

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402 E-ISSN 2667-7520



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendismakina



Cilt/Vol 65 Sayı/No 717
Ekim-Aralık/October-December 2024



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 : 2024

CİLT/VOLUME : 65

SAYI/ ISSUE : 717



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

Muazzez POLAT

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

29 Aralık 2024



YAYIN KURULU / EDITORIAL BOARD

- Prof. Dr. Metin AKKÖK, Orta Doğu Teknik Üniversitesi/Middle East Technical University, Ankara
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ, Çankaya Üniversitesi/Çankaya University, Ankara
Prof. Dr. L. Berrin ERBAY, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Eskisehir Osmangazi University, Eskişehir
Prof. Dr. Cemal MERAN, Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University, Denizli
Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK, Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University, Denizli
Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA, Trakya Üniversitesi/Trakya University, Edirne
Dr. Öğr. Üye. Gurbet ÖRÇEN, Dicle Üniversitesi/Dicle University, Diyarbakır

EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

- Prof. Dr. C. Erdem İMRAK, İstanbul Teknik Üniversitesi/Istanbul Technical University, İstanbul
Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ, Kocaeli Üniversitesi/Kocaeli University, Kocaeli
Prof. Dr. Ali GÜNGÖR, Ege Üniversitesi/Ege University
Prof. Dr. Hikmet RENDE, Akdeniz Üniversitesi/Akdeniz University, Antalya
Prof. Dr. Ali PINARBAŞI, Yıldız Teknik Üniversitesi/Yıldız Technical University,
Prof. Dr. Sedat BAYSEÇ, Gaziantep Üniversitesi/Gaziantep University
Prof. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi/Middle East Technical University, Ankara
Prof. Dr. Erol KILIÇKAP, Dicle Üniversitesi Dicle University, Diyarbakır
Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL, Gazi Üniversitesi/Gazi University, Ankara
Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU, Gazi Üniversitesi/Gazi University, Ankara
Prof. Dr. Miroslaw BONEK, Silesian University of Technology, Poland
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi/Karadeniz Technical University, Trabzon
Prof. Dr. Leszek A. DOBRZANSKI, Silesian University of Technology, Poland
Prof. Dr. Ö. Altan DOMBAYCI, Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University, Denizli
Prof. Dr. Halim GÜRGENCI, Queensland Üniversitesi/The University of Queensland, Australia
Prof. Dr. Hyung-MAN KIM, Power System and Sustainable Energy Laboratory (PSSEL), South Korea
Prof. Dr. Basim AL-NAJJAR, Linnaeus University, Sweden
Prof. Dr. Barış ÖZERDEM, İzmir Ekonomi Üniversitesi/Izmir University of Economics, İzmir
Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN, ESOGÜ/Eskisehir Osmangazi University, Eskişehir
Doç. Dr. Tunç APATAY, Gazi Üniversitesi/Gazi University, Ankara
Doç. Dr. Yiğit TAŞÇIOĞLU, TED Üniversitesi/TED University, Ankara
Dr. Öğr. Üye. Nurdan BİLGİN, Ondokuz Mayıs Üniversitesi/Ondokuz Mayıs University, Samsun
Dr. Öğr. Üye. Kutluk Bilge ARIKAN, TED Üniversitesi/TED University, Ankara
Dr. Varlık ÖZERCİYES, AIRBUS, UK



*TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayın Organı olan Mühendis ve Makina dergisi TMMOB Makina Mühendisleri Odası üyelerine ücretsiz olarak gönderilir. 1957 yılından beri yayımlanan dergimiz, **hakemli** bir dergidir. Dergimizle ilgili detaylı bilgi almak için www.mmo.org.tr genel ağ adresinden yararlanabilirsiniz. Telefon, faks veya e-posta aracılığıyla da bize ulaşabilirsiniz.*

Dergimizin yer aldığı veritabanları



İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

	Sayfalar
60° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizisinde Isı Transferi Etkilerinin İncelenmesi Investigation of Heat Transfer Effects in A Confined Impinging Jet Array With 60° Inclined Secondary Jets Haluk KELEŞ, Yücel ÖZMEN	598-627
Elektronik Atıkların Geri Dönüşümü İçin Ön Kırma ve Öğütme Ekipmanının Tasarımı Design of Pre-Shredding and Grinding Equipment For The Recycling Of Electronic Waste Furkan BULUT, Ayhan ÇELİK	628-642
A Qualitative Comparison of Dimensional Deviation of Laser Powder Bed Fusion Processed Multi Morphology Lattice Structures Based on Thermomechanical Simulations Lazer Toz Yatağı Füzyon Yöntemi ile Üretilmiş Çoklu Morfoloji Kafes Yapılarının Boyutsal Sapmasının Termomekanik Simülasyonlara Bağlı Niteliksel Bir Karşılaştırması Orhan GÜLCAN, Kadir GÜNAYDIN, Ugur SIMSEK, Cemal Efe GAYIR	643-658
Düzce İli Hava Şartlarında Bir Hanede Fotovoltaik Pil Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkisi ve Ekserji Analizi Effect of Photovoltaic Battery Use on Energy Efficiency and Exergy Analysis In A House In Düzce Province Weather Conditions İrem DÜZDAR, İlay Özge ERYILMAZ	659-674
Otomotiv Sektörü Aydınlatma Ürünleri Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Kullanılan DIN 1.2343 Çeliğinin Dalma Erozyon Yöntemi İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülük Değerine Etkisinin İncelenmesi Investigation Of The Effect Of Plunge Erosion Machining Parameters On The Surface Roughness Value Of DIN 1.2343 Steel Used In Plastic Injection Molds For Automotive Industry Lighting Products Mert ÇELİK, İbeyi KILAVUZ	675-693
Havacılık Alanında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi Ve Dijital İkiz Bağlantısının Değerlendirilmesi Evaluation Of Product Lifecycle Management and Digital Twin Integration In Aviation Field İsmail DEMİRCAN	694-711
CMMI Sertifikalı Bt Şirketlerinin Endüstri 4.0'a Hazırlık Durumu: Kolay Ölçüm İçin Bir Yöntem Önerisi Readiness of CMMI Level 4-5 Certified It Companies For Industry 4.0: A Systematic Evaluation And Measurement Approach Hakan YILDIRIM, Cihan ÜNAL	712-740

Derleme Makaleleri / Review Articles

	Sayfalar
An Overview of Türkiye's Renewable Energy Outlook Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Görünümüne Genel Bakış Zafer ÇAKMAK	558-597



AN OVERVIEW OF TÜRKİYE'S RENEWABLE ENERGY OUTLOOK

Zafer ÇAKMAK*

İstanbul Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Yönetimi ve Organizasyon Ana Bilim Dalı, İstanbul

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-23890179>

Keywords

Türkiye energy profile, renewable energy, clean energy, carbon emissions

Abstract

A critical outcome of climate change and energy security concerns is the need to diversify energy sources. In this context, renewable energy emerges as a significant opportunity. Türkiye has significant potential in terms of renewable energy resources. In particular, the widespread use of wind and solar energy sources has gained momentum since 2011. In recent years, Türkiye's renewable energy sector has experienced rapid growth and is poised to become a prominent player among European countries in this field. This article provides a comprehensive overview of the renewable energy sector in Türkiye. The study was conducted using the document analysis method. The information presented in this article was taken from national and international reports, national energy plans, international agreements, energy company statistics and research papers. The results show that the renewable energy sector in Türkiye has experienced radical growth in the last fifteen years. Hydropower has been used for many years and Türkiye is one of the leading countries in terms of installed capacity. However, the development of installed wind and solar capacity is particularly noteworthy. Between 2010 and 2024, installed wind power capacity increased about sevenfold. Between 2015 and 2024, installed solar power capacity grew by about fifty times.

* zaferbcakmak@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.14225654

TÜRKİYE’NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ GÖRÜNÜMÜNE GENEL BAKIŞ

Anahtar Kelimeler

Öz

Türkiye enerji profili, yenilenebilir enerji, temiz enerji, karbon emisyonu

İklim değişikliğinin ve enerji güvenliği kaygısının kritik sonuçlarından biri de enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi zorunluluğudur. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji önemli bir fırsat olarak ortaya çıkmaktadır. Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi kaynaklarının yaygın olarak benimsenmesi 2011 yılından sonra ivme kazanmıştır. Son yıllarda Türkiye'nin yenilenebilir enerji sektörü hızlı bir büyüme kaydetmiştir ve bu alanda Avrupa ülkeleri arasında önde gelen bir oyuncu olmaya hazırlanmaktadır. Bu makale, Türkiye'nin yenilenebilir enerji sektörüne kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Araştırma doküman analizi yöntemine göre dizayn edilmiştir. Bu çalışmada sunulan bilgiler ulusal ve uluslararası raporlardan, ulusal enerji planlarından, uluslararası anlaşmalardan, enerji şirketi istatistiklerinden ve araştırma makalelerinden alınmıştır. Bulgular, Türkiye yenilenebilir enerji sektörünün son on beş yılda radikal bir büyüme yaşadığını göstermektedir. Hidroelektrik enerji uzun yıllardır kullanılmakta olup, Türkiye kurulu kapasite açısından önde gelen ülkelerden biridir. Bununla birlikte, özellikle kurulu rüzgâr ve güneş enerjisi kapasitesindeki gelişme dikkat çekicidir. 2010-2024 yılları arasında rüzgâr enerjisi kurulu gücü yaklaşık yedi katına çıkmıştır. Güneş enerjisi kurulu gücü ise 2015-2024 yılları arasında yaklaşık elli kat artmıştır.

Derleme Makalesi

Review Article

Başvuru Tarihi : 25.01.2024

Submission Date : 25.01.2024

Kabul Tarihi : 10.07.2024

Accepted Date : 10.07.2024

1. Introduction

A significant part of the current climate crisis is attributed to greenhouse gas emissions resulting from the burning of fossil fuels, including coal, oil, and natural gas. Using these fuels contributes to global warming and leads to air pollution, health issues, and geopolitical conflicts (Caineng et al., 2021). Global population growth and the industrialization race between nations are increasing energy consumption and further deepening the climate change crisis (Begum, Sohag, Abdullah and Jaafar, 2015). In response to this challenge, the Paris Climate Agreement was established in 2015 to mitigate climate change, foster adaptation, and ensure financial support. After this accord, countries committed to achieving their zero-emission targets (European Commission, n.d.-a). Concurrently, the Russian-Ukrainian conflict that erupted in 2022 introduced a distinct energy crisis (International Energy Agency, n.d.). Especially in energy-intensive European nations, this crisis's repercussions manifest in energy supply constraints, a persistent and prominently discussed issue.

