir. ölçülmektedir. Bu kapsamda, çevreden elde edilen tüm kaynaklar ve çevreye geri dönen tüm çıktılar hakkında bilgi toplanmaktadır. Daha sonra bunları çevresel göstergeler açısından karakterize etmek için hangi çevresel olaya katkıda bulundukları açısından sınıflandırılmaktadır. Ürün için bir çevre pasaportu oluşturulur ve 5 yıl geçerlilik süresi vardır.

Çevresel etkilerin bu şekilde ölçülmesi, çevresel iletişim için kullanılmasının yanı sıra, Nexans'ın eko-tasarıma yönelik küresel yaklaşımının da ilk adımıdır.

Yaşam döngüsü üzerindeki etkilerin ilk ölçümünden sonra, yenilikçi fikirler geliştirirsiniz, yaşam döngülerini tekrar değerlendirirsiniz. Örneğin bir PEP aracılığıyla müşterilerinize güvenilir, şeffaf ve karşılaştırılabilir bilgiler iletmekten önce en uygun çözümleri karşılaştırmak ve seçmek için kullanılabilir. Nexans ekibini, bir ürünün erken geliştirme aşamasında çevresel konuları dikkate alma ve ürünün çevresel etkilerini mümkün olan en kısa sürede azaltmanın yolunu bulma ve sonuçta müşterilerimize eko-tasarımlı ürünler sunma konusunda desteklemektedir.

Şekil 6'da Nexans'ta üretilen Cu/XLPE/SWA/LSZH S≤25 mm² kablo ailesine ait PEP raporu verilmiştir. PEP bir ürün veya ürün ailesinin çevresel etkilerini göstermektedir. Tek bir ürüne ait hazırlanan PEP 4 sayfa, bir ürün ailesine ait hazırlanan PEP ise 6 sayfadan oluşmaktadır. PEP İngilizce, Fransızca, Almanca, Hollandaca, Portekizce ve İspanyolca olmak üzere otomatik olarak 6 dilde oluşturulabilir. Raporda kapak sayfasında ürün çevresel profili tanımlanmakta, ürünün ait olduğu teknik aile, ürün adı, bu ürüne ait PEP Eco pasaport No, bu pasaportun yukarıda açıklanan Tip I, Tip II ya da Tip III'den hangi kapsamda olduğu verilmiştir. Kapak sayfasında PEP ecopassport® programındaki Ürün Kategori

Kurallarının (PCR) teller, kablolar ve aksesuarlar kategorisine ait olduğu belirtilmiştir. PEP, CU/XLPE/SWA/LSZH $S \leq 25\text{mm}^2$ aralığındaki tüm ürünlerle ilgilidir ve PEP'in referans ürünü CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16'dır.

PEP belgesi 1. Bölümde I. Ürünler ve taahhütler hakkında bilgiler sunulmuştur. Bu manada Nexans'ın Kurumsal Sosyal Sorumluluk Taahhüdü, Referans Ürün tanımı, kapsanan ürünler, fonksiyonel birim ve malzeme bileşenleri alt başlıkları bulunmaktadır.

- Nexans taahhüdü kurumsal sosyal sorumluluk, çevresel, ekonomik ve sosyal yönlerin kesişim noktasıdır ve Nexans'ın stratejisinin ayrılmaz bir parçasıdır. Nexans, Aralık 2008'den beri Birleşmiş Milletler Küresel İlkeler Sözleşmesi'ni desteklemekte ve Sürdürülebilir Kalkınmayı tüm seviyelerde entegre etmek için iç eylem planları uygulamıştır. Bu, sorumlu yönetimi, çalışanlar için sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamını, Nexans Karbon Nötrlük stratejisi aracılığıyla azaltılmış küresel karbon ayak izini içermektedir.
- Referans ürün CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16 olup, enerji ağlarında, otellerde, okullarda, tünellerde, yüksek yapılar, hastaneler, enerji santralleri, veri işleme merkezleri, yangın riski bulunan iş merkezlerinde kullanılır diye tanımlanmıştır.
- Kapsanan ürünler başlığı altında belirtilen ürünlerin PEP ecopassport® programındaki Ürün Kategori Kurallarının (PCR) Teller, Kablolar ve Aksesuarlar kategorisine ait olduğu belirtilmiştir. Bu başlık altında PEP, CU/XLPE/SWA/LSZH $S \leq 25\text{mm}^2$ aralığındaki tüm ürünlerle ilgilidir ve PEP'in referans ürünü CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16' şeklinde kapsamı tanımlanmıştır.
- Kablo fonksiyonları başlığı altında, standartta uygun olarak 30 yıl boyunca ve %70 kullanım oranı ile 1 km mesafe üzerinden 1A için ifade edilen enerjiyi iletmek olduğu belirtilmiştir.
- Kablo malzeme bileşenleri olarak ise %12,9 plastik, %67,2 metal ve % 19,8'de diğer malzemelerden oluştuğu belirtilmiştir.





Product Environmental Profile

Family technical name: CU/XLPE/SWA/LSZH S ≤ 25mm²

Family brand name: CU/XLPE/SWA/LSZH

Reference product name : CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16





2887
kg CO₂ eq.
Climate change - total



0,56931
kg Sb eq.
Resource use - minerals & metals (ADPe)



102,4
m³
Net use of fresh water



51604
MJ
Total Primary Energy

The above environmental impacts are "cradle to gate" or "Manufacturing phase" values (A1-A3)

PEP ecopassport N°: NXNS-00301-V01.01-EN Verifier accreditation N°: VH18 Date of publication: 10-2023	Product Category Rules: PEP-PCR-ed4-EN-2021 09 06 Product Specific Rules: PSR-0001-ed4-EN-2022 11 16 Program information & documents: www.pep-ecopassport.org Validity period: 5 years
Independent verification of the declaration and data, in accordance with ISO 14025 : 2006 Internal ☐ External ☒	
The PCR critical review was conducted by a panel of experts chaired by Julie Orgelet (Dalemain).	
PEP are compliant with XP C08-100-1 :2016 or EN 50693 The elements of the present PEP cannot be compared with elements from another program.	
Compliant with ISO 14025: 2006 "Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations".	

REALIZED BY: Adnan Bahar
Bozburun, Ahmet Nuri Erikoğlu Cd. No:2, 20020 Merkezefendi/Denizli,
adnan.bahar@nexans.com ☎ +903330428952

<https://www.nexans.com/csr.html>

Şekil 6: Cu/XLPE/SWA/LSZH S≤25 mm² kablo ailesine ait PEP Ecopassport Belgesinin orijinal hali

2. başlık olan yaşam döngüsü değerlendirme başlığı altında İmalat, dağıtım, kurulum, kullanım, ömür sonu

• Üretim başlığı altında; CU/XLPE/SWA/LSZH S≤25mm² serisindeki tüm ürünler Türkiye’de üretildiği, üretim aşaması için elektrik karışımı modelinin Türkiye’den alındığı belirtilmiştir. Türkiye’deki tüm Nexans tesisleri ISO14001 standardına göre sertifikalı bir Çevre Yönetim Sistemi uygulamakta olduğu, çevresel etkileri azaltmak için tasarlanmış ambalajlarla ilişkin:

- Ambalaj, geçerli standarda (94/62/EC sayılı Direktif) göre tasarlandığı,
- Referans ürünü taşımak için düşünülen ambalajın ahşap bir makara olduğu

ve bu ambalajın 1 kez kullanıldığı belirtilmiştir.

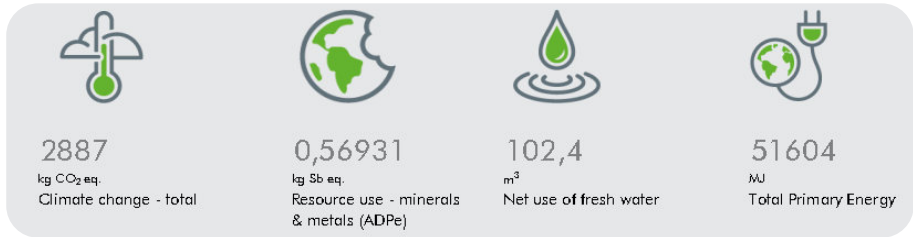
- Dağıtım aşamasının etki değerlendirmesi için nakliye senaryosu kıta içi kamyonla 3500 km yol kat edilmesi ele alınmıştır:

- Referans ürünün kurulum süreçleri için, PEP ecopassport® programından «Teller, Kablolar ve Aksesuarlar» için Ürün Özel Kurallar belgesine göre çalışmanın kapsamı dışında değerlendirildiği, bu aşamada sadece ürün kayıplarının ve ambalaj atıklarının % 5'nin dikkate alındığı belirtilmiştir.

2. başlık altında kullanıma ilişkin senaryonun 30 yıllık bir kablo kullanımı ve % 70 kullanım oranı için enerji tüketimi 423,11 kWh/km olarak hesaplanmıştır. Bu değer $I=1$ A için hesaplanmıştır. Kurulu kablonun etkin tüketimi için verilen değeri yoğunluğun karesi ile çarpmak gereklidir. Kullanım aşamasında dikkate alınan elektrik karışımı Avrupa'dır. Kabul edilen referans ömrü boyunca kablonun çalışmasını sağlamak için herhangi bir bakım gerekmediği kabul edilmiştir.

Kullanım ömrü sonu aşamasıyla ilgili etki analizi için seçilen nakliye senaryosu, kamyonla kat edilen 1000 km'dir. Kablolar, polimer ve metal parçaların ayrılması için bir öğütme süreci aracılığıyla geri dönüştürülmekte olduğu, ayrılan malzemelerin daha sonra geri dönüştürüldüğü, yakıldığı veya çöplüğe atıldığına varsayıldığı bu bölümde belirtilmektedir. Müşteri, kablolarını kullanım ömrü sonunda geri dönüştürmek isterse, Nexans, Nexans Geri Dönüşüm Hizmetleri (recycling.services@nexans.com) adındaki yapı aracılığıyla kabloların kullanım ömrü sonunda geri dönüştürülmesi konusundaki bilgi birikimine sahiptir ve polimerlerin ve metallerin geri dönüştürülmesi için kapsamlı bir çözüm sunmakta olduğunu beyan etmektedir.

Kapak sayfasında özellikle **Şekil 7**'de verildiği üzere CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16 referans ürünle ilgili çevresel ayak izi ile ilgili sayısal değerlerle özellikle belirtilmiştir. Çevresel ayak izi bir kişinin, şirketin, faaliyetin vb. çevre üzerindeki etkisinin yaşam döngüsü yaklaşımına dayalı olarak hesaplayan çok kriterli bir ölçüttür. Ekolojik ayak izi olarak da bilinen çevresel ayak izinin hesaplanması, belirli bir bölgedeki bir kişinin gıda, barınma, hareketlilik, mal ve hizmetlerini sağlamak için gereken toprak, su veya denizin hesaplanmasıyla başlar. Tahmin, kişinin ikamet ettiği alana bağlıdır. Bunun nedeni, ekosistemlerin biyolojik materyal üretme ve CO₂ absorbe etme kapasitelerinin farklı olmasıdır.



Şekil 7: Referans ürün CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16 kablo için hesaplanan bazı çevresel etki değerleri

Referans ürün CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16 kablunun Eco PassPort'unda hammaddeden geri bertarafına kadar olan yaşam döngüsü içinde hesaplamalara göre 2887 kg CO₂ eşdeğeri iklim değişikliğine, 0,56931 kg Sb (Antimon) eşdeğeri yeraltı mineral ya da metal kullanımına, 102,4 m³ net su tüketimine ve bunlarla beraberde 51604 MJ toplam enerji tüketimine etkisi olduğu deklare edilmektedir.

Eco PassPort 3. Bölümde çevresel etkilerle ilgili açıklamalara yer verilmiştir. Referans ürün CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16, PEP ecopassport® programından Ürün Kategori Kuralları (PEP-PCR-ed4-EN-2021 09 06) ve Ürün Özel Kuralları (PSR-0001-ed4-EN-2022 11 16) kapsamına girmektedir. PCR'ye göre, referans ürünün yaşam döngüsü etki değerlendirmesi, üretim, dağıtım, montaj, kullanım ve ömür sonunda aşamaları dikkate almaktadır.