Renewable energy is a common solution for addressing the climate crisis caused by energy consumption and the energy supply issues triggered by the Russia-Ukraine conflict. It drives the global shift towards a more sustainable and environmentally conscious energy paradigm (Adams and Acheampong, 2019). Renewable energy helps countries reduce their carbon emissions and ensure energy security. Offering a sustainable, clean, and secure alternative to fossil fuels, renewable energy sources such as wind, solar, geothermal, hydropower, and bioenergy emit minimal or no greenhouse gases. Moreover, they diminish reliance on imported fuels, foster job creation, economic prospects, and fortify energy security. The transition to renewable energy empowers countries to mitigate the impact of climate change, abate air pollution, and kindle innovation and progress (Adjei-Mantey and Adams, 2023; Sarkodie and Adams, 2018)

Türkiye, a developing country with an 85 million population and a burgeoning industrial sector (Turkish Statistical Institute, 2023), witnesses a substantial annual escalation in energy consumption. Türkiye's geographical location between Asia and Europe highlights its importance in terms of energy security. Türkiye is committed to the Paris Climate Agreement and aspires to achieve zero emissions by 2053 (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a). This ambitious objective underscores the promise of renewable energy sources within Türkiye and reflects the nation's dedication to an environmentally sustainable energy mix. While historically reliant on fossil fuels, Türkiye has markedly amplified its investment in renewable energy during the past 15 years. Long accustomed to hydroelectric power, Türkiye began harnessing wind power in the early 2000s and solar power in 2015 (Yilmaz, 2012). Notably, enacting the

Renewable Energy Law in 2011 (Official Journal of Türkiye, 2011) bolstered investment incentives, leading to cultivating a robust renewable energy ecosystem based on five sources: wind, solar, hydro, geothermal, and biomass. Presently, energy generated from this relatively nascent sector constitutes around 16% of the total energy output. According to Türkiye's National Energy Plan (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a) targets, this proportion is projected to surpass 40% by 2035.

This article provides a comprehensive overview of renewable energy sector in Türkiye. It looks at existing renewable energy sources and their development. Based on data from national and international sources, the progress of Türkiye in the field of renewable energy is presented. It also compares Türkiye's renewable energy resources with those of leading clean energy countries.

2. Conceptual Framework

2.1 Energy Structure in World

Energy plays a crucial role in nearly all human activities, and its utilization is steadily increasing (BP, 2022). Energy usage revolves around two primary aspects: production and consumption. Certain countries wield significant influence over production, often rooted in dependence on traditional energy sources (IRENA, 2022). Notable examples include Russia, the USA, Saudi Arabia, and Venezuela, countries blessed with substantial natural gas or oil reserves (BP, 2022). Conversely, nations characterized by advanced industrialization, such as Germany, China, the USA, the UK, France, and Japan, also lead energy consumption (European Commission, 2022). Within this framework, energy flows from producing to industrialized countries unable to fulfill their energy demands domestically. Nevertheless, energy consumption has witnessed a marked surge due to rapid technological advancements and population growth. While some nations reap economic benefits from this surge, others grapple with associated challenges.

Figure 1 shows that energy consumption, which was about 43,308 terawatt-hours in 1965, has shown a continuous upward trend, reaching about 167,788 terawatt-hours in 2022. This figure represents a significant increase in global energy consumption during this period. Within each 5-year period, there is a consistent upward trend. This trend signals a continued increase in the coming years.

The escalation of total energy consumption has two major potential consequences. The first is the risk of an imbalance between production and consumption. Such an imbalance could disrupt energy transfers and adversely affect industries that require greater energy inputs (Michaelides, 2012). In scenarios where developed or developing countries with significant energy needs do not have access

to sufficient resources, economic growth could be hindered (Omri, 2014). Moreover, this imbalance could lead to fundamental challenges, including energy insecurity and disproportionate increases in energy prices (Armaroli and Balzani, 2007). The second consequence is the climate crisis. The increase in energy consumption exacerbates the problem of climate change. Since a significant portion of energy still comes from fossil fuels, continued reliance on these sources will inevitably lead to increased carbon dioxide emissions (Begum et al., 2015; Caineng et al., 2021). Given these significant challenges, it might be expected that countries would seek to reduce their energy consumption. However, as shown in figure 1, energy consumption continues to increase on an annual basis. As a result, countries are turning to alternative energy sources to mitigate the impact of these negative outcomes and meet their energy needs. These alternative sources are commonly known as renewable energy sources, which include solar, wind, hydropower, geothermal, biomass, and ocean energy (Kothari, Tyagi, and Pathak, 2010).

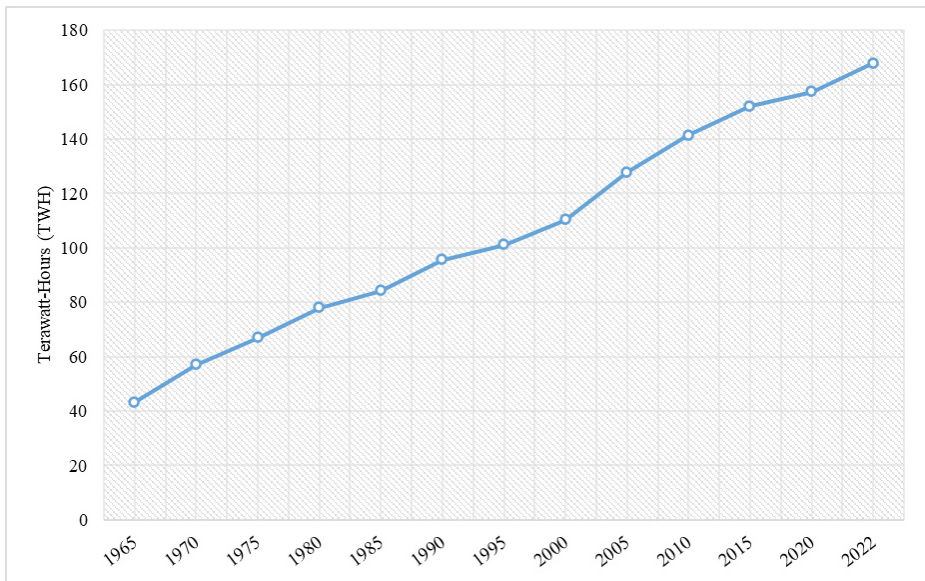


Figure 1. Total primary energy consumption by year (Ritchie, Rosado, and Roser, 2020, last revised in January 2024)

Developed countries, faced with limited energy resources such as natural gas and oil, have gradually shown increased interest in renewable energy sources. This strategic shift aims to reduce dependence on external energy suppliers by

utilizing energy from renewable sources (Kaygusuz, 2012). The 1973 oil crisis (Issawi, 1978) marked a significant turning point (Warlouzet, 2017). Triggered by OPEC countries restricting oil supply, this crisis led to a significant increase in oil prices, with particularly pronounced negative effects in the United States and European countries (Mitchell, 2010). This event triggered a transformational process, with Germany and the United States emerging as central actors in this transition (Balassa, 1981; Warlouzet, 2017). Germany embarked on a primary transformation strategy known as the “Energiewende”, a long-term energy and climate policy aimed at meeting energy needs from alternative sources and cultivating an environmentally conscious energy approach (Morris et al., 2012). Similarly, the United States of America has positioned itself as an early advocate and investor in renewable energy sources (Muhammed and Tekbiyik-Ersoy, 2020). In particular, it has laid out plans to meet a portion of its energy needs from alternative sources, particularly through the expansion of wind energy capacity. The aftermath of the Russia-Ukraine conflict in 2022 resulted in another energy crisis (International Energy Agency, n.d.). This crisis, which significantly affected the developed economies of Europe (European Council, 2022), once again underscored the critical importance of alternative energy sources. Over the past four decades, the energy landscape has undergone significant changes, driven by energy crises and climate change. Figure 2 shows energy consumption by resource use over the years. Notably, the use of renewable energy sources such as solar and wind has increased significantly since 2000.

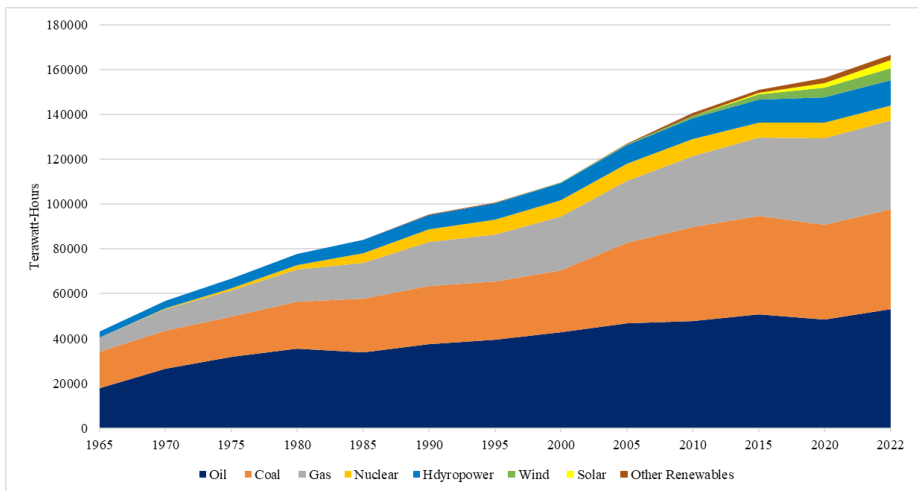


Figure 2. Total energy consumption by sources (Ritchie et al., 2020, last revised in January 2024)

While energy consumption has grown steadily over the years, the range of energy sources has also expanded. In particular, the last two decades have seen a remarkable increase in the use of renewable wind and solar resources. Nevertheless, the use of renewable energy sources remains significantly overshadowed by the prevalence of fossil resources. In 2022, oil, coal and natural gas still accounted for the majority of global energy consumption. As a result, the heavy reliance on fossil fuels contributes to the escalation of energy-related carbon emissions. The magnitude of carbon dioxide emissions has increased significantly over the past half century. In 1920, global carbon dioxide emissions from fossil fuel combustion and industrial processes totaled approximately 3.52 million tons; however, by 2022, this alarming figure had risen to approximately 37.15 million tons (Statista, 2024a). Consequently, heightened concerns regarding carbon emissions and their far-reaching effects are imperative. Given that the sources used to generate energy are a significant driver of this escalation, the need for cleaner energy sources will take center stage in the coming years.

2.2 Energy Structure of Türkiye

The energy sector plays a central role in Türkiye's economic and social development. The relationship between energy consumption and GDP growth is robust, with periods of reduced energy consumption often coinciding with economic slowdowns (Ocal and Aslan, 2013). Türkiye appears to be a country that has recently increased its energy demand. The reasons for this increase include factors such as the growth of the industrial sector, rapid population growth and urbanization (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a). Figure 3 shows Türkiye's increasing energy consumption over the years. As the figure shows, Türkiye's energy consumption has tripled in the past two decades. In 1990, it was 51 million tons of oil equivalent (Mtoe), but by 2022, it had risen to 156 Mtoe. Given this significant escalation, the trajectory strongly suggests a continued increase in energy consumption for the foreseeable future.

The National Energy Plan of Türkiye (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a), published by the Ministry of Energy, provides insightful projections of future energy consumption trends in Türkiye, as shown in Figure 4. Projections of future energy use show a discernible trend of increasing energy consumption, primarily driven by the use of current energy sources. The importance of solid fuels, gasoline, and natural gas continues to be emphasized, as these resources will continue to be used intensively. At the same time, the share of renewable energy sources is expected to increase gradually, rising to 48.7 million tons of oil equivalent (Mtoe) in 2035, a significant increase from 24.6 Mtoe in 2020. In line with these developments, Türkiye's ongoing nuclear power

plant construction is scheduled to be commissioned in 2025. As outlined in the National Energy Plan of Türkiye, projections show an increase to 4 Mtoe in 2025, 8 Mtoe in 2030, and a peak of 12 Mtoe in 2035.

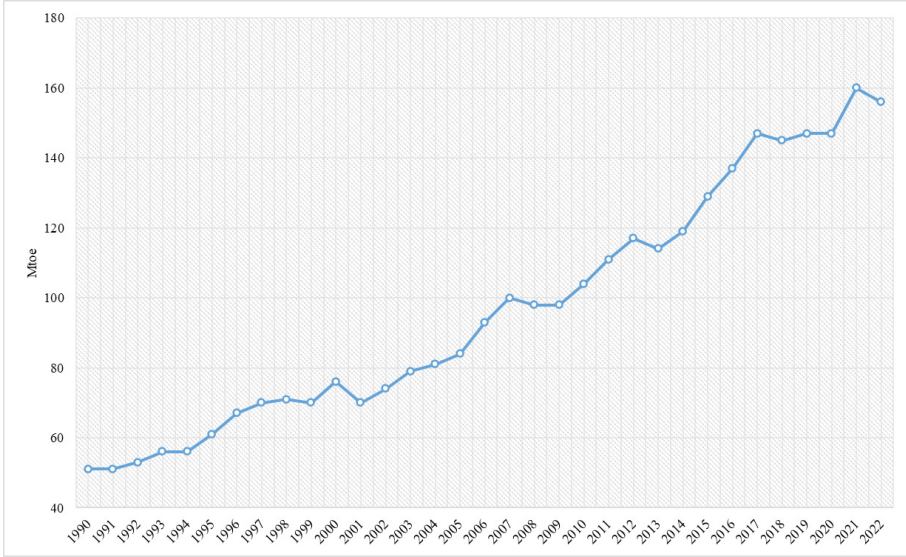


Figure 3. Türkiye's Energy Consumption (Enerdata, 2024)

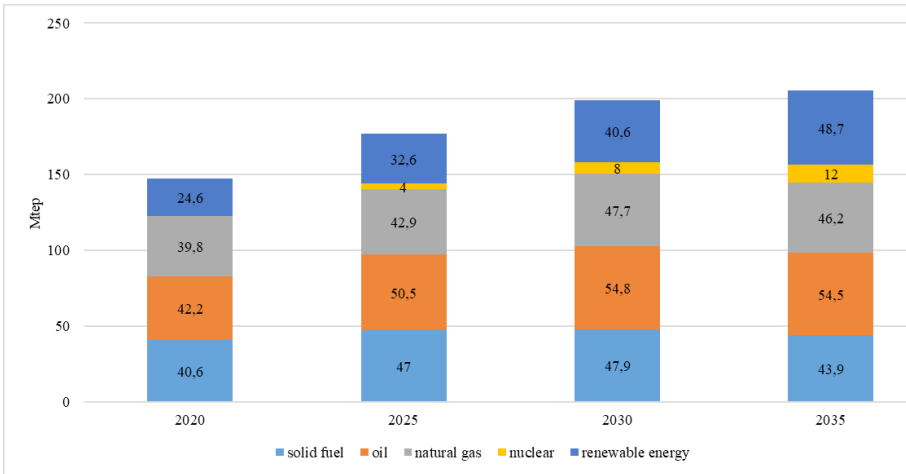


Figure 4. Primary Energy Consumption by Sources-Türkiye (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a)

Increasing energy consumption is central to powering various facets of modern society, including transportation, manufacturing, and residential electricity use (Ozcan, Tzeremes, and Tzeremes, 2020). As the world's population grows and economies develop, energy demand is expected to increase. In this context, it is imperative to find sustainable resources with minimal negative impact on the environment to meet this demand. The provision of reliable and affordable energy plays a pivotal role in promoting economic development and raising living standards, especially in emerging economies (Khan et al., 2021; Omri, 2014). The provision of reliable and affordable energy plays a pivotal role in promoting economic development and raising living standards, especially in emerging economies (Khan et al., 2021; Omri, 2014). Energy is a key driver of industry, transportation systems, households, and essential services such as health care and education. Lack of adequate energy access can hinder economic growth, as businesses and industries face obstacles without reliable electricity (Stern, 2019). Increasing energy consumption in emerging markets is a critical tool for driving economic progress, alleviating poverty, and improving the quality of life for populations (Ozcan et al., 2020).

As energy consumption increases, the origin of these energy sources becomes even more important. Türkiye's escalating energy demand underscores the need to diversify energy sources and increase production capacity (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a). In particular, a significant portion of Türkiye's energy resources are imported, making energy security a critical concern (İnançlı and Aylin, 2020). Therefore, Türkiye is actively implementing various measures to reduce its dependence on external energy resources, emphasizing the use of domestic resources and investments in renewable energy sources. Türkiye's energy mix includes a variety of resources, including coal, natural gas, hydroelectric, wind, and solar power (see Figure 5).

Figure 5 shows a diverse mix of energy sources, with a significant share coming from renewable sources (hydropower, solar, wind, and geothermal), which together account for over 54% of Türkiye's installed power capacity. This diversity indicates a balanced approach to the use of both conventional and renewable energy sources. However, a broader perspective requires examining the trajectory of energy supply over the years and closely monitoring the progress of renewable energy development.

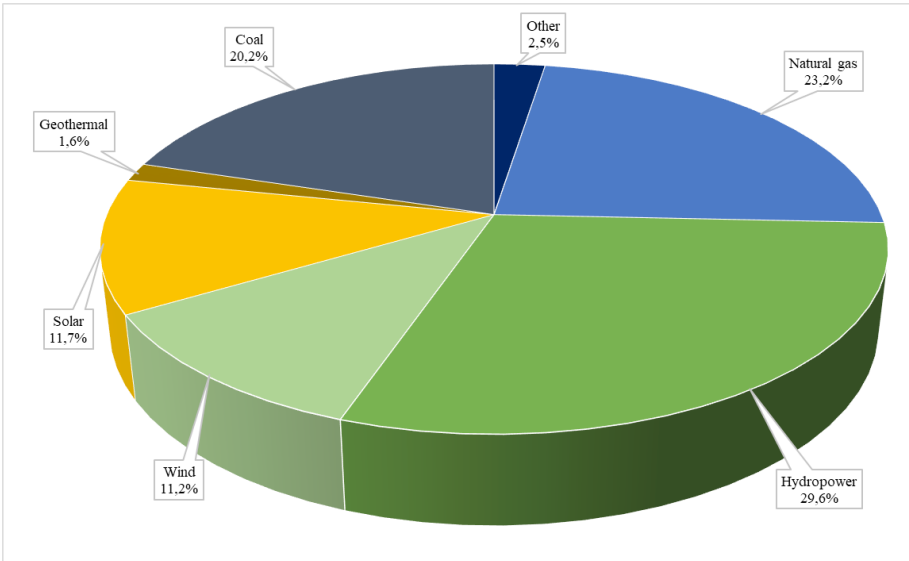


Figure 5. Türkiye's installed power capacity by source, 2024 (March) (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2024)

Upon examination of figure 6, which depicts Türkiye's energy supply sources over the period from 1990 to 2022, it becomes evident that there have been significant transformations. In 1990, gasoline and coal were the primary energy contributors, collectively accounting for approximately 75% of the total energy supply. By 2000, there had been a notable increase in the prominence of natural gas, a trajectory that persisted through subsequent years. Türkiye's strategic utilization of natural gas as a prominent energy source is grounded in multifaceted reasons, including its unique geographical location. The nation serves as a pivotal conduit connecting the East and the West, facilitating the passage of natural gas pipelines from Russia and Azerbaijan to Europe (Melikoglu, 2013; Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a). Furthermore, the bilateral relations and agreements with Russia and Azerbaijan have established natural gas as a vital cornerstone of Türkiye's energy landscape (Petform, n.d.). It is anticipated that natural gas will retain its significance as a pivotal energy source in the forthcoming years. A parallel surge is discernible in the arena of renewable energy sources, specifically wind and solar, which have undergone notable growth over the past three decades. While holding a relatively minor share in 1990, these sources underwent substantial advancement after 2000, culminating in a noteworthy contribution in 2022. This impressive surge can be attributed to a multitude of factors. These will be discussed in greater detail in the subsequent section.