Tüm gerekli hipotezler, referans ürün yaşam döngüsünün çevresel etkilerini değerlendirmek için önceki bölümlerde sunulmuştur (elektrik karışımı modelleri, kullanım senaryosu, vb.). Değerlendirmeyi gerçekleştirmek için kullanılan yazılım EIME 5.9.4'tür ve Nexans-2023-10 veri tabanını içermektedir.

CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16 için 1000 m kablo için üretim, dağıtım, kurulum, kullanım ve kullanım sonu ömür için hesaplanan kg CO₂ eşdeğeri, m³ eşdeğeri su tüketimi, kg Sb eşdeğeri olarak doğal maden ya da metal kullanımı, geri dönüştürülebilir malzeme, radyoaktif atık bertaraf miktarı, tehlikeli olan ya da olmayan atık miktarı vs. gibi onlarca çevresel etkiler tablo olarak verilmektedir. Ayrıca üretim ve paketlemedeki biyogenik karbon içeriği de kg cinsinden verilmektedir.

İlgili ürün pasaportunun son bölümünde ise aileye ait farklı kablolar için tabloda verilen değerleri hesaplamakta kullanılacak ekstrapolasyon kuralları, CU/XLPE/SWA/LSZH $S \leq 25\text{mm}^2$ aralığındaki 3 ürünün çevresel etki değerlendirme sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Bu kurallar referans ürün CU/XLPE/SWA/LSZH 3x16'dır. Referans ürünün ağırlığı 984,19 kg/km'dir. Referans ürün 2 aktif iletken ve 2,3 ohm/km/aktif iletken öz dirence sahiptir. Tablolarda verilen ekstrapolasyon kuralları 1000 m ürün için geçerli olup uygulanabildiği yerlerde ürün ağırlığı 1000 m kablo için kg cinsinden ifade edilmiştir.

4. Değerlendirme

Günümüzde sürdürülebilirlik, tüketicilerin ve şirketlerin en öncelikli konularından biri haline gelmiştir. Bu bağlamda, uygulanmaya başlayan ve yakın gelecekte birçok üreticiyi baskı altına alacak olan Eco PassPortlu ürün konusuna hazırlıklı

olmanın ülkemiz için çok önemli olduğu açıktır. Sektörün ne olduğundan bağımsız olarak üreticilerimizin yakın gelecekte özellikle Avrupa'ya satış yaparken öncelikle Eco PassPort'lu ürüne sahip olması zorunlu hale gelecektir. Bunun devamında ise hem **Şekil 7**'de belirtilen değerlerin düşüklüğüne göre yeni bir yarış ya da rekabet başlayacaktır. Herhangi bir alım yapılırken sözü edilen değerlerin teklifte hangi limitlerin altında olmasının gerektiği ve bunun da tarafsız kuruluşlarca onaylı belgeli ispatı istenebilecektir. Markalar ve üreticilerin eco passport sahibi olması onları güvenilir bir kaynak haline getirmektedir. Eco passport konusunda farkındalık yaratıcı ve bilgilendirici çalışmaların vakit geçirilmeden ilgili kurum ve kuruluşlarca yapılması, gerekli danışmanlık hizmetinin verilmesi gerekecektir.

Kaynaklar

- Bao, W., Lin, L., Song, D., Guo, H., Chen, L., Sun, L., Liu, M., & Chen, J. (2017), Comparative study on life cycle environmental impact assessment of copper and aluminium cables, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 94, Doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/94/1/012166>
- Crawford, L., Eckelman, M. J., & Zimmerman, J. (2010), Life Cycle Assessment of Overhead and Underground Primary Power Distribution Systems, *Environmental Science & Technology*, 44(14), 3784–3790, Doi: <https://doi.org/10.1021/es9037879>
- Na, KM., Jung, H. & Park, Y. (2021), Life-Cycle Assessment of a Railway Electric Power Feeding Cable for Replacement Planning: A Case Study of an Electric Railway in Korea. *J. Electr. Eng. Technol.* 16, 2275–2280. Doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00726-4>
- Simonson, M., Andersson, P., Emanuelsson, V., & Strippel, H. (2003), A life-cycle assessment (LCA) model for cables based on the fire-LCA model, *Fire and Materials*, 27(2), 71–89, Doi: <https://doi.org/10.1002/fam.818>
- Zackrisson, M., Jönsson, C., & Olsson, E. (2014), Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Waste Management—Plastic Cable Waste, *Advances in Chemical Engineering and Science*, 4(2), 195–203, Doi: <https://doi.org/10.4236/aces.2014.42025>
- URL-1: <http://www.pep-ecopassport.org> (Son Erişim Tarihi: 11.07.2025)



Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>



GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE TAKIM TEZGAHI TEKNOLOJİLERİNDEKİ GELİŞMELERİN GENİŞ BİR PERSPEKTİFLE İNCELENMESİ

*Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

Bölümü, Zonguldak

e-posta : aysegulcakir@beun.edu.tr , ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-0506-6522>

Anahtar Kelimeler

Öz

*Takım tezgahları,
Mekanizasyon,
Otomasyon,
Hibrit tezgahlar,
Akıllı makineler.*

Bu çalışmada, talaşlı imalat sektöründe kullanılan takım tezgahlarının teknolojik gelişimi, ilk çağlardan günümüze uzanan bir süreç içinde geniş bir bakış açısıyla incelenmiştir. Ayrıca bu gelişmelerin geleceğe yansıyacak olası etkileri de ele alınmıştır. Hedef malzemenin şekillendirilebilmesi için gerekli güç ve hareketi sağlayan sistemler olarak tanımlanabilecek takım tezgahlarının, öncelikle enerji kaynağındaki değişimlere paralel olarak evrildiği görülmüştür. Sonraki süreçte ise, takım hareketlerini sağlayan mekanizasyon sistemlerindeki ilerlemelere bağlı olarak geliştiği anlaşılmıştır. Zamanla, kesici takım ve tezgah hareketlerinin kontrolünü üstlenen otomasyon sistemlerinin gelişmesiyle, günümüzde yaygın olarak kullanılan bilgisayarlı sayısal denetim (CNC) özellikli takım tezgahlarının ilk örnekleri ortaya çıkmıştır. Malzeme bilimi, elektronik, bilgisayar yazılımı ve donanımı gibi alanlarda kaydedilen hızlı ilerlemeler, bu tezgahlarda mekanizasyon ve otomasyon sistemlerinin uyum içinde çalışmasını mümkün kılmıştır. Bu teknolojik gelişmeler, "yardımcı robotlar" olarak tanımlanan çevre ekipmanlarının ve karar destek görevini üstlenen uzman sistemlerin takım tezgahlarıyla entegre biçimde kullanılmasının önünü açmıştır. Böylece geniş kapsamlı bir kontrol ve karar alma ağı oluşturan bu sistem, bilgisayarla tümleşik imalat (CIM) kavramı altında tanımlanmıştır. Öte yandan, günümüzde kullanılmaya başlanan hibrit takım tezgahları sayesinde, talaşlı imalat işlemleriyle birlikte eklemeli imalat, kaynak gibi farklı üretim yöntemleri de aynı makinede gerçekleştirilebilmektedir. Tüm bu gelişmelere paralel olarak, bilgisayarla tümleşik imalat (CIM) ve bilgisayar destekli süreç planlama (CAPP) gibi alanlarda karar alma süreçlerinin, gelecekte tamamen yapay zeka destekli uzman sistemler aracılığıyla yürütüleceği öngörülmektedir. Ayrıca, yeni nesil akıllı takım tezgahlarında yeşil hidrojen, biyoyakıt ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir ve karbon nötr enerji kaynaklarının etkin biçimde kullanılacağı tahmin edilmektedir.

* aysegulcakir@beun.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1592292

A WIDE PERSPECTIVE REVIEW OF DEVELOPMENTS IN
MACHINE TOOL TECHNOLOGIES FROM PAST TO PRESENT

Keywords

Machine tools,
Mechanization,
Automation,
Hybrid machines,
Smart machines.

Abstract

In this study, the technological development of machine tools used in the machining sector has been examined from a broad perspective in a process extending from the early ages to the present. In addition, the possible effects of these developments that will be reflected in the future have been discussed. It has been observed that machine tools, which can be defined as systems that provide the necessary power and movement for the shaping of the target material, have evolved primarily in parallel with the changes in the energy source. In the following process, it has been understood that they have developed depending on the advances in the mechanization systems that provide tool movements. Over time, with the development of automation systems that undertake the control of cutting tool and machine movements, the first examples of machine tools with computer numerical control (CNC) features, which are widely used today, have emerged. Rapid advances in fields such as material science, electronics, computer software and hardware have made it possible for mechanization and automation systems to work in harmony in these machines. These technological developments have paved the way for the integrated use of peripheral equipment defined as "assistive robots" and expert systems that undertake decision support tasks with machine tools. Thus, this system, which creates a comprehensive control and decision-making network, has been defined under the concept of computer-integrated manufacturing (CIM). On the other hand, thanks to the hybrid machine tools that are now being used, different production methods such as additive manufacturing and welding can be carried out on the same machine along with machining processes. In parallel with all these developments, it is predicted that decision-making processes in areas such as computer-integrated manufacturing (CIM) and computer-aided process planning (CAPP) will be carried out entirely through artificial intelligence-supported expert systems in the future. In addition, it is estimated that renewable and carbon-neutral energy sources such as green hydrogen, biofuels and solar energy will be used effectively in the new generation of smart machine tools

Derleme Makalesi

Başvuru Tarihi : 27.11.2024

Kabul Tarihi : 28.04.2025

Review Article

Submission Date : 27.11.2024

Accepted Date : 28.04.2025

Extended Abstract

Introduction

Machine tools can be described as systems that provide power and movement to the cutting tool to shape the target material. These systems, which started to be used in the 12th century, have gone through different development stages and have reached the new generation versions described as smart machines today. In this research, first, detailed information about the machine tools used for the first time in history is given in a chronological manner. Then, the development stages in machine tool technology are given. In the next section, NC (Numerical Control) and CNC (Computer Numerical Control) automation systems are examined in detail and traditional machine tools used today and CNC machine tools are compared from various perspectives. Then, current developments in CNC machine tool technology and the reflections of these developments on the future are shared. In the last section, the conclusion section, the conclusions and suggestions related to the study are given.

Objectives/ Research Purpose

The main purpose of this study is to compile information about the first machine tools, step by step the stages through which these machines developed, current developments about these machines and the technological possibilities reflected in the future as a whole in the same article. In doing so, technology and history books, articles written on developments in this field, notes from courses on the subject taught at universities and industrial applications were used. While using these sources, research and publication ethics were followed. This study, which is considered to be of a quality that will shed light on researchers who want to see the history of machine tools as well as their development stages and the latest technologies in the same study, has the potential to feed the literature on the subject, especially in terms of the results achieved.

Results/Findings

The research and evaluations made in this study are given below.

- It is seen that machine tools have primarily developed according to the energy source (water, wind energy, steam pressure electrical energy) from which they receive their power.
- These developments were followed by the transfer of movement by designing the right systems. This power was transformed into movement with the most primitive mechanical systems. Over the years, the mechanical systems in machine tools have also developed.
- The development in mechanization technology was followed by the developments in automation systems. With automation systems, the decision-making power of humans could also be transferred to machine tools.
- With the use of computer technology in design and production, CAD/CAM/CNC (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacture / Computer Numerical Control) technologies have become widespread, and in addition, peripheral equ-

ipment called auxiliary robots and expert systems that support decision-making processes have begun to be used in integration with new generation computer-controlled machines.