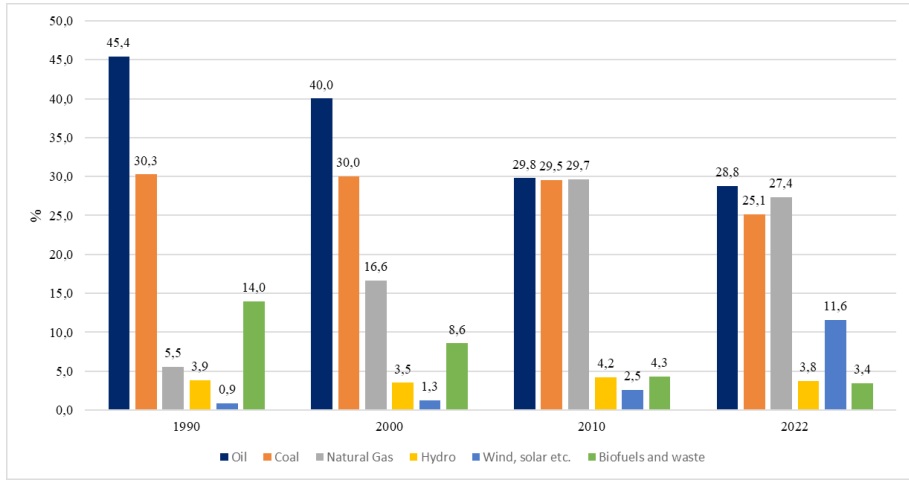


Figure 6. Türkiye's total energy supply by year (%) (International Energy Agency, 2022)

Despite commendable progress in renewable energy, Türkiye's energy landscape remains heavily anchored in fossil fuels (see figure 6), with natural gas in particular playing a significant role in electricity generation. This reliance on fossil fuels can be attributed to escalating energy demand and the need to ensure energy security. However, the country's investments in renewable energy (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-a) and the potential for further expansion in this area (Turkish Statistical Institute, 2023) indicate that the renewable energy sector will flourish in the coming years.

3. Method

The primary objective of this study is to comprehensively analyze and evaluate the current status and development of the renewable energy sector in Türkiye. In line with this objective, the study addresses the changes in the use of various renewable energy sources in Türkiye, such as wind, solar, hydropower, biomass, and geothermal, and compares these changes with other countries. This study is based on a comprehensive literature review focusing on the renewable energy landscape of Türkiye. The data collection process used various sources such as national and international reports, Türkiye's national energy plans, statistics from energy companies, and academic research articles. These sources were selected based on criteria such as timeliness, reliability, and direct relevance to the topic. Document analysis is the primary method used in this study. It involves the systematic examination of existing documents, allowing researchers to collect, analyze, and interpret the data found in these documents. Document analysis is

a process of detailed and systematic examination of written materials (Bowen, 2009). This method considers not only the content of the documents, but also their context, the intent of the authors, and the social and historical context in which they were created, providing researchers with an in-depth understanding (Scott, 1990). This study adheres to research and publication ethics.

4. Findings

The findings section of this research presents the results obtained from the documents analyzed according to the established criteria. These findings are intended to answer the research questions and to clarify the overall purpose of the study. In this study, 42 articles and 27 reports (including nationally and internationally published reports, data-containing website publications) were reviewed. As a result of the analysis, a general structure regarding the outlook of renewable energy in Türkiye has been identified and the findings have been presented under different headings. The identified topics are:

- Renewable Energy in Türkiye
- Wind Energy in Türkiye
- Solar Energy in Türkiye
- Hydropower in Türkiye
- Biomass Energy in Türkiye
- Geothermal Energy in Türkiye

4.1 Renewable Energy in Türkiye

The European Union has been actively engaged in endeavors to curtail greenhouse gas emissions as outlined by the Kyoto Protocol (United Nations, n.d.), concurrently adopting measures to foster the utilization of renewable energy sources (European Commission, 2022). The impetus behind these initiatives lies in the aspiration to curtail environmental pollution and ensure energy security. Notably, the effectiveness of these endeavors within the EU hinges on the synergy of political resolve and the determination exhibited by member states, signifying their pivotal roles in achieving the established objectives. Türkiye, as a nation that has enshrined EU membership as a key tenet of its national policy (Müftüler-Baç, 2018), is resolutely endeavoring to augment the proportion of renewable energy sources in its energy consumption matrix. To this end, the promotion of renewable energy utilization is incentivized, harmonizing international commitments and domestic imperatives, including mitigating energy import reliance (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a; Turkish

Statistical Institute, 2023). The establishment of administrative frameworks is actively underway to facilitate this transition. A good example is the National Program for the Adoption of the EU Acquis (2003) (European Commission, n.d.-b), where increasing the share of renewable energy sources in total energy production is one of the top priorities in the short term. Furthermore, there is a concerted emphasis on the imperative of augmenting the utilization of renewable energy sources, a pivotal component of ensuring energy supply security and an integral facet of the overarching energy policy. In alignment with these objectives, the Türkiye National Energy Plan (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a) explicitly outlines a resolute ambition: attaining a zero-emission target by the year 2053. The pursuit of this ambitious goal necessitates a marked escalation in investments dedicated to the development and expansion of renewable energy sources.

Figure 7 illustrates Türkiye's total CO₂ emissions from 1990 to 2021, expressed in million tons of carbon dioxide equivalent (Mt CO₂). Starting from 128.8 Mt CO₂ in 1990, emissions show a pronounced escalation over time, culminating in a peak of 400.8 Mt CO₂ in 2021. These emissions come primarily from the combustion of fossil fuels, including coal, oil, and gas. This emissions spectrum includes solid, liquid, and gaseous fuel consumption (Saidi and Omri, 2020; Zhang and Cheng, 2009). As one of the primary greenhouse gases, carbon dioxide is responsible for climate change and global warming, which underscores the importance of curbing its excessive emission for the ecological integrity and overall well-being of the planet (Ozturk and Acaravci, 2010). As a result, serious efforts are being made worldwide to mitigate carbon emissions, driven by the promotion of renewable energy sources and energy-efficient technologies and the implementation of sustainable practices. Carbon dioxide emissions are emerging as a significant environmental concern, manifested to varying degrees in different nations (Alkathery and Chaudhuri, 2021).

China is the country with the highest carbon emissions, with about 11.4 billion tons of CO₂ emissions in 2022. The US is also at the top of the list. It ranks second with about 5.06 billion tons of CO₂ emissions. China and the US are followed by India (2.83 billion tons of CO₂), Russia (1.65 billion tons of CO₂), and Japan (1.05 billion tons of CO₂) (Ritchie and Roser, 2020). Although Türkiye is relatively behind, it is very important for Türkiye to take measures in this area and reduce its CO₂ emissions. In this context, Türkiye has strategically increased its commitment to renewable energy in recent years in order to diversify its energy portfolio and reduce its dependence on fossil fuels. One of Türkiye's key goals in this regard is to achieve zero CO₂ emissions by 2053 (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-a). The sustainability of this trajectory and the achievement of these goals depends on maintaining and increasing investment in renewable energy sources.

Figure 8 depicts the projected upward trajectory of new solar and wind capacity installations through 2035. Between 2021 and 2035, 96.9 GW of new capacity is expected to come online, a significant portion of which will be from renewable sources. The goal is for renewables to contribute 74.5% of this new capacity growth, with solar and wind leading the way.

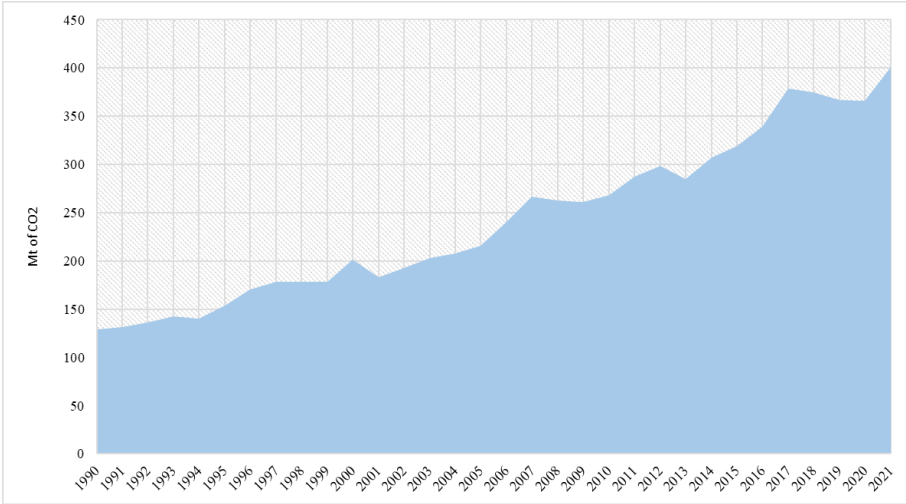


Figure 7. Total CO₂ emissions, Republic of Türkiye 1990-2021 (International Energy Agency, 2022)

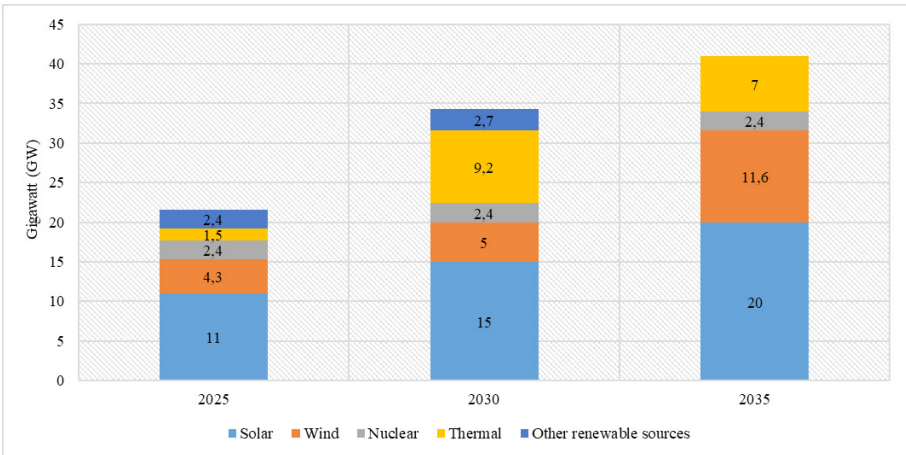


Figure 8. New capacity to be commissioned every five years (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a)

The main renewable energy sources in Türkiye include wind, solar, hydropower, geothermal, and biomass (Erdil and Erbiyık, 2015). Currently, hydropower is the largest contributor, followed by wind, solar, and biomass (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-a). In particular, geothermal energy is rapidly gaining importance in Türkiye due to the country's significant geothermal potential, which is among the largest in the world (MTA, n.d.). Türkiye has significant potential in wind and solar energy resources (Kaya, Aksoy, and Kose, 2017), and over the past decade it has been progressively harnessing this potential (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-a). Following the momentous achievement of establishing its first wind power plant in 1999 (Erdogdu, 2009), Türkiye took another significant step by inaugurating its first solar power plant in 2015 (Turkish Coal Enterprises, 2021). With each passing day, Türkiye is improving its competitive position in the renewable energy sector and joining the ranks of leading nations in this field. Figure 9 shows the distribution of generated energy by source and the changes in this distribution over the years.