- In addition, hybrid machine tools have begun to be used in recent years. With these machines, it is possible to perform other manufacturing processes (additive manufacturing, welding, etc.) on the same machine along with the machining process on the part.
- With Industry 4.0, new generation smart machine tools have become part of a platform that connects other machines, systems, data sources and people (operators, technicians, engineers, etc.).
- This extensive control and decision-making system is called Computer Integrated Manufacturing (CIM). As in every field, it is thought that decision-making processes in the field of CIM will be carried out entirely through artificial intelligence-supported expert systems in the coming years.
- It is evaluated that the number of unmanned factories will increase with the spread of these smart systems and industrial robots that work synchronously with high-tech machine tools, and that this development will cause the number of personnel to work as intermediate staff in the sector to decrease in the long term.
- In addition, it is predicted that efficient and environmentally friendly new energy sources such as green hydrogen, biofuels and solar energy will start to be used in machine tools in the future.

1. Giriş

İnsanoğlu ilk çağlardan beri ihtiyacını karşılayacak araç ve gereçler üretme konusunda, günümüzdeki talaşlı imalat işlemlerinin temeli olan yontma işlemini kullanmıştır. Bu işlemin taş veya ahşap malzemeler üzerinde uygulanması ile; kap ve çanak gibi beslenmede kullanılan gereçlerden, bıçak ve mızrak gibi savunma veya avlanma için kullanılan gereçlere kadar birçoğunun eldesi mümkün olabilmıştır. Önceleri yontma işlemi kesici bir alet ve insan gücü ile gerçekleştirilirken, sonraki çağlarda insan gücünün yerini alacak yeni enerji kaynaklarının keşfiyle yontma işlemi için tasarlanan ve adına takım tezgahı denilen sistemler tarafından gerçekleştirilmiştir.

Takım tezgâhları, hedef malzemenin şekillendirilebilmesi için kesici aracın güç ve hareketini sağlayan sistemler olarak tarif edilebilir. 12. yüzyılda kullanılmaya başlanan bu sistemlerde güç için su veya rüzgâr gibi doğal kaynakların çeşitli enerji tipleri kullanılmış; sonraki yüzyıllarda buhar kazanlarının icadıyla buhar basıncının enerjisinden faydalanılmıştır. Elektriğin bulunması ve elektrik motorlarının icadı ile birlikte takım tezgâhları ihtiyaç duydukları gücü elektrik enerjisinden karşılamaya başlamıştır (Strassmann, 1963; Woodbury, 1963). Günümüzde var olan takım tezgâhı sistemlerinde de bu enerji türü kullanılmaya devam etmektedir. Gelecek yüzyıllarda daha ekonomik, daha verimli ve daha çevreci yeni enerji kaynaklarının keşfiyle, takım tezgâhları için kullanılan enerji türünün de değişeceği değerlendirilmektedir. Kesicinin hareketi konusunda ise, ilk çağlarda insanın kas gücü ile sağlanan hareket; sonraları kullanılmaya başlanan takım tezgâhları sayesinde mekanik sistemlerle uygulanabilmıştır. Takım tezgâhı teknolojisindeki gelişmeler ile mekanik sistemler de gelişmiştir. Günümüzde kullanılan takım tezgâhları ise, mekanizasyon özelliğinin yanında, otomasyon özelliğine de sahiptir. Yani bu sistemler, kesici takımın hareketi için hem insan kas gücü yerine elektrik enerjisini kullanmakta, hem de insanın karar alma kabiliyetine benzer sanal bir karar alma gücüne sahip olabilmektedir (Altıntaş, 2012; Koren, et al., 1970).

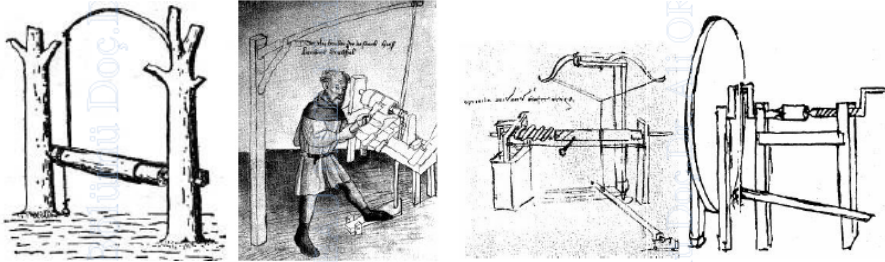
Son yıllarda özellikle savunma, havacılık ve uzay gibi alanlar için yüksek ısı ve mekanik dayanıma sahip olan ve süper alaşımlar olarak tanımlanan yeni nesil özel mühendislik malzemelerine olan ihtiyaç artmıştır. Bu tür malzemelerin talaşlı imalatla şekillendirilebilmesi ise ancak ileri teknolojiye sahip takım tezgahları ve kesici takımlarla mümkün olabilmektedir. Bu sebeple, teknoloji ilerledikçe takım tezgâhı teknolojisinin bu ilerleyişe paralel gelişmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Günümüzde yüksek hız takım tezgâhları adı verilen bu tezgahlar daha seri, hassas, güvenli, temiz üretim yaparken; en zor malzemeleri bile hatasız şekillendirebilen hareket iletim sistemleri, soğutma sistemleri, ölçme sistemleri, güç sistemleri ve otomasyon sistemleri ile donatılmıştır (Erer, 2011; Singh, 1996). Ayrıca yapay zekanın her alanda kullanılmaya başlaması, takım tezgahlarını da akıllı birer makine haline getirmeye başlamıştır.

Bu çalışmanın amacı, takım tezgahlarının tarihsel gelişim süreci ile mevcut teknolojik düzeyini ortaya koymak ve gelecekte ortaya çıkabilecek muhtemel yansımalarını bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmektir. Bu sayede, konuya ilgi duyan araştırmacıların geçmişten ilham alarak, takım tezgahı teknolojilerinin geleceğini daha geniş bir perspektiften ele almalarına katkı sağlanması

hedeflenmektedir. Araştırma ve yayın etiği ilkelerine bağlı kalınarak yürütülen bu çalışmada, öncelikle tarihsel süreçte kullanılan ilk takım tezgahlarına ilişkin bilgiler, kronolojik sıra gözetilerek ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Bunu takiben, takım tezgahı teknolojisindeki gelişim aşamaları ele alınmıştır. Ardından NC ve CNC tezgahlarına yönelik otomasyon sistemleri kapsamlı şekilde incelenmiş ve bu sistemler günümüzdeki geleneksel takım tezgahlarıyla çeşitli yönlerden karşılaştırılmıştır. Devam eden bölümlerde ise, CNC teknolojisindeki güncel gelişmeler ve bu gelişmelerin gelecekteki üretim teknolojilerine olası etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç bölümünde, çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda çıkarımlara ve ileriye dönük önerilere yer verilmiştir.

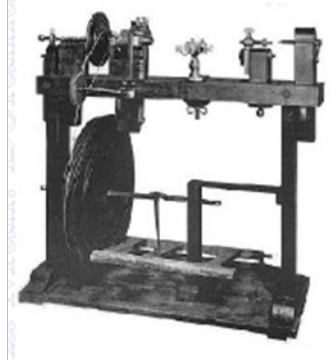
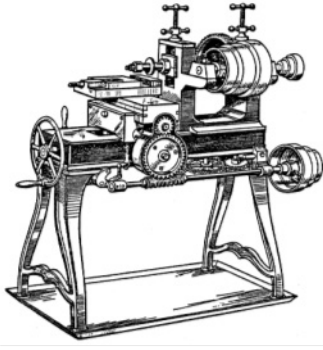
2. Tarihte İlk Kez Kullanılan Takım Tezgahları

Takım tezgahı adı verilen sistemlerden ilk faydalanma zamanı 12. yüzyılın başlarına kadar dayanır. İlk takım tezgahı sistemleri metalin henüz yeterince şekillendirilemediği bu dönemde ahşaptan yapıldığı bilinmektedir. Ahşap işlemede kullanılan bu tür tezgahlar torna tipinde olup, iş parçaları ilk zamanlarda pedal kullanılarak döndürülmekteydi. Daha sonraki formlarında parça döndürme hareketi rüzgar ve su enerjisinden faydalanarak gerçekleştirilebilmiştir. Değirmen yardımıyla döndürülen testere (icat yılı: 1550) ve su ile döndürülen delik işleme tezgahı (icat yılı: 1662) bu tezgahlara örnek olarak verilebilir (Eskicioğlu, 2010; Woodbury, 1963). Şekil 1’de tarihte takım tezgahlarının atası olarak adlandırılacak ilk icatların görselleri verilmiştir.



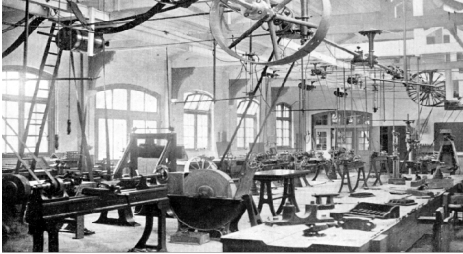
Şekil 1. Tarihte takım tezgahlarının atası olarak adlandırılacak ilk icatlar (Woodbury,1963)

18. Yüzyılın başında James Watt tarafından buhar makinasının icadı ile ilk endüstri devrimi başlamış ve bu gelişmelerden sonra ahşap tezgahlarda metal parçalar kullanılmaya başlanmıştır. Buhar makinasından sağlanan enerji ile metal alaşımların daha kolay şekillendirilebilmesi ile birlikte, takım tezgahlarına ait makine elemanlarının tamamı metal malzemelerden imal edilebilmiştir. 18. yüzyılda geliştirilen bu tezgahlar metal takım tezgahları çağının başlangıcı olarak değerlendirilmektedir (Eskicioğlu, 2010). Şekil 2’de metal takım tezgahı olarak kullanılan sistemlerin ilk örneklerine ait görsellere yer verilmiştir.



Şekil 2. Tarihte metal takım tezgahı olarak kullanılan sistemlerin ilk örnekleri (Woodbury,1963).

Enerji iletimindeki zorluklar metal malzemelerin seri imalatla şekillendirilmesinin en önemli engellerdendir. Bu engeli aşmak amacıyla buharlı makineler sayesinde üretilen güç, transmisyon-kayış/kasnak sistemleri aracılığı ile bir merkezden atölyedeki tüm tezgahlara iletilebilmiştir (Carlsson, 1984). Böylece seri üretim adı altında yeni bir yaklaşım ortaya konabilmiştir. Elektrik bulunmadan önce buharlı kazanlar aracılığıyla takım tezgahı sistemlerinde gerçekleştirilen güç transmisyonu ile ilgili görseller Şekil 3'te verilmiştir



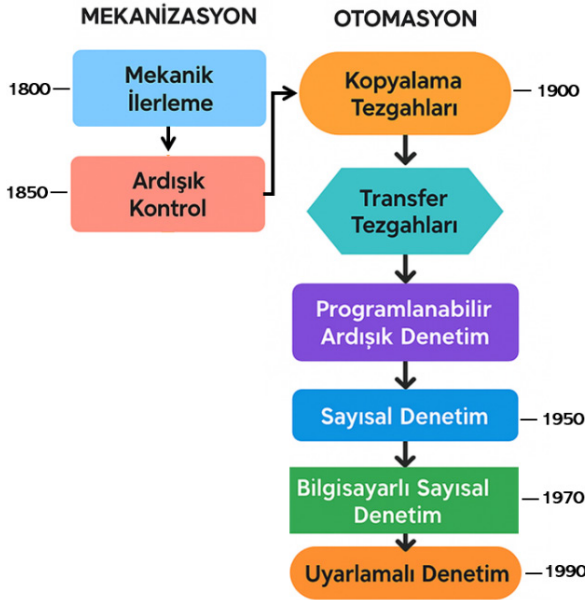
Şekil 3. Elektrikli motorlardan önce takım tezgahı sistemlerindeki güç transmisyonu (Goldsmiths' College, 1894; Pixels, 2016).

3. Takım Tezgahı Teknolojisindeki Gelişim Aşamaları

Takım tezgahlarının tarihsel gelişimine bakıldığında, gelişimin iki farklı kulvarda olduğu görülür. Bunlar, mekanizasyon ve otomasyon olarak kısaca ifade edilebilir. Takım tezgahlarının gelişiminde ilk önemli adım mekanizasyondur. Mekanizasyon aşaması, en yalın haliyle, insanın fiziksel iş gücünün yerini makinelerin alması süreci olarak tanımlanabilir. Bu aşamada, işçilerin el becerisi ve deneyimlerine dayalı olarak kas gücüyle gerçekleştirdiği işler, belirli adımlara ayrılarak tekrarlanabilir hale getirilmiş ve bu işler makineler ya da mekanik sistemler aracılığıyla yapılmaya başlanmıştır. Böylece, üretim süreçlerinde kullanılan takım tezgahlarında mekanizasyon sağlanmıştır. (Çetin, 2011). Takım tezgahlarının tarihsel gelişiminde otomasyon aşaması ise mekanizasyondan sonra gelir. Otomasyon insanın karar verme kabiliyetinin çeşitli mekanik, elektromekanik ve elekt-

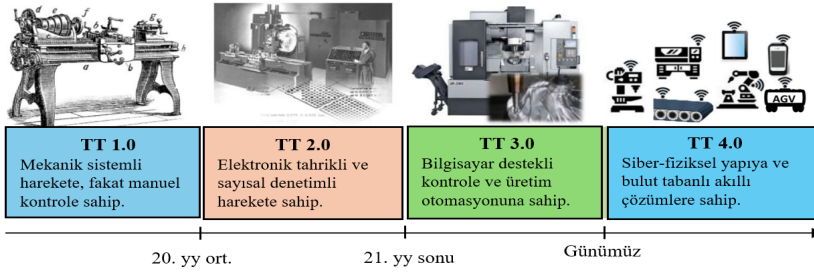
ronik elemanlar ve bilgisayarlar vasıtasıyla taklit edilmesi olarak tarif edilebilir.

Günümüzde mekanizasyon ve otomasyon kavramı birbirinden ayrılmaz bir bütün olmuştur. Çünkü sayısal denetimli tezgah sistemlerinde mekanizasyon hareketi, otomasyon ise karar vermeyi karşılamaktadır. Bu tür tezgahlar değişen oranlarda mekanizasyon ve otomasyonun özelliklerine sahiptir. Mekanizasyon seri imalat tezgahlarında daha fazla kullanılırken, otomasyon üretim miktarının değişken ve daha çok talebe göre değiştiği küçük parti imalatlarında kullanılan tezgahlarda daha fazla kullanılmaktadır (Eskicioğlu, 2010). Takım tezgahlarının tarihsel gelişimi Şekil 4'te belirtilen aşamalardan geçerek gerçekleşmiştir.



Şekil 4. Takım tezgahlarının tarihsel gelişim aşamaları (Çetin, 2011).

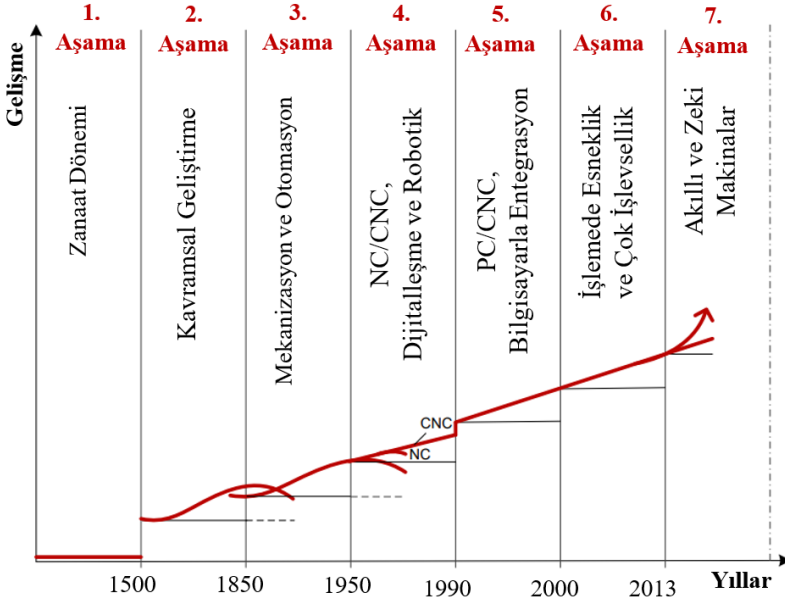
Son yıllardaki gelişmeler de dikkate alındığında takım tezgahı (TT) teknolojisinde gelişmeler, hareketin gerçekleştirilme, kontrol edilme ve yönetilme şekline göre genel olarak dört devire ayrılabilir. Bu devirler, tezgahların mekanizasyon teknolojisine ulaştığı aşama ile başlar ve TT 1.0, TT 2.0, TT 3.0 ve TT 4.0 olarak adlandırılırlar (Xu, 2017). TT 1.0 tezgahlardaki hareketin büyük ölçüde mekanik sistemlerle sağlandığı fakat manuel olarak kontrol edildiği devri tarif eder. TT 2.0 tezgah hareketlerinin elektronik sistemlerle tetiklendiği ve sayısal olarak kontrol edilebildiği devri ifade eder. TT 3.0 tezgah hareketlerinin bilgisayarlı sayısal denetimle kontrol edildiği ve bilgisayar teknolojisi ile üretim otomasyonunun yapılabildiği devire karşılık gelir. TT 4 ise siber-fiziksel yapıdaki akıllı takım tezgahları ile bulut tabanlı çözümler ulaşılabilen, henüz başında bulunduğumuz devri ifade eder (Xu, 2017). Şekil 5'te zamana göre bu gelişim evrelerini anlatan görsele yer verilmiştir.



Şekil 5. TT 1.0'dan TT 4.0'e takım tezgahlarındaki gelişim evreleri (Xu, 2017).

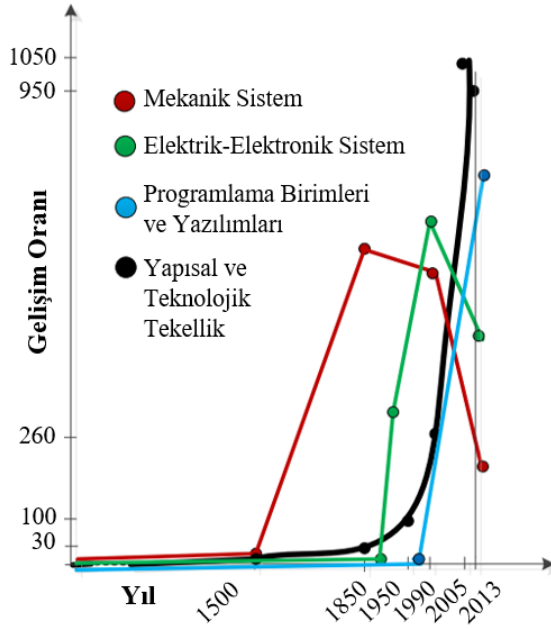
Takım tezgahı teknolojisindeki gelişim süreçlerini daha geniş bir perspektifle değerlendiren yaklaşımlar da söz konusudur. Örneğin, mekanizasyon öncesindeki ilk takım tezgahlarındaki gelişimler ile günümüz ve gelecekteki tezgahları bekleyen gelişimleri de kapsayan bir yaklaşım, takım tezgahı teknolojinin gelişim süreçlerini 7 aşamalı olarak değerlendirir (Guergov, 2018). 1. Aşama ilk çağlardan başlayıp 1500 yıllarına kadar olan zanaatkarlık dönemini ifade eder. Bu dönem herhangi bir tezgah sisteminin olmadığı, daha çok el aletlerinin basit sistemlerle kullanıldığı ve el becerisinin ön planda olduğu dönemdir. 2. Aşama 1500'li yıllardan başlayıp 1850'li yıllara kadar uzanan kavramsal geliştirme aşamasıdır. Bu aşamada insan gücünün su ve rüzgar enerjileriyle desteklendiği tezgah sistemlerinin ilk örnekleri ahşap formlarda karşımıza çıkar. 3. Aşama 1850'li yıllardan başlayıp 1950'li yıllara kadar olan mekanizasyon ve otomasyon aşamasıdır. Bu aşama buhar makinalarının bulunmasıyla daha güçlü tahrik sistemlerine sahip aksamaları metalden olan takım takım tezgahlarını ve tezgahların hareketlerinin ilk kontrol edilme yöntemlerini içerir. 4. Aşama 1950'li yıllardan başlayıp 1990'a kadar devam eden NC/CNC (Numerical Control / Computer Numerical Control), Dijitalleşme ve Robotik sistemler aşamasıdır. Bu aşama takım tezgahları ile ilgili her türlü hareketin ve fonksiyonun önce analog sonra dijital teknolojilerle sayısal denetimli olarak kontrol edildiği, dönemdir. 5. Aşama 1990'lı yıllardan başlayıp 2000'li yıllara uzanan PC/CNC (Personal Computer / Computer Numerical Control), tezgahları bilgisayarlaştırma ve entegrasyon dönemdir. Bu dönem, torna ve freze tezgahlarının birleştirilerek üçten fazla eksene ve daha teknolojik kinematik sistemlere sahip işleme merkezi tezgahlarının geliştirildiği dönemdir. Ayrıca bu dönem, takım tezgahlarına ait bilgisayarlar olan kontrol panolarının hem yazılım hem de donanım olarak geliştirildiği dönemdir. 6. Aşama 2000'li yıllardan başlayıp 2013 yıllarına uzanan işlemede esneklik ve çok işlevlilik dönemidir. Bu dönemde otomatik takım yolu oluşturan yazılımlar ile tezgahların daha karmaşık işlemlerde bile daha kolay programlanması (CAD-Computer Aided Design / CAM-Computer Aided manufacture / CNC-Computer Numerical Control), sanal prototipleme simülasyon fonksiyonlarının ön plana çıktığı, ayrıca üretim süreçlerinin tamamının bilgisayar teknolojisiyle yönetildiği (CIM – Computer Integrated Manufacture / CAPP – Computer Aided Process Planning) dönemdir. 7. Aşama 2013'ten sonraki akıllı tezgahlar dönemini ifade etmektedir. Bu dönem kendi kendine organizasyona dayalı endüstri 4.0 ile başlayan, yapay zeka ve akıllı teknolojilerin ilke ve bileşenlerinin geliştirilmesiyle takım tezgahlarının karma-

şık, akıllı sistemler haline getirildiği dönemdir (Guergov, 2018). Bu aşamalardaki yıllara göre gelişimi anlatan şema Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Takım tezgahı teknolojilerindeki ilerleme aşamalarının şematik gösterimi (Guergov, 2018).

Takım tezgahlarının mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinin ilk ortaya çıkışı ve gelişimi farklı yıllarda gerçekleştiği gibi, yıllara göre gelişime oranları da farklılık göstermiştir. Örneğin takım tezgahlarının mekanik sistemlerindeki gelişme oranları 1500-1850 yıllarında çok yüksek bir ivme göstermiştir. 1850 yılından sonra da mekanik bileşenlerde gelişme olmuştur. Fakat daha bu gelişim oranı ilk döneme kıyasla daha düşük seyretmiştir. Benzer şekilde takım tezgahlarının elektrik-elektronik sistemlerindeki gelişmeler 1900- 1950 yıllarında çok kritik artışlar sergilemiştir. Bu sistemlerdeki gelişmeler 1950 yıllarından günümüze de devam etmesine karşılık, ilk dönemlere kıyasla daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir. Ancak, 1970 yılından sonra takım tezgahlarının programlama ve yazılım araçlarında başlayan gelişmeler, günümüzde de dikkate değer bir ivmeyle artarak devam etmektedir. Takım tezgahlarının mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinin yıllara göre gelişim oranları Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Takım tezgahlarının mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinin yıllara göre gelişim oranları (Guergov, 2018).