As shown in Figure 9, hydropower has consistently maintained its importance as a prominent renewable energy source in Türkiye and has maintained its development trajectory. In 2022, hydropower maintained its status as the leading renewable energy source, generating approximately 67 terawatt-hours (TWh) of energy. At the same time, energy production from wind, solar, and other renewable sources also showed an upward trajectory over the same period, with significant increases observed since 2009. In particular, the rise of solar energy has been particularly notable, with a steady increase since the commissioning of the first plant in 2015. By 2022, energy production from wind reached 35.14 TWh, solar generated 15.91 TWh, and other renewable sources contributed 20.30 TWh to the nation's energy mix.

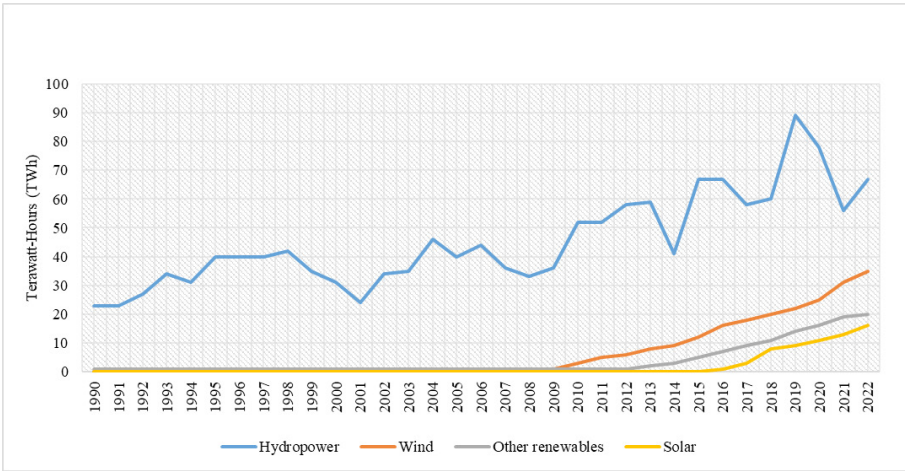


Figure 9. Türkiye's renewable energy generation by source and year (ourworldindata, n.d.)

In assessing Türkiye's progress in renewable energy, a valuable perspective emerges through a comparative lens with countries that embarked on renewable energy investments much earlier, such as Germany, the United States, and China (Balassa, 1981; Peidong et al., 2018; Warlouzet, 2017). Figure 10 illustrates the current status of these countries in terms of the share of renewable energy in their primary energy mix. This representation highlights the extent to which renewable energy contributes to the overall energy matrix in frontier countries.

Figure 10 shows the share of renewable energy sources in primary energy consumption for some countries and regions in 2022. Türkiye obtains 18.85% of its consumed energy from renewable sources. This share is higher than the OECD average, but lower than the EU average. In particular, northern European countries such as Norway and Sweden lead the pack with robust renewable energy penetration. In addition, Brazil is a notable example, with nearly half of its primary energy coming from renewable sources, giving it a prominent position in renewable energy.

The complex interplay of a country's resources, population, spending, and level of industrialization all influence its energy production and consumption patterns. As shown in Figure 10, countries with lower rates (such as China and the United States) may have higher renewable energy capacity. However, countries that get most of their energy from renewables may also have lower capacity. Thus, the total amount of renewable energy used by countries is a key determinant.

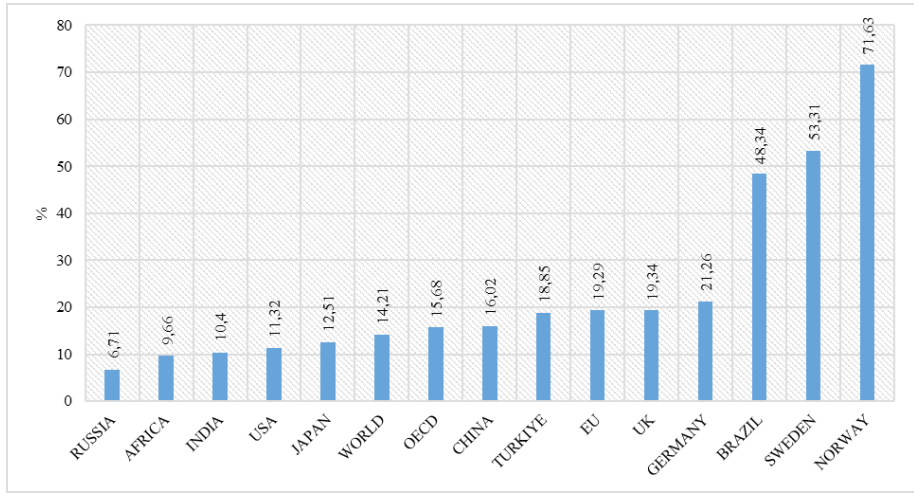


Figure 10. How much of our primary energy comes from renewables (%)? (Ritchie et al., 2020, last revised in January 2024)

Figure 11 shows China's commanding lead in renewable energy capacity (1454 GW). The United States ranks second with 388 gigawatts, followed by Brazil and India with 194 and 176 gigawatts, respectively. Türkiye's renewable energy capacity, at 58 gigawatts, lags significantly behind China and the United States. However, the country's ranking remains notable as it is only slightly behind major energy players such as France and Italy. In comparison, Türkiye's renewable energy capacity lags behind that of Germany, which serves as the vanguard of Europe's renewable energy efforts. This significant gap in capacity underscores the urgency for Türkiye to increase capacity and investment in renewable energy.

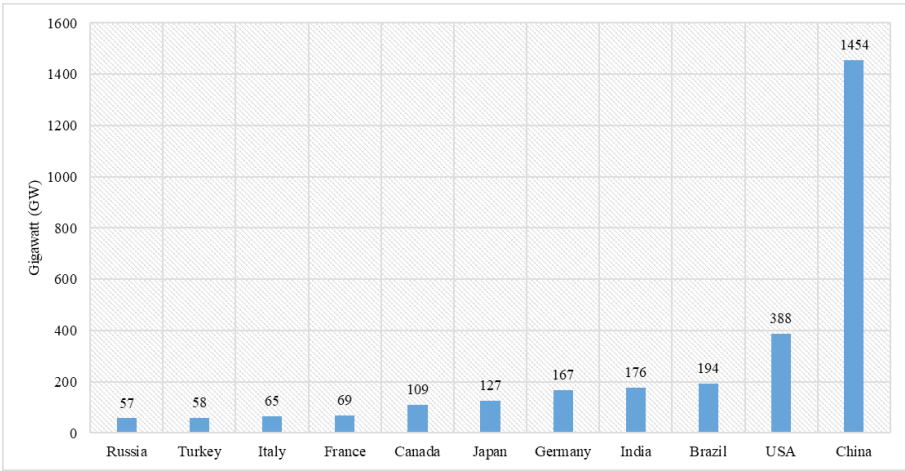


Figure 11. Top 10 countries and Türkiye according to total renewable energy capacity, 2023 (IRENA, 2024)

4.2 Wind Energy in Türkiye

Wind energy is a promising renewable energy source (European Wind Energy Association, 2009). It is a method of energy production that requires minimal transportation and advanced technology. Furthermore, wind energy is naturally abundant in the atmosphere, making it an environmentally friendly option (Erdem and Şenel, 2013; Nazir, Ali, Bilal and Iqbal, 2020). This form of energy is harnessed through wind turbines, and technological advancements have reduced the cost of producing electricity from wind sources. As a result, many countries are actively supporting wind energy initiatives (Nelson, 2009) to make it a competitive alternative to fossil fuels. This strategic approach promotes the adoption of cost-effective and environmentally conscious energy solutions, ultimately supporting sustainable energy production (Sadorsky, 2021).

Türkiye has significant wind energy potential due to its strategic geographical location and diverse topography. The intersection of different climatic zones places the country in an advantageous position for wind energy utilization (Özkan, Yeter, and Gedikli, 2022). Data from the Turkish Ministry of Energy and Natural Resources (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-b) indicate a theoretical wind energy capacity of approximately 48 GW for Türkiye, with an average annual wind speed of 7-8 m/s. As of March 2024, Türkiye's installed wind power capacity is approximately 12 GW, or about 10.81% of total installed capacity (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-b).

The main areas for wind energy development in Türkiye include the Aegean and Mediterranean coasts, as well as mountainous regions in the interior. Notable provinces with high wind energy potential include Izmir, Balıkesir, Canakkale, and Manisa (Özkan et al., 2022). The country has introduced several measures to promote the growth of wind energy, including feed-in tariffs, tax exemptions, and investment incentives. With an ambitious goal of reaching 34 GW of installed wind power capacity by 2030, Türkiye is poised to make significant progress toward its renewable energy goals (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-b). Despite a delayed start, Türkiye’s considerable wind energy potential (Şenel and Erdem, 2015) has gained momentum. The installation of the first wind turbine in 1999 marked the first foray into electricity generation (Erdogdu, 2009). Subsequent years, especially 2005, witnessed significant progress as concerted efforts were made to promote wind energy. The introduction of the Renewable Energy Law in 2010 catalyzed a significant increase in wind power installations. Recent years have witnessed remarkable progress in the development of wind energy (Official Journal of Türkiye, 2011; Official Legislation of Türkiye, 2005). Figure 12 graphically illustrates the upward trajectory of Türkiye’s wind energy capacity, which has been consistently increasing each year. As of March 2024, the installed capacity has remarkably increased to approximately 12 gigawatts, an impressive sixfold increase from the capacity recorded in 2011.