4. NC ve CNC Takım Tezgahlarına Ayrıntılı Bir Bakış

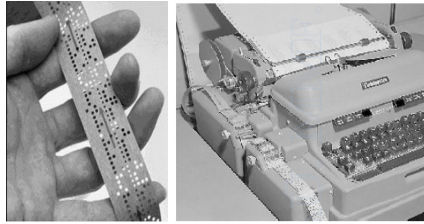
4.1. NC (Numerical Control) Takım Tezgahları

Sayısal denetimli (Numerical Control - NC) tezgahlara ait ilk tasarım fikri John T. Parkinson'un 1940'lı yıllarda bir freze çakısının bir eğriyi doğru bir şekilde işleyebilmesi için yeni bir yöntem önermesine dayanır. Bir karta freze çakısının izleyeceği yolun koordinatları delinmek suretiyle yansıtılarak, tezgah denetim biriminin bu koordinatları takip ederek kesicinin tarif edilen yol üzerinde hareketi sağlanmıştır (Carlsson, 1984). 1949 yılında, ABD Hava Kuvvetleri, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) John T. Parkinson'un fikirlerine dayanan bir NC sistemi üzerine çalışmalar başlattı. Bu çalışmalar sonucunda, 1952 yılında delikli kâğıt şerit ile çalışan ilk takım tezgâhı prototipi başarıyla test edildi. Geliştirilen bu teknoloji, 1957 yılına gelindiğinde endüstriyel alanda kullanılmaya başlanarak üretim süreçlerinde önemli bir dönüşümün önünü açtı (Eskicioğlu, 2010).

NC tezgahları günümüzde kullanılan CNC (Computer Numerical Control) tezgahlarına ait otomasyon sistemlerinin temelini oluşturur. Sayısal denetim, takım tezgâhlarının önceden belirlenmiş ve sayısal karakterlerle ifade edilen kodlar aracılığıyla otomatik olarak kontrol edilmesi sürecidir. Bu kodlanmış veriler, kesici takımın veya iş tablasının izlediği yörüngenin, iş parçasının hedeflenen boyutlara ulaşmasını sağlayacak şekilde düzenlenmesini; ana milin devir sayısı, ilerleme hızı ve benzeri operasyonel parametrelerin hassas bir biçimde denet-

lenmesini mümkün kılar (Eskicioğlu, 2010). Manuel olarak kontrol edilen üç eksenli bir tezgaha NC kontrol sistemi eklendiğinde her eksendeki hareket için bir adım veya doğru akım motoru tezgahın kontrol ünitesinden aldığı sinyale göre hareket eder. Nasıl hareket edeceği ise özel bir standarda göre delinmiş delikli yada manyetik bantlar ile belirlenir (Uyanık, 2006).

Delikli bantlar, bant okuyucu tarafından okunarak kontrol ünitesine her kodun ne anlama geldiği bildirilir. Kontrol ünitesi de bu komutlara bağlı olarak doğru akım motorlarına ve diğer birimlere gerekli sinyalleri gönderir. Bu şekilde eksenlerdeki hareketlerin yanında, fener milini döndürme, soğutma sıvısını açıp kapama gibi istenen hareketler yaptırılır. Şekil 8 (a)'da NC tezgahlarında kullanılan örnek bir delikli şerit, Şekil 8 (b)'de ise delikli şeritlerin hazırlanarak üretildiği Flexowriter adlı cihaz görülmektedir.



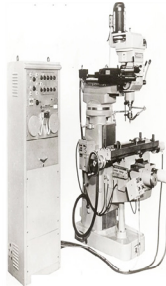
(a)

(b)

Şekil 8. NC tezgahlarında kullanılan delikli şerit (bant) örneği (a) ve Delikli kağıt şerit hazırlığında kullanılan bir makine (Flexowriter) (Gülesin 2006; Uyanık, 2006).

Her biri diğerinin aynısı olan parçaların seri üretiminde delikli bant kullanılan NC teknolojisiyle ilgili iki kısıt vardır. Bunlar, bantın mevcudiyeti ve bantın yıpranmamış olması şeklinde ifade edilebilir. Birçok aynı parçanın tekrar üretiminde delikli bantın kötü etkilenmesi, aşınması (özellikle bant okuyucusunda kullanılan deliklerin aşınması) bu tezgahların en büyük dezavantajıdır.

Kaset şeklindeki manyetik bantlar ise, delikli bantların dezavantajlarına karşın çözüm olarak geliştirilmiştir. Manyetik şeritlerin uygulaması, elle veri girişinin bir benzeri olan kontrol konsolundan ilk parçanın manuel olarak işlenmesi sırasında işlemin manyetik banda kaydedilmesi şeklindeydi. Şekil 9'da NC tezgahlarında kullanılan manyetik bantlara ait bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 9. NC tezgahlarında kullanılan manyetik bantlar (Parkurda, 2024).

Manyetik bantların avantajları aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Manyetik bantların temini kolaydır.
- Manyetik bantlar delikli bantlara göre hızlı yazılır ve hızlı okunur.
- Gerekli durumlarda manyetik banttaki programın silinip üstüne yeniden program kaydı yapılabilir.
- Manyetik bantlar benzer uzunluktaki delikli banda kıyasla daha büyük bellek kapasitesine sahiptir.
- Manyetik bantlar delikli bantlara kıyasla daha dayanıklı ve dolayısıyla uzun ömürlüdür.

Bu sistemin en büyük kısıtı açma, kapama ve ayarlama zamanları dikkate alındığında modern tekniklere göre oldukça yavaş olmasıydı. Yine de manyetik bant ile veri aktarımı, NC kontrollü delikli banttan CNC kontrollü modern sistemlere bir geçiş basamağı olarak değerlendirilebilir.

4.2. CNC (Computer Numerical Control) Takım Tezgahları

CNC (Computer Numerical Control) sistemi, delikli ya da manyetik şeritler gibi kontrol ortamlarının yerine bilgisayar tabanlı komutların kullanılması esasına dayanan bir sayısal kontrol sistemidir. Bu teknoloji, takım tezgahlarının; sayı, harf ve sembollerden oluşan, belirli bir mantıksal yapıya göre dijital ortamda kodlanmış komutlarla çalıştırılmasını sağlar (Singh, 1996; Smid, 2000). Şekil 10'da örnek bir CNC torna tezgahı, örnek bir CNC paneli ve dijital kodlardan oluşan parça programı



Şekil 10. CNC torna tezgahı, CNC kontrol paneli ve dijital kodlardan oluşan parça programı

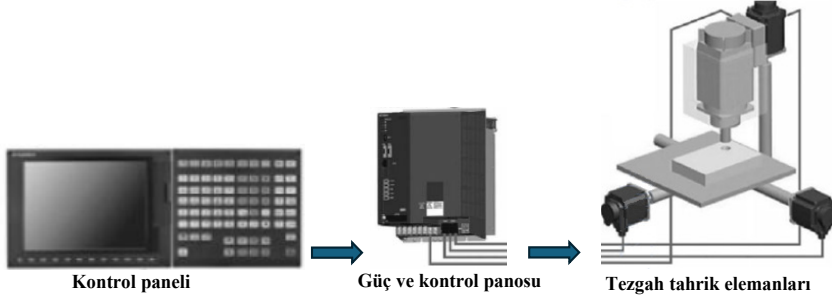
CNC tezgahlarında kullanılan bilgisayarlar yardımıyla programların saklanması, parça üretiminin her aşamasında programı durdurma, programda istenilen değişiklikleri yapabilmek, programa istenilen noktadan devam edebilmek mümkündür. CNC sistemlerinin yazılımları "Parça Programı", "Servis Programı" ve "Kontrol Programı" olmak üzere 3 ana bölümden oluşur. CNC takım tezgahlarındaki bu denetim üniteleri 3 aşamada kontrol faaliyetini yürütür. Bu aşamalar:

1. Aşama: CNC tezgahlarının fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için bilgisayar ortamında verilerin toplanması ve saklanması,
2. Aşama: Kontrol ünitesi ve arayüz tarafından, tezgah kontrol ünitesi ile bilgisa-

yar arasında iletişimin ve bilgi akışının sağlanması,

3. Aşama: Hız ve ilerleme kontrollerinin, servo birimlerinin ve tezgah bölümlerinin (fener mili, tabla, takım değiştirici) harekete geçirilmesi (Akkurt, 2012; Bakır, 2006) şeklinde özetlenebilir.

Şekil 11’de bu aşamaları açıklayan görsele yer verilmiştir.



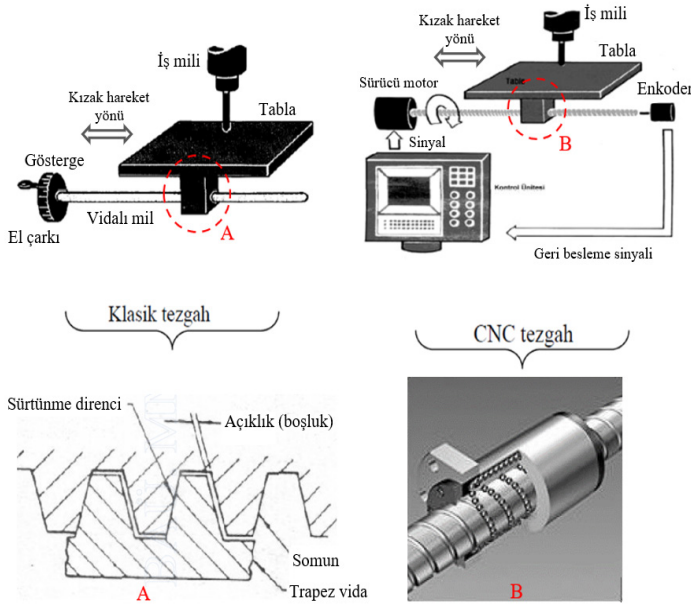
Şekil 11. Bir CNC takım tezgahındaki denetim akışı

Günümüzde bilgisayar destekli imalat (CAM), yaygın olarak CNC tezgahları ve işleme merkezleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu tezgahlar, sahip oldukları hareket serbestliğine göre 2, 3, 4 veya 5 eksenli olarak sınıflandırılır. Eksen sayısı, kesici takımın ve iş parçasının yer aldığı tablanın hangi yönlerde hareket edebildiğini ifade eder. Düzlemsel ve basit geometrilere sahip parçaların işlenmesi için genellikle 2 eksenli tezgahlar yeterli olurken, daha karmaşık, çok yüzeyli ve eğrisel formlara sahip parçaların işlenebilmesi için 5 eksenli CNC tezgahları tercih edilir. Bu tezgahlar, aynı anda birden fazla yönde hareket edebildikleri için daha hassas, hızlı ve karmaşık işlemleri mümkün kılar (Akkurt, 2012).

Milimetrenin binde biri düzeyinde hassas çalışabilen CNC tezgahları, yüksek doğrulukta frenleme performansı gösterir. Bu yüksek hassasiyet ve ani hareket kabiliyeti, sistemde yer alan motorlar, lineer kızaklar ve döner millerin daha hassas bir yapıda olmasını gerektirir. Bunun için denetim ve kontrol ünitelerine ihtiyaç duyulmuş ve bu üniteler tezgah sistemine dahil edilmişlerdir (Bakır, 2006). Bu şekilde CNC takım tezgahları, mekanik ve elektronik sistemlerin yüksek uyum içinde entegrasyonu ile oluşturulmuş yazılımların denetimi altında çalışarak hedeflenen işlemleri gerçekleştirir. Bu sistemlerin istenilen hassas hareketleri eksiksiz şekilde yerine getirebilmesi için, kontrol üniteleri ve programlama yöntemlerinin doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşır (Smid, 2000).

4.3. CNC Takım Tezgahlarıyla Geleneksel (Klasik) Tezgahların Kıyaslanması

Teknoloji geliştikçe karmaşık parçaların, daha seri ve daha hassas imal edilmesi gerekmiştir. CNC tezgahları bu gereksinimleri sadece mükemmel otomasyona sahip olma yönüyle değil, aynı zamanda bu otomasyonla tam bir uyum içerisinde mükemmel bir mekanizasyona sahip olmasıyla sağlar (Kalpakjian, 2014). Örneğin takım tezgahlarında ilerleme hareketini sağlayan ana mil (vidalı mil) - somun sistemi CNC tezgahı ile geleneksel tezgahta ciddi farklılıklar gösterir. Şekil 12’de bu iki tezgah türüne ait ana mil-somun sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 12. Geleneksel ve CNC tezgahlarda kızak hareketleri

Şekil 12'deki A kesitinde görüldüğü gibi, geleneksel tezgahlarda ana mil somun sisteminin vida yapısı trapezdir. Bu sebeple tezgah hareketinde makine elemanları arasında daha çok sürtünme, buna bağlı olarak da hareket için daha çok güç gerektirir. Geleneksel tezgahlardaki trapez vida profilinden dolayı hareket hızlarında ve aralıklarında geometriye bağlı kısıtlar söz konusudur. Dişler arasındaki boşluklar ise parça hassasiyetinde olumsuzluklara sebep olur. Geleneksel tezgahlarda operatörün becerisi sonucu istenilen hassasiyette parçaların imal edilmesi mümkün olsa bile, seri üretim için aynı hassasiyette ve daha kısa sürede parça imal edilmesi mümkün değildir. Şekil 12'deki B kesitinde görüldüğü gibi, CNC tezgahlarında sürtünme kuvvetlerini azaltmak ve hareket hassasiyetini artırmak için kayma hareketi yerine yuvarlanma hareketinin tercih edildiği bilyeli vidalar kullanılır. Bilyeli vida diş profili (dolayısıyla temas yüzeyleri) yarı dairesel veya gotik yay şeklindedir. Bilyeler karşılıklı iki noktadan temas eder. Böylece hem sürtünme hem de oluşabilecek boşluk önemli ölçüde ortadan kaldırılır (Akkurt, 2012). Hassas takım tezgahları uygulamalarında mil etrafında dönen silindirik bilyeli vidalar kullanılır. Boşta bilye olmadığından daha yüksek devir sayılarına erişilebilir. Ana mil somun sistemi gibi, diğer (kayıt-kızak sistemi, takım taşıma ve değiştirme sistemi vb.) mekanik sistemlerde de performansı etkileyen ciddi yapısal farklılıklar vardır. Bu ve benzeri mekanik ve dahi otomasyon farklılıkları sayesinde CNC tezgahları geleneksel tezgahlara göre pek çok üstünlüklere sahip olabilmektedir (Çetin, 2011).

CNC Tezgahlarının geleneksel tezgahlara göre üstünlükleri:

- Yeni teknolojik gelişmelerin tezgaha aktarımı mümkündür.
- Daha karmaşık parçaların aynı hassasiyette ve seri üretimini mümkün kılar.

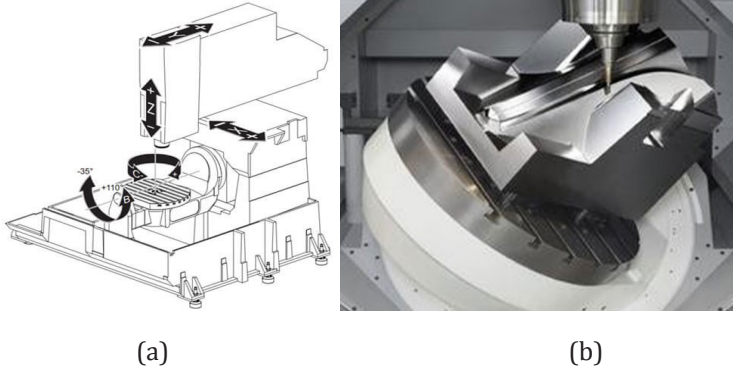
- Daha ucuz ve yüksek verimde üretim yapılmasını sağlar.
- Çok sayıda takım kullanabilir ve bu takımların değiştirilmesi kolaydır.
- Operatör birden çok tezgahı yönetebilir ve operatörden kaynaklanan hatalar daha azdır.
- Simülasyon özelliği ile hatalar önceden belirlenebilir.
- Mevcut program üzerinde değişiklikler kolayca yapılabilir.
- Verilerin saklanması ve transferi mümkündür.
- Kesme parametrelerinin ayar aralığı geniştir.
- Kesme hızı sabit tutularak değişken devirlerde çalışması sağlanabilir.
- Daha temiz ve güvenli çalışma ortamı sağlar.

Günümüzde hala geleneksel tezgahlar talaşlı imalat işleminde aktif olarak kullanılmaktadır. Çünkü CNC tezgahlarının geleneksel tezgahlara göre bazı eksiklikleri de söz konusudur (Çetin, 2011). CNC tezgahlarının geleneksel tezgahlara göre eksiklikleri:

- Sayısal denetimli tezgahların ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Buna bağlı olarak bu tezgahların saat ücreti de yüksektir.
- Sayısal denetimli tezgahlar için geleneksel tezgahlara göre daha ayrıntılı bir imalat planı gerekir.
- Sayısal denetimli tezgahlarda daha pahalı aparat ve kesiciler kullanılır.
- Sayısal denetimli tezgahlar karmaşık bir yapıya sahip olduğu için daha titiz kullanım ve bakım isterler. Buna bağlı olarak bakım maliyetleri yüksektir.
- Bu tip tezgahların periyodik bakımları düzenli olarak ve uzman kişiler tarafından yapılmalıdır. Yapılmadığı takdirde arızalanma durumu sonucu yüksek maliyetler ortaya çıkarır.

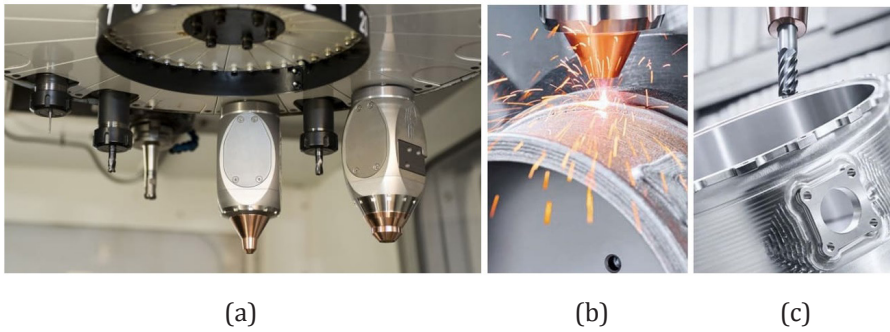
4.4. CNC Takım Tezgahları ile İlgili Güncel Gelişmeler

Günümüzde malzeme, elektronik, bilgisayar donanımı ve yazılımı alanlarındaki gelişmeler doğal olarak takım tezgahları teknolojisine de yansımıştır. Bu şekilde ilk nesil CNC tezgahlarına göre çok daha ileri teknolojilerin kullanılmasıyla hem otomasyon hem de mekanizasyon açısından mükemmellik artırılmıştır. Örneğin, daha önce farklı operasyonlar için farklı takım tezgahları (torna tezgahları, matkap tezgahları ve freze tezgahları vb.) kullanılırken, günümüzde "CNC İşleme Merkezi" olarak adlandırılan takım tezgahlarının hemen hemen bütün fonksiyonları yerine getirdiğini görmek mümkündür (Erer, 2011). Ayrıca, gelişen teknolojiyle birlikte bu tezgahlardaki 5 eksen hareketleri takım yada iş parçası tarafında bir uyum içerisinde aynı anda (simültane) gerçekleşebilmektedir. Tezgahlardaki bu kabiliyet, oldukça karmaşık parçaların rahatlıkla işlenmesini mümkün kılmaktadır. Şekil 13 (a)'da bir CNC işleme merkezine ait eksenler, Şekil 11 (b)'de ise bir iş parçasının 5 eksen işleme merkezinde işlenmesi sürecine örnek görsel verilmiştir.



Şekil 13. CNC işleme merkezi eksenleri (a) ve bu özellikteki bir tezgahta parça işleme

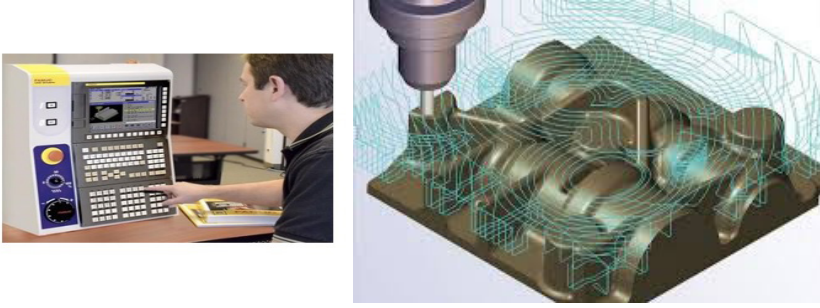
Bu gelişmelere ilave olarak, son yıllarda ürün şekillendirme konusunda eklemeli imalat üzerindeki araştırmalar ve uygulamalar artmaya başlamasına rağmen; yüzey kalitesi, ölçü toleransı işleme hızı ve ekonomisi gibi açılardan eksiltmeli imalat prensibine sahip talaşlı imalata göre ciddi dezavantajlar barındırmaktadır. Diğer taraftan, eklemeli imalatla karmaşık şekillerin takım sarfiyatı olmadan risksiz imali, malzeme atığının (talaş) olmaması gibi avantajlar söz konusu olduğu için, günümüzde eksiltmeli imalat ile eklemeli imalatın avantajlarını birleştirmek amacıyla her iki imalat yönteminin aynı tezgahta yapılabilirdiği CNC hibrit imalat tezgahları üretilmeye başlanmıştır (Tezel, vd., 2018; Siemens, 2024; Wright, 2018). Şekil 14'te CNC hibrit imalat tezgahları için örnek bir görsel paylaşılmıştır. Şekil 14 (a) da eklemeli imalat yapan nozullar ile talaşlı imalat yapan kesici takımların bulunduğu tezgah magazini, Şekil 14 (b) ve Şekil (c)'de sırasıyla tezgahta gerçekleştirilen eklemeli ve eksiltmeli (talaşlı) imalat işlemleri verilmiştir.



Şekil 14. CNC Hibrit imalat tezgahlarına ait magazin (a), tezgahta uygulanan eklemeli imalat (b) ve talaşlı (eksiltmeli) imalat (c) süreçleri (Wright, 2018).

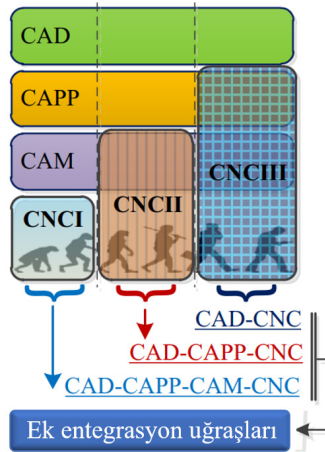
Parça tasarımının ve imalatın bilgisayar teknolojisiyle yapılması, sürecin daha hızlı ve daha hatasız yürütülmesine ek olarak, imalat yöntemlerinin her türlü gelişmeye müsait hale gelmesini sağlamıştır. Örneğin günümüzde, tasarım alanında tersine

mühendislik yoluyla ürünler kolay bir şekilde tasarlanabilmektedir. İmalat alanında da bir örnek verilecek olursa, önceleri ISO (International Organization for Standardization) kodlarının elle kontrol paneline girilmesi suretiyle takım ve tezgah hareketleri belirlenirken, günümüzde CAM (Computer Aided Manufacturing) teknolojisini destekleyen gelişmiş paket programlar sayesinde takım ve tezgah hareketleri otomatik olarak üretilip tezgaha aktarılması mümkün olabilmektedir (Şekil 15).