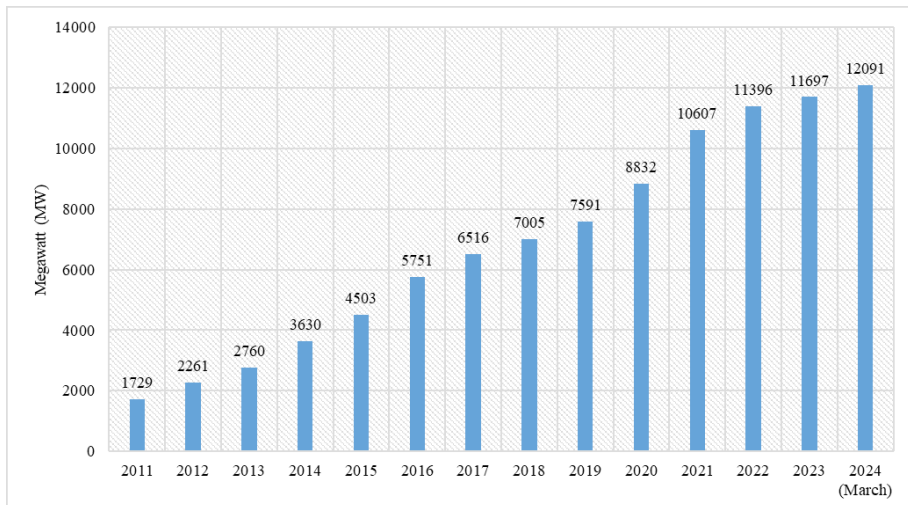


Figure 12. Türkiye’s installed power capacity based on wind energy (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-b.; TEİAŞ, 2024)

The wind energy sector is one of the fastest growing areas of the renewable energy

sector on a global scale. According to the Global Wind Energy Council (2022), the cumulative installed wind power capacity worldwide has exceeded 750 GW. As shown in figure 13, China leads the way with more than 365 GW of installed capacity, followed by the United States with more than 140 GW, Germany with a robust 66 GW, India with more than 41 GW, and the United Kingdom with more than 28 GW. Other major contributors to wind capacity include Spain, France, Brazil, Canada, Italy. Türkiye has rightly earned its place in this group of countries, thanks to significant investment in the sector in recent years. In fact, China and the United States currently have significant shares of global installed wind capacity. The upward trajectory of Türkiye's wind energy capacity is promising. As the global renewable energy landscape evolves, Türkiye's commitment to expanding its wind energy sector can undoubtedly contribute to its sustainable energy goals and position within the international renewable energy arena.

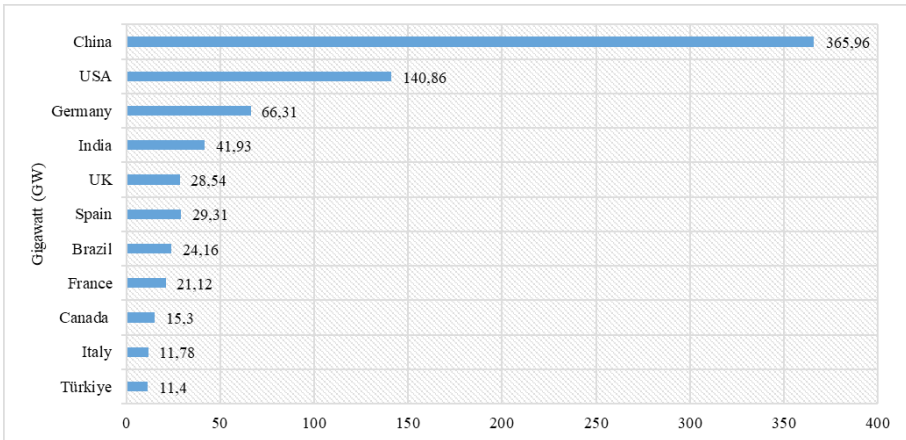


Figure 13. Installed wind power capacity, 2022 (Ritchie, Rosado and Roser, 2023)

4.3 Solar Energy

Solar energy is considered an environmentally clean source in many fields (Rabaia et al., 2021). Since the 1970s, research on solar energy has accelerated, and solar energy systems have developed technologically, leading to a decrease in cost (Güney, 2022). Solar energy is used for various purposes, such as air conditioning and hot water supply in residential and commercial buildings, greenhouse heating, and crop drying in agriculture. In industry, solar ovens, solar cookers, seawater desalination, solar pumps, solar batteries, and heat pipe applications are some examples of solar energy applications. Solar energy has a wide range of applications, from communication devices to automation systems to power generation (Tsoutsos, Frantzeskaki, and Gekas, 2005).

Solar energy has a wide range of applications and its potential performance varies according to the geographical location and climate of different countries (Lehtola and Zahedi, 2019). Due to its geographical location, Türkiye is one of the countries with high solar energy potential. The total sunshine duration in the country has been determined to be 2,737 hours per year, which corresponds to 7.5 hours of daily sunshine (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022b; Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2023). Although Türkiye has the potential of solar energy, it started using it relatively late. The first solar energy congress was held in 1975 and studies have been conducted continuously (Çetin, Turan and Bayrakdar, 2019). However, the deployment and production of solar energy started in 2014. Since then, the number of solar power plants has increased every year, and by 2024 (March), the share of solar energy in the installed capacity has reached 11.7% (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022b). Figure 14 provides a clear visual representation of Türkiye’s remarkable increase in installed solar capacity over the past decade. The growth momentum is striking, escalating from 40 megawatts in 2014 to 12631 megawatts by March 2024. This exponential increase demonstrates Türkiye’s strong solar energy potential, which is driving rapid growth.

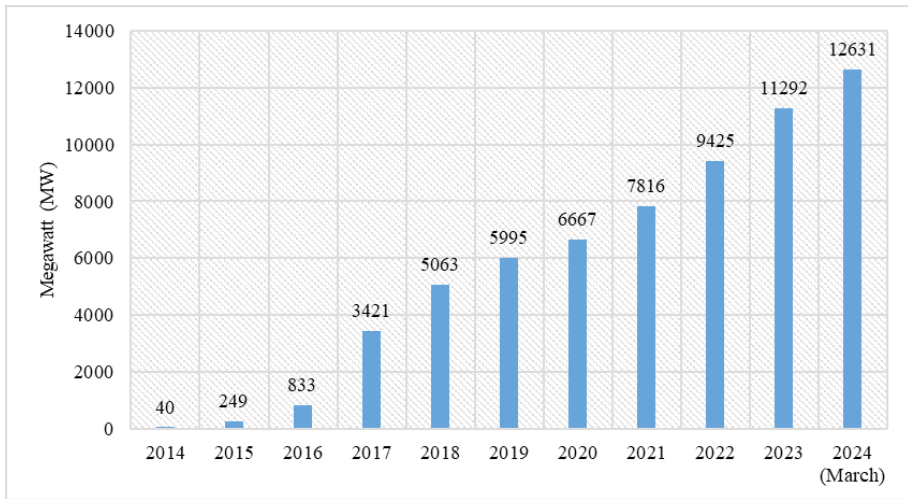


Figure 14. Solar Energy Installed Capacity, Türkiye (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-c; TEİAŞ, 2024)

Globally, solar power stands out as a rapidly expanding renewable energy source. Driven by cost reductions and government incentives, global installed solar

Table 1. Solar energy installed capacity by country [CAP (MW)] (IRENA, 2024)

Country	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
China	28399	43549	77819	130832	175262	204971	253964	306973	393032	609921
USA	17651	23442	34716	43115	51570	60826	75562	95209	114361	139205
Japan	23339	34150	42040	49500	56162	63192	69764	74191	83057	87068
Germany	37900	39224	40679	42293	45158	48914	53721	58461	67479	81739
India	3773	5693	9979	18252	27543	35203	39385	49684	63390	73109
Brazil	21	46	128	1207	2435	4613	7879	13055	25520	37449
Australia	5287	5946	6689	7354	8625	12969	17344	19076	29958	33683
Spain	7001	7008	7017	7027	7068	11143	12589	15952	25615	31016
Italy	18600	18907	19289	19688	20114	20871	21656	22698	24561	29795
Nether-lands	1007	1536	2135	2911	4608	7226	10950	14249	19600	23904
France	6034	7138	7702	8610	9672	10817	12031	14718	17350	20551
UK	5528	9601	11914	12760	13073	13346	13462	13689	14651	15657
Türkiye	40	250	834	3422	5064	5996	6668	7817	9426	11293

power capacity has grown significantly in recent years (Crowe and Li, 2020). This phenomenon is particularly evident in key solar energy players such as China, the United States, and India, where solar energy deployment and capacity have skyrocketed, reaching tens or hundreds of gigawatts (IRENA, 2024). In order to gain a comprehensive perspective of Türkiye's position in the field of solar energy, a comparative analysis with leading European and global nations is essential. Table 1 serves as a valuable reference, illustrating the installed solar energy capacities of these influential countries. This table provides an initial insight into Türkiye's development in the field of solar energy.

Solar energy represents a relatively nascent frontier for numerous countries (Hayat, Ali, Monyake, Alagha, and Ahmed, 2019). Table 1 illustrates the transformative journey within the solar energy landscape. In 2014, Germany and Italy emerged as frontrunners with significant installed capacities, while the solar capacities of the Netherlands, Brazil and Türkiye remained modest. However, the following decade saw a remarkable evolution as these countries expanded their solar power capabilities. By 2023, China had risen to the top of the leaderboard with 609 GW of installed capacity, followed by the United States with 139 GW and Japan with 87 GW. A notable shift is evident in the solar energy landscape of Türkiye, which has seen a significant increase in installed capacity over the past decade. Similarly, the Netherlands and Brazil have made impressive gains in solar capacity over the same period. The table underscores solar's dynamic evolution and growing importance in global energy portfolios.

4.4 Hydropower in Türkiye

Türkiye has significant hydropower potential due to its geographical location and numerous rivers (Akpınar, Kömürcü and Kankal, 2011). The country has been using its hydropower resources for electricity generation since the 1950s (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-d), and hydropower is currently the largest renewable energy source in Türkiye (International Energy Agency, 2022). According to the International Hydropower Association (2022), as of 2021, Türkiye had a total installed hydropower capacity of 31.4 GW, making it the second largest hydropower producer in Europe after Norway.

Most of Türkiye's hydropower plants are located in the eastern and northeastern regions of the country (Sayan, 2019). The largest hydropower plant in Türkiye is the Atatürk Dam, which has an installed capacity of 2,400 MW. Türkiye has also been investing in small hydropower projects. (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-d).

Hydropower has been used for electricity generation for a longer period of time than wind and solar renewable energy sources, which have become more popu-

lar in recent years (Akpınar, Kömürcü and Kankal, 2011). Hydropower, the most important instrument in the renewable energy market of Türkiye, accounts for a significant part of renewable energy (International Energy Agency, 2022). According to the predictions of the international communities in line with the zero-carbon target, hydropower will remain necessary until 2050 (International Hydropower Association, 2022; Nautiyal and Goel, 2020). Figure 15 shows the leading countries in terms of hydropower capacity. China leads with 414.8 GW of installed capacity. It is followed by Brazil (109.8 GW) and the United States (102 GW). Türkiye is also among the top ten countries in terms of installed hydropower capacity.