Şekil 15. Bilgisayar destekli üretimde (CAM) takım yolu oluşturma

Daha önce ayrı ayrı yapılan bilgisayar destekli tasarım (CAD -Computer Aided Design) ve bilgisayar destekli imalat (CAM - Computer Aided Manufacturing) işlemleri bu şekilde birleştirilerek, CAD/CAM bütünleşik uygulamaları imalatla kullanılır hale gelmiştir (Singh, 1996). Bunun yanında CAM için kullanılan paket programlarına entegre edilen veri kütüphaneleri sayesinde en doğru kesme parametrelerinin akıllı sistemlerle seçimi de bazı ilave yazılımlarla mümkün olabilmektedir, Tasarlanan iş parçasına ve stoğa göre kullanılacak takımlar, operasyonlar, takım yolları ve kesme parametreleri gibi imalat girdilerine bu yazılımların karar verdiği bilgisayar destekli süreç planlama (CAPP - Computer Aided Process Planning) araçları bunlara örnektir (Mauthner; at al., 2022; Zhou and Camba, 2021). CNC ile CAD / CAM / CAPP entegrasyonunun evrimi Şekil 16’da şematik olarak verilmiştir.



Şekil 16.CNC ile ilişkili diğer üretim araçlarının entegrasyonunun evrimi (Xu, 2017).

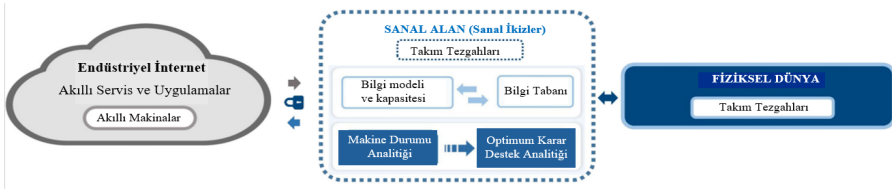
Bu kapsamda CNCIII, bir tasarım (CAD) modeline göre hareket ederken, önce CAM ve sonra CAPP işlevlerini birleştiren CNC'ler için uyarlanabilir ve anında akıllı kararlar verme yeteneğine sahip olan nihai senaryoyu anlatmaktadır (Xu, 2017).

Doğru bir CNC programlama süreci için en önemli hususlardan biri parça sıfırlama-
madır. Parçanın tezgah tablasındaki yerinin tespiti, günümüzde geliştirilen çeşitli
teknolojilere sahip proplarla çok daha kolaydır. Ayrıca üretilen parçalar için ön-
celeri farklı bir ölçme tezgahında (CMM - Coordinate Measuring Machine) yapı-
lan temaslı ölçü kontrolleri günümüzde işleme merkezlerine entegre olan ölçme
sistemleriyle yapılamaya başlanmıştır. Özellikle son yıllarda imalat alanında ge-
liştirilen çevre ekipmanları ile; kontrolü kolay, çok daha seri ve hatasız üretimin
mümkün olduğu söylenebilir. Yeni nesil CNC işleme merkezlerinde kullanılan en
önemli çevre ekipmanlarını aşağıdaki gibi listelemek mümkündür.

- Parça yükleme, sürme ve çıkarma robotları
- Kesici takımları depolardan tezgahın magazinine yükleme ve çıkarma robotları
- Ham malzeme ve bitmiş parça taşıma ve istifleme arabaları
- Parçalar ve talaş için ayrı ayrı kullanılan konveyörler.

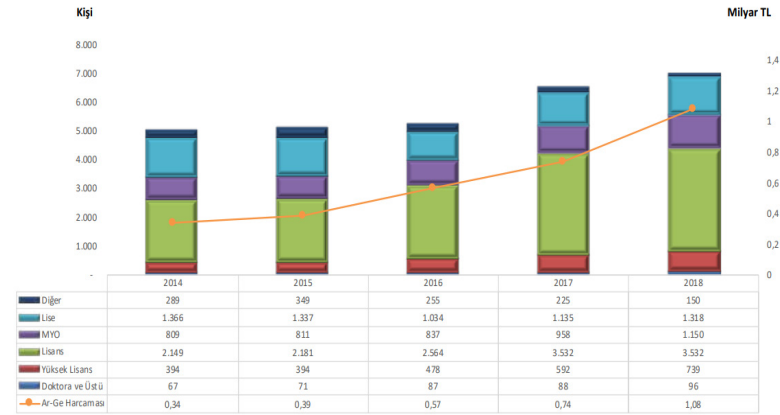
CAD / CAM / CNC teknolojisindeki hızlı gelişmeler, yalnızca üretim sürecinin ken-
disini değil, aynı zamanda bu süreçlere entegre çalışan çevresel ekipmanların da
iyileştirilmesini ve ilgili takım tezgâhlarıyla bütünleştirilmesini zorunlu hâle ge-
tirmiştir. Bu ihtiyaç doğrultusunda, üretim süreçlerine esneklik ve uyarlanabilirlik
kazandıran esnek imalat sistemleri (FMS - Flexible Manufacturing Systems) ge-
liştirilmiştir. Günümüzde ise, yalnızca üretim sürecinin değil, aynı zamanda kalite
kontrol, stok yönetimi, muhasebe, tedarik ve genel yönetim gibi işletmenin diğer
temel bileşenlerinin de bilgisayar destekli olarak entegre bir biçimde yönetilmesi-
ne olanak tanıyan Bilgisayar Destekli Tümüleşik İmalat Sistemleri (CIM - Computer
Integrated Manufacturing) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, modern
üretim anlayışının temelini oluşturarak, işletmelerin verimlilik, esneklik ve rekab-
bet gücünü artırmalarında önemli bir rol oynamaktadır (Scheer, 2013).

Endüstri 4.0 ile birlikte takım tezgahı 4.0 (TT 4.0) olarak adlandırılabilir yeni
nesil akıllı takım tezgahları, diğer makinelerle, sistemlerle, veri kaynaklarıyla ve
insanlarla (imalat ve kalite kontrol operatörleri ile imalat ve sistem mühendis-
leri vb.) birbirine bağlayan bir platformun parçası haline gelmiştir. Bu anlamda
imalat sürecinin bileşenleri olan takım tezgahları, veri kaynakları ve insanların
fiziki asıllarının yanında sanal kopyaları (ikizleri) da tanımlanarak süreç yapay
zeka gibi araçlarla yönetilebilir hale gelmiştir (Zhu ve Zhang, 2018). Bu yaklaşım,
bilgisayarla tümleşik imalat (CIM) sistemleri gibi mevcut sistemlerin daha akıllı
ve etkileşimli hâle gelmesi açısından önemli bir zemin sunmaktadır (Liu, at al.
2018). Şekil 17'de gerekli görüldüğünde global kaynaklardan güncelleme yapıla-
bilen ve sanal ikizler sayesinde her türlü sürecin programlanabildiği akıllı üretim
sistemlerinin işleyiş akışı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 17. Yeni nesil akıllı takım tezgahlarıyla entegre üretim sistemi şeması (Xu, 2017).

Tüm bu gelişmeler son yıllarda makine ve imalat alanında Ar-Ge, üretim, personel ve harcama kalemlerinde ciddi değişimlere zemin oluşturmıştır. TİAD (Takım Tezgahları Sanayici ve İş İnsanları Derneği)'ın 2019 yılına ait "Türkiye Takım Tezgahları ve Ekipmanları" başlıklı raporundan alınan verilerin gösterildiği grafik Şekil 18'deki gibidir.



Kaynak: TÜİK

Şekil 18. 2014-2018 yıllarında makine ve ekipman imalatında Ar-Ge ve işgücü harcamaları (TİAD, 2019).

Grafikte 2014-2018 yılları arasında Ar-Ge harcamasının ve personel sayısının arttığı görülmektedir. Bu rakamlar, makine ve imalat alanında gelişen teknoloji ve artan imkanlar paralelinde sektörün yaygınlaşmasının bir göstergesi olduğu kadar, bu alandaki inovasyon potansiyelinin artarak genişlediğinin de bir göstergesidir (TİAD, 2019). Diğer taraftan gelecek yıllarda personel sayısındaki artışın durağana, hatta azalmaya döneceği de öngörülmektedir. Çünkü, endüstri 4.0'dan sonra insansız fabrikaların yaygınlaşacağı da yadsınamaz bir gerçektir. Bunun bir göstergesi olarak, günümüzde kullanılan bilgisayarla tümleşik imalat (CIM) sistemlerinde yapay zekanın kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Görüntü işleme teknolojilerinden, veri madenciliğine CIM sürecindeki her aşamada karar alma mekanizmaları yapay zeka ile desteklenen sistemlerle donatılmaya başlanmıştır. Gelecek yıllarda yapay zekanın üretim süreçlerindeki karar alma aşamalarında çok daha yaygın bir şekilde kullanılacağı değerlendirilmektedir.

Ayrıca, sürdürülebilirlik hedeflerinin üretim süreçlerine entegre edilmesi, siber-fiziksel üretim sistemlerinin tasarımında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Sürdürülebilirlik odaklı siber-fiziksel üretim yaklaşımları, yalnızca teknolojik yenilikleri değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ilkelerini de üretim sistemlerinin temel yapı taşları haline getirmeyi hedeflemektedir (Rogall, at al., 2022). Bu veriler ışığında, gelecekte takım tezgahı teknolojisinde yaşanabilecek diğer bir önemli gelişmenin kullanılan enerji türünde olacağı düşünülmektedir. Farklı enerji kaynaklarının kullanılmaya başlanması veya mevcut enerji kaynaklarından yüksek potansiyele sahip enerji depolama sistemlerine ulaşılması (yüksek verimli batarya ve pil teknolojileri gibi) takım tezgahlarının enerji sistemlerinde dönüşümlere sebep olacaktır.

Gelecekte imalat sektöründe enerji tüketimi, fosil yakıtların yerini alacak daha temiz ve sürdürülebilir kaynaklara dayalı yeni bir yapıya kavuşacağı tahmin edilmektedir. Bu dönüşümün temelinde karbon nötr ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim süreçlerine entegrasyonu yer alacağı öngörülmektedir. Konuyla ilgili yapılan araştırmalar, özellikle yeşil hidrojen, biyokütle, biyogaz ve amonyak gibi alternatif yakıtların enerji üretiminde kullanılması, hem karbon emisyonlarını azaltma hem de enerji güvenliğini sağlama açısından kritik bir rol oynayacağını işaret etmektedir (Mansoori, at al., 2021). Bu yakıtların avantajı, birbirini tamamlayıcı nitelikte olmaları ve farklı üretim süreçlerine uygun şekilde entegre edilebilmeleridir (Stančin et al., 2020). Yine de bu enerji kaynakları Tablo 1'deki gibi çeşitle açılardan karşılaştırılabilir.