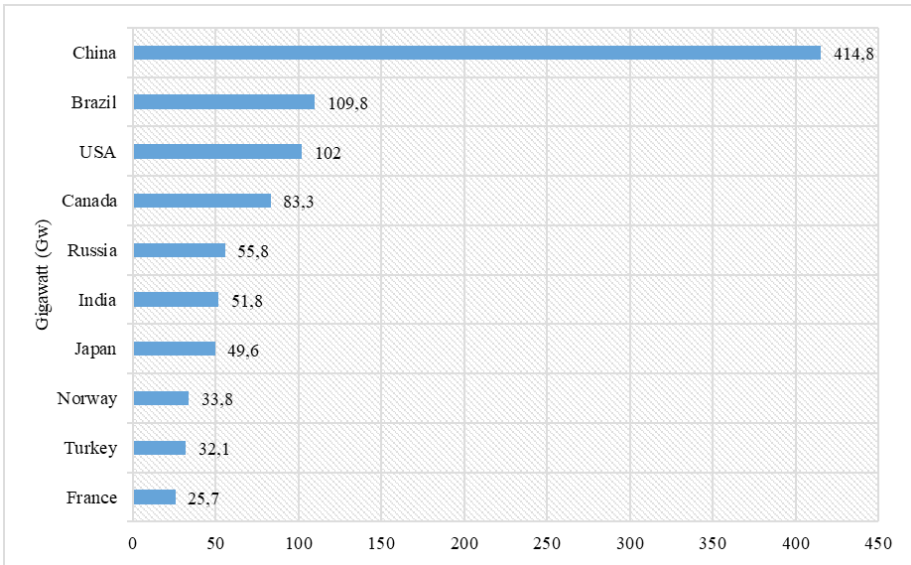


Figure 15. Leading country according to Hydropower installed capacity-2022 (Statista, 2024b)

Hydropower stands out as an important energy source in Türkiye. As of March 2024, hydropower accounts for approximately 29.6 percent of Türkiye's installed capacity (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-d).

4.5 Biomass Energy in Türkiye

Biomass energy is produced from organic matter such as plant matter, agricultural residues, and by-products of forestry activities (Wang, 2019). It is a renewable and sustainable source of energy because the organic matter can be replenished through natural processes (Zafar, Sinha, Ahmed, Qin and Zaidi, 2021). Biomass can be converted into various forms of energy such as electricity, heat or

biofuels through various processes such as combustion, gasification. (Wang, Bui, Zhang and Pham, 2020). Biomass energy is a renewable energy source that is widely used today. It is a sustainable source to meet the rapidly growing demand for energy. In particular, its availability in many places and its ability to reduce energy imports through local sourcing encourage countries to use biomass energy (Magazzino, Mele, Schneider and Shahbaz, 2021; Wang, 2019).

Türkiye has significant potential for biomass energy production due to its abundant agricultural and forestry resources. The main sources of biomass in Türkiye are crop residues, forestry residues, animal waste, and municipal solid waste (Avcioğlu, Dayıoğlu, and Türker, 2019). In recent years, Türkiye has made efforts to promote the use of biomass energy and increase its share in the country's energy mix. In 2011, a new law was passed to support the development of renewable energy sources, including biomass, and to provide incentives for investments in this sector (Official Journal of Türkiye, 2011). Biomass energy accounts for approximately 1% of total energy consumption in Türkiye (International Energy Agency, 2022). However, the relevant official institutions aim to increase this share to 5% by 2035 as part of the country's renewable energy targets (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a). To achieve this goal, Türkiye has launched several initiatives to promote the use of biomass, such as feed-in tariffs, tax exemptions, and subsidies for biomass energy projects (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-e).

Several biomass power plants are already in operation in Türkiye, and new projects are being developed. Overall, biomass energy has the potential to play an important role in Türkiye's energy mix, contributing to energy security, reducing greenhouse gas emissions, and promoting rural development (Gürel, 2020; Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-e). Figure 16 illustrates the changes in Türkiye's installed biomass capacity over the years. The growth from an installed capacity of 115 MW in 2011 to 2,080 MW in March 2024 is compelling and underscores the country's proactive stance on biomass energy deployment. The figure also illustrates Türkiye's position relative to global leaders in bioenergy.

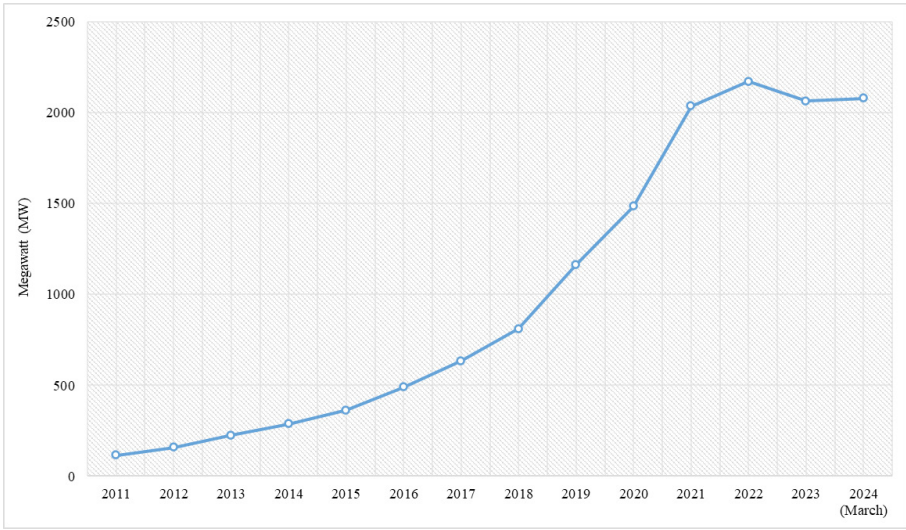


Figure 16. Türkiye's installed biomass power capacity (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-e; TEİAŞ, 2024)

Türkiye has made significant progress in the field of bioenergy and has significantly increased its installed capacity over the past decade. However, there is still a gap with the leading countries in the field. Figure 17 shows the leading countries in terms of installed bioenergy capacity. China leads with approximately 31 GW of installed capacity, followed by Brazil (17.5 GW), the United States (11 GW), India (10.7 GW), and Germany (10 GW).

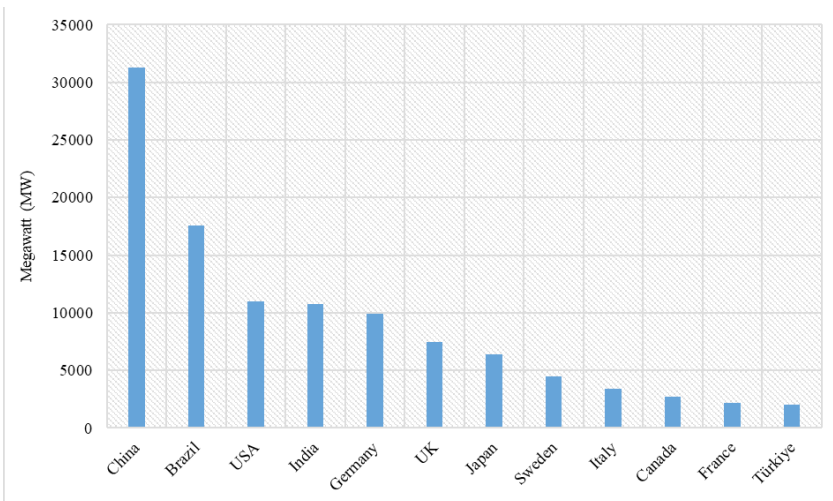


Figure 17. Leading countries by bioenergy installed capacity-2023 (IRENA, 2024)

4.6 Geothermal Energy in Türkiye

Geothermal energy, harnessed from the Earth's internal heat, is a potent energy source. This substantial reservoir of thermal energy resides in underground rocks and fluids (Lund and Toth, 2021). Geothermal power plants convert this heat into electricity through a complex process. Deep wells are drilled into hot rock formations and water is pumped up. The heated water is then converted to steam, which drives electric turbines (Archer, 2020). The intrinsic virtue of geothermal energy lies in its renewability and sustainability, as it leaves no harmful emissions or pollutants in its wake. Its diverse applications range from heating and cooling buildings to powering industrial processes (Wang, Liu, Dou, Li, and Zeng, 2020). This resource is primarily used in areas of high volcanic activity, such as Iceland, the Philippines, and certain regions of the United States. However, its applicability extends to various locations around the world, depending on geological conditions (Archer, 2020; Lund and Toth, 2021).

Türkiye has a rich geothermal potential. Geothermal resource areas are mainly located in the western Anadolu region of the country. About 85% of the geothermal resources are located in this region. Other important regions in terms of geothermal energy are Central Anatolia, Marmara and Eastern Anatolia (MTA, n.d.). The beginnings of geothermal energy in Türkiye date back to 1975, when the Kizildere power plant began generating electricity with a capacity of 0.5 MWe. Geothermal energy, which was used before the prominence of wind and solar energy, has experienced a significant increase in installed capacity since 2011 (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-f). Figure 18 shows the changes in installed geothermal capacity in Türkiye over the years. The last decade has seen a remarkable increase in installed geothermal capacity. This capacity increased from 114 MW in 2011 to 1727 MW in March 2024. While there was a significant acceleration between 2012 and 2019, the growth rate has slowed down in recent years.

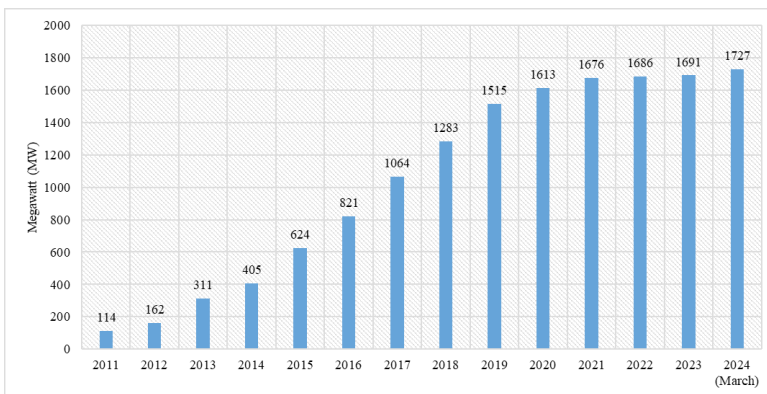


Figure 18. Geothermal energy installed capacity in Türkiye (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-f; TEİAŞ, 2024)

The installed capacity of geothermal energy remains relatively small compared to other renewable energy sources. In addition, on a global scale, the use of geothermal energy is relatively modest compared to other renewable alternatives. According to IRENA's 2024 Renewable Energy Capacity Statistics, the global installed capacity of geothermal energy is about 15 GW. Figure 19 shows the change in capacity over the years for the top four countries in the sector. Türkiye stands out as one of the leading countries with an installed capacity of 1676 MW.