Tablo 1. Gelecekte imalat sektöründe kullanılması muhtemel enerji türlerinin karşılaştırması

Enerji Türü	Kullanım Alanı	Avantajı	Durumu
Güneş Enerjisi	Fabrika çatısı, kampüs	Sıfır karbon, düşük maliyet	Aktif kullanımda, gelişmeye müsait
Rüzgar ve dalga enerjisi	Sınırlı müsait bölgeler	Sıfır karbon, düşük maliyet	Aktif kullanımda, gelişmeye müsait
Yeşil Hidrojen	Mobil atölye, robotik hücre	Temiz, taşınabilir	Geliştirilmekte
Batarya Depolama	Her şartta kesintisiz üretim	Yedekleme, süreklilik	Geliştirilmekte ve yaygınlaşmakta
Mikro Nükleer	Büyük endüstriyel tesisler	Devamlı ve yoğun enerji	Gelecek vaat etmekte
Biyo Gaz ve Biyo Kütle	Kırsal atölye, tarım entegrasyonu	Atık değerlendirme	Sınırlı kaynak

Güneş, rüzgar ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar, doğrudan elektrik üretimiyle imalat tesislerinde enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahiptir. Özellikle güneş enerjisinin doğrudan üretim süreçlerine entegrasyonu, enerji maliyetlerini azaltmak ve karbon ayak izini düşürmek açısından önemli fırsatlar sunduğu çeşitli araştırmalarda ortaya konmuştur (Renna et al., 2021). Bu araştırmalarda, rüzgar enerjisi ise özellikle yüksek enerji tüketimi olan ağır sanayi alanlarında potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu enerji türleri-

nin etkili şekilde kullanılabilmesi için yapay zekâ (AI) ve dijital ikiz teknolojileri devreye girmektedir. Bu teknolojiler, enerji yönetim sistemlerinin verimliliğini artırarak üretim süreçlerini gerçek zamanlı olarak optimize edebileceği, böylece enerji kayıplarını minimize edebileceği tahmin edilmektedir (Feyz Abdi, et al., 2025). Geleceğin enerji sistemlerinde bu dijital çözümlerin, yakıt sentezi ve enerji talepe tahmini gibi alanlarda önemli katkılar sunması beklenmektedir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma ile, yapılan araştırma ve değerlendirmeler sonunda talaşlı imalat sektöründe kullanılan takım tezgahları ve bu tezgahlara ait teknolojiler ile ilgili ilk çağlardan başlayıp günümüze uzanan gelişim süreçleri geniş bir perspektifle ortaya konmuştur. Ayrıca takım tezgahı teknolojisindeki bu gelişmelerin geleceğe uzanacak muhtemel yansımaları bu çalışmada etraflıca tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kesici takımların sabitlendiği ve bu takımların kesme yapabilmesi için gerekli gücü ve hareketi aldığı takım tezgahları, öncelikle gücün karşılandığı enerji kaynağına (sırasıyla su, rüzgar enerjisi, buhar basıncı ve elektrik enerjisi) göre gelişme göstermiştir. Bu gelişmeleri mekanik sistemler tasarlanarak hareketin aktarılabilmesi izlemiştir. Yıllar geçtikçe takım tezgahlarındaki mekanik sistemler de gelişmiştir. Mekanizasyon teknolojisindeki gelişmeyi, otomasyon sistemindeki gelişmeler takip etmiştir. Çünkü mekanik sistemlerle sadece insanın kas gücü ve hareketi taklit edilebilmiştir. Otomasyon sistemleriyle ise insanın karar alma gücü de takım tezgahlarına aktarılabilmiştir.

Tasarımda ve üretimde bilgisayar teknolojisinin kullanılmaya başlanması, bu alandaki teknolojinin gelişme potansiyelini daha da artırmıştır. CAD/CAM/CNC teknolojileri yaygınlaşmış, hatta bu sayede tersine mühendislik çözümlerine ulaşılabilmektedir. İlâveten, yardımcı robotlar olarak adlandırılan çevre ekipmanları ve karar alma süreçlerini destekleyen uzman sistemler yeni nesil CNC tezgahlarıyla entegre kullanılmaya başlanmıştır. Bu geniş kontrol ve karar alma sistemi bilgisayarla tümleşik imalat (CIM) olarak adlandırılmıştır. Başlangıçta torna, freze gibi farklı işlemler için ayrı CNC tezgahlarının kullanılması gerekiyken, geliştirilen ve “CNC işleme merkezleri” olarak adlandırılan makineler sayesinde bu durum değişmiştir. Bu tezgahlar, üçten fazla eksen aynı anda ve koordineli şekilde hareket ettirebildikleri için, birçok talaşlı imalat işlemi tek bir makine üzerinde, yüksek hassasiyet ve verimlilikle gerçekleştirilebilmektedir. Bu tezgahlar, en zor malzemeleri bile hatasız şekillendirebilen hareket iletim sistemleri, ölçme sistemleri, soğutma sistemleri ve güç sistemleri ile donatılmıştır. Özellikle şekillendirilmesi zor, yeni nesil süper alaşımların işlenebilmesi için bu işleme merkezleri sürekli geliştirilmiş, böylece daha seri, hassas, güvenli, temiz üretim yapabilmişlerdir. Ayrıca, son yıllarda hibrit takım tezgahlarının kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu tezgahlar ile, parça üzerinde talaşlı imalat işlemiyle birlikte başka imalat işlemlerinin de (eklemeli imalat, kaynak vb.) aynı tezgahta gerçekleştirilebilmesi mümkün olmaktadır. Fakat, ileri teknolojiye sahip CNC takım tezgahları sınırsız bir üstünlüğe sahip değildir. İlk yatırım ve bakım gibi maliyet kalemlerinde eksiklikleri de olduğu için günümüzde hala geleneksel tezgahlar aktif bir şekilde kullanılmaktadır.

Yapılan araştırmalar, takım makine ve ekipman imalatında Ar-Ge ve işgücü har-

camalarının son yıllarda artarak devam ettiğini ortaya koymuştur. Endüstri 4.0 ile birlikte yeni nesil akıllı takım tezgahları, diğer makineleri, sistemleri, veri kaynaklarını ve insanları (operatörler, teknisyenler, mühendisler vb.) birbirine bağlayan bir platformun parçası haline gelmiştir. Her alanda olduğu gibi, CIM alanındaki karar alma süreçleri de, gelecek yıllarda, tamamen yapay zeka destekli uzman sistemler aracılığıyla gerçekleştirileceği düşünülmektedir. İleri teknoloji takım tezgahlarıyla senkron çalışan bu akıllı sistemlerin ve endüstriyel robotların yaygınlaşmasıyla insansız fabrikaların sayısını artıracak tahmin edilmektedir. Uzun vadede ise, bu gelişmelerin sektörde ara eleman olarak çalışacak personel sayısının azalmasına sebep olacağı değerlendirilmektedir.

Ayrıca, gelecekte verimli ve çevreci yeni enerji kaynaklarının takım tezgahlarında kullanılmaya başlanacağı öngörülmektedir. Özellikle güneş, rüzgar ve dalga gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını yüksek potansiyelle depolayabilen enerji sistemlerinin daha da gelişeceği ve takım tezgahlarının enerji ihtiyacı için bu kaynakların kullanımının yaygınlaşabileceği değerlendirilmektedir. Bu kaynaklara ek olarak, yeşil hidrojen, biyoyakıt ve mikro nükleer yakıtlı piller gibi alternatif enerji kaynaklarının kullanılabilmesi amacıyla tezgahların ilgili sistemlerinin dönüştürüleceği tahmin edilmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Akkurt, M. (2012). Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi-CNC Takım Tezgahları ve Üretim Otomasyonu, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Altıntaş, Y. (2012) Manufacruring automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design, Canbridge University Press, USA.
- Bakır, S. (2006). *Bilgisayar Destekli Mekanik Tasarım*, Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Carlsson, B. (1984) The development and use of machine tools in historical perspective, *Journal of Economic Behavior & Organization*, 5(1) : 91-114. Doi: [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(84\)90028-3](https://doi.org/10.1016/0167-2681(84)90028-3).
- Çetin, M.S. (2011) *(Bilgisayar Destekli Bıçaklı Bir Kesici Sistemin Çalışma Prensiplerinin Analizi)*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Erer, H.İ. (2011). Günümüzde Takım Tezgahları. Makine Mühendisleri Odası. Erişim Adresi: https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/ab3238922bcc25a_ek.pdf (Erişim tarihi: 02/08/2024)
- Eskicioğlu, H. (2010). *Sayısal Kontrol ve Takım Tezgâhları*, MMO/544, İzmir.
- Feyz Abadi M.M.K., Liu C., Zhang M., Hu Y., Xu Y., (2025) Leveraging AI for energy-efficient manufacturing systems: Review and future perspectives, *Journal of Manufacturing Systems*, 78: 153-177. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.11.017>.
- Goldsmiths' College. (1894). Department of the Engineering Workshops, New Cross, London <https://www.lathes.co.uk/southbend/page11.html> . Erişim tarihi: 12/09/2024.

- Guergov, S. (2018). A review and analysis of the historical development of machine tools into complex intelligent mechatronic systems. *Journal of Machine Engineering*, Vol. 18, No. 1, 107-111. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.8828>
- Gülesin, M. (2006). CNC Torna ve Freze Tezgahlarının Programlanması. Asil Yayın Dağıtım.
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson.
- Koren, Y., Shani, A., Ben-Uri, J. (1970). Numerical control of a lathe. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, (2), 175-179.
- Liu, C., Vengayil, H., Zhong, R. Y., Xu, X. (2018). A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 48(Part C), 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.02.001>
- Mansoori D.A., Agyarko L.B., Estevez L.A., Fallahi B., Gladyshev G., dos Santos R.G., Niaki S., Perišić O., Mika Sillanpää M., Tumba T., Yen T., (2021) Fuels of the Future for Renewable Energy Sources (Ammonia, Biofuels, Hydrogen), Cornell University, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.00439>
- Mauthner G., Votruba W., Ramsauer C., Plessing L., Trautner T and Bleicher F (2022) Development of a CAM-in-the-Loop System for Cutting Parameter Optimization using an Instrumented Tool Holder, *Procedia CIRP*, 107: 326-331.
- Parkurda (2024). NC ve CNC Tarihçesi. Erişim adresi: <https://www.parkurda.com/tr/sektorden-haberler/nc-ve-cnc-tarihcesi-p-18> . Erişim tarihi: 02/10/2024.
- Pixels. (2016). Belt Drive Factory from Underwood Archives. <https://pixels.com/featured/belt-drive-factory-underwood-archives.html>. Erişim tarihi: 12/09/2024.
- Rogall, C., Mennenga, M., Herrmann, C., & Thiede, S. (2022). Systematic development of sustainability-oriented cyber-physical production systems. *Sustainability*, 14(4), 2080. <https://doi.org/10.3390/su14042080>
- Renna, P., Materi, S. (2021). A Literature Review of Energy Efficiency and Sustainability in Manufacturing Systems. *Applied Sciences*, 11(16), 7366. <https://doi.org/10.3390/app11167366>
- Scheer, A. W. (2013). *CIM Computer integrated manufacturing: Der computergesteuerte Industriebetrieb*. Springer-Verlag.
- Siemens. (2024). Erişim adresi: <https://www.siemens.com/tr/tr/sektorel-cozumler/makine-imalat/takim-tezgahlari/cnc4you/katmanli-uretim.html> . Erişim tarihi: 12/10/2024.

Singh, N. (1996). Systems approach to computer-integrated design and manufacturing, 775-775. <https://doi.org/10.1080/15458830.1996.11770725>

Smid, P. (2000). CNC Programming Handbook, Industrial Press.

Stančin, H. Mikulčić, H. Wang, X. Duić, N. (2020) A review on alternative fuels in future energy system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, (128), 109927, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927>.

Strassmann, W.P. (1963). Technological change in the machine tool industry 1840-1910: Discussion. The Journal of Economic History. Erişim Adresi: <https://www.jstor.org/stable/2116207>. Erişim tarihi: 10/07/2024.

Tezel, T., Topal, E.S. ve Kovan, V. (2018). Hibrit imalat: eklemeli imalat ile talaşlı imalat yöntemlerinin birlikte kullanılabilirliğinin incelenmesi. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry 2:3 (2018) 60-65.

TİAD. (2019). Türkiye takım tezgahları ve aksesuarları sektör raporu. Erişim adresi: https://tiad.org/wp-content/uploads/2022/07/SektorRaporu_2019.pdf . Erişim Tarihi 03/11/2024.

Uyanık, A.S. (2006). Üç eksenli terco yüzey işleme tezgahının bilgisayar ile kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Woodbury, R.S. (1963). The origins of the lathe, Sxientifics American INC. Erişim Adresi: <https://www.jstor.org/stable/24936538?seq=1> . Erişim tarihi: 12/07/2024.

Wright, I. (2018). Hybrid Manufacturing & The Future of 3D Printing for Production. Erişim adresi: <https://www.engineering.com/hybrid-manufacturing-the-future-of-3d-printing-for-production/> . Erişim tarihi: 16/10/2024.

Xu, X. (2017). Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. Int J Adv Manuf Technol. 92:1893–1900. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0300-7>

Zhou J. and Camba J.D., (2021) Computer-Aided Process Planning In Immersive Environments: A Critical Review, Computers in Industry, Volume: 133.

Zhu, K. and Zhang, Y. (2018). A Cyber-Physical Production System Framework of Smart CNC Machining Monitoring System, in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 23, no. 6, pp. 2579-2586. doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2834622>