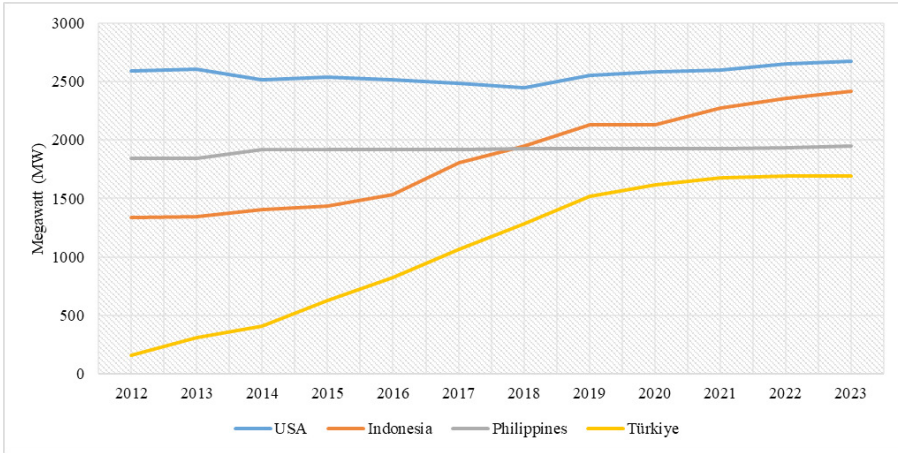


Figure 19. Top 4 countries by Geothermal Energy Installed Capacity (IRENA, 2024)

5. Discussion: Challenges and Opportunities for Türkiye's Renewable Energy Sector

In the field of renewable energy, wind and solar energy are important and popular sources. Although Türkiye started investing in wind and solar energy later than other leading countries, the development in the last fifteen years is quite significant (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a; Yilmaz, 2012). As the renewable energy landscape changes, Türkiye has become a major player in Europe with significant installed capacity (European Commission, 2022; European Union, 2021; International Energy Agency, 2022). Indicators point to a more prominent role for renewables in the energy mix, which brings challenges and opportunities (Özgül, Koçar and Eryaşar, 2020).

Türkiye's central focus is to align energy production with growing consumption and import dependency (Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a). While renewable energy can mitigate this dependence, ensuring an adequate energy supply remains paramount. Türkiye's energy structure, dominated by oil, coal, and natural gas (as shown in figure 5), is particularly inf-

luenced by natural gas agreements, suggesting a significant gas-based supply for the foreseeable future (Petform, n.d.). This, together with established fossil fuel dependencies, poses a transition challenge. In addition, the nascent renewable energy sector struggles with costly materials, including imported energy panels (Levenda, Behrsin and Disano, 2021). However, recent investments have promoted localized production, signaling a critical step forward (IRENA, 2022; Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, n.d.-a). The dominance of the private sector in renewable energy underscores the indispensability of government incentives (Akdoğan and Kovancılar, 2022). However, sporadic disruptions to these incentives warrant comprehensive, long-term strategies to ensure sustainable progress and minimize risk.

Although Türkiye renewable energy sector faces some challenges, it also offers many opportunities. In particular, the country's high potential for renewable resources encourages development (Özgül et al., 2020). As witnessed over the past decade (International Energy Agency, 2022; Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a; Ritchie, Roser, and Rosado, 2020), further harnessing this potential can position Türkiye among Europe's renewable energy leaders. International commitments (European Commission, n.d.-a; Kırılı and Fahrioğlu, 2019) encourage Türkiye to move towards carbon reduction targets. While limited skilled labor has historically hindered progress (Sinsel, Riemke, and Hoffmann, 2020), Türkiye's two-decade journey has enriched human capital (Mukhtarov, Yüksel, and Dinçer, 2022; Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources, 2022a). Maintaining this workforce is critical to the desired growth of the sector.

Türkiye has been using hydropower as a renewable energy source for many years. However, both local and global developments make it necessary to use wind and solar energy in renewable energy. As the use of renewable energy sources increases, it will make important contributions from several perspectives. First, Türkiye's dependence on fossil fuels such as natural gas requires the import of these resources from other countries. This situation can lead to the unsustainability of the current status in case of possible delays in the transfer. In addition, energy imports create a significant trade deficit. By diversifying renewable energy sources, important steps can be taken to achieve energy independence. Locally produced energy has the potential to make a significant contribution to the balance of trade. Second, the issue of energy security has become more important, especially with the Russia-Ukraine conflict. In particular, European countries with strong industries have suffered considerable damage. This period has once again highlighted the importance of energy routes and the need for countries to diversify their energy sources. Renewable energy is one of the most important tools for diversification. As a developing country striving to further

strengthen its industry, Türkiye needs to diversify its energy sources as much as possible to avoid potential damage from future conflicts. Third, fossil fuel pollution is becoming increasingly visible, and climate change is becoming more of an issue over time. In this context, every country has its own responsibilities, and Türkiye also has specific obligations. Investments in renewable energy can provide decisive benefits in addressing environmental issues.

The renewable energy sector, which is growing rapidly with investments and incentives from many countries, is a great opportunity for developing countries such as Türkiye, which has a high potential due to its geographical location. Wind and solar energy sources, which are classified as clean energy, stand out as the most popular energy sources today. Based on these two sources, Türkiye has a high potential. The return on investment is lower than in European countries of similar size. Therefore, investments in renewable energy sources have increased significantly, especially in the last decade. As can be seen from the data in the article, the installed capacity of wind and solar power has increased radically since 2010. At this stage, it is crucial to maintain this growth. As stated in the national energy plans, critical targets have been set for 2025, 2030 and 2035. Progress towards these targets can pave the way for Türkiye to become a major renewable energy hub in Europe, alongside Germany, France, the UK and Italy. On a global scale, particularly under the leadership of China and the US, the most notable countries in the advancing renewable energy sector are Brazil and Türkiye. For these two countries, which started to increase their investments in renewable energy much later than other leading countries, the next ten to fifteen years seem to be quite crucial.

In essence, Türkiye's renewable energy story is one of accelerated progress. While challenges remain, the country is on the cusp of harnessing its rich potential, embracing transformative technologies, and cultivating a workforce ready to drive sustainable energy development in the years ahead.

6. Conclusion

Türkiye's energy structure has been dominated by fossil fuels for many years. In particular, coal and natural gas have been used at high rates. Today, however, an important change is taking place. As a signatory to the Paris Climate Agreement, Türkiye is designing its national energy plans in line with its zero-emissions target for 2053. In this context, it has taken steps to facilitate the transition to renewable energy, especially in the last decade. Investments in renewable energy sources are increasing as an alternative to fossil fuels. Although the share of fossil fuels is still significant, the share of renewable energy sources is gradually increasing. Türkiye uses hydropower, wind, solar, biomass, geothermal, wind, solar, biomass and geothermal resources as renewable energy sources. However,

among these sources, especially wind and solar energy have started to come to the forefront. Türkiye, which started using these two clean energy sources later than other leading countries, has made rapid progress. It has become one of the leading countries in Europe in this field.

Energy consumed worldwide is expected to continue to grow in the coming years. Given the environmental and geopolitical risks in the energy sector, there will be difficulties in meeting the growing demand for energy. Interest in renewable energy will inevitably grow. The information contained in the relevant documents shows that the renewable energy sector will continue to grow in the coming years. In this context, it can be said that Türkiye has a very important opportunity. If investments can be directed correctly and effectively, the country can become one of the leading clean energy countries in the world in the short and medium term. Continued incentives, strategic planning, and increased social support are the cornerstones for realizing this goal.

List of abbreviations

CO ₂	:	Carbon Dioxide
EU	:	European Union
GDP	:	Gross Domestic Product
GW	:	Gigawatt
Mt of CO ₂	:	Million Metric Tons of Carbon Dioxide Equivalent
Mtep	:	Million-Ton Equivalent of Petroleum
Mtoe	:	Million Tons of Oil Equivalent
MW	:	Megawatt
OPEC	:	Organization of the Petroleum Exporting Countries
TWh	:	Terawatt Hour

Conflict of Interest

The author has declared no conflict of interest

References

- Adams, S., & Acheampong, A. O. (2019). Reducing carbon emissions: the role of renewable energy and democracy. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118245. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118245>
- Adjei-Mantey, K., & Adams, S. (2023). Renewable energy, foreign direct investment and carbon dioxide emissions: Do sectoral value additions and policy uncertainty matter? *Energy Nexus*, 10, 100193. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100193>

- Akdoğan, İ., & Kovancılar, B. (2022). Avrupa Birliği ve Türkiye’de çevre dostu yenilenebilir enerji politikalarının teşvik türleri açısından değerlendirilmesi. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 29(1), 69-91. Doi: <https://doi.org/10.18657/yonveek.1004872>
- Akpınar, A., Kömürcü, M. İ., & Kankal, M. (2011). Development of hydropower energy in Turkey: the case of Coruh river basin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1201-1209. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.001>
- Alkathery, M. A., & Chaudhuri, K. (2021). Co-movement between oil price, CO2 emission, renewable energy and energy equities: evidence from GCC countries. *Journal of Environmental Management*, 297, 113350. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113350>
- Archer, R. (2020). Geothermal Energy. (pp. 431-445). Editor(s): Trevor M. Letcher, Future Energy (Third Edition), Elsevier. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00020-7>
- Armaroli, N., & Balzani, V. (2007). The future of energy supply: challenges and opportunities. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(1-2), 52-66. Doi: <https://doi.org/10.1002/anie.200602373>
- Avcıoğlu, A. O., Dayıoğlu, M. A., & Türker, U. J. R. E. (2019). Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renewable Energy*, 138, 610-619. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.053>
- Balassa, B. (1981). The newly-industrializing developing countries after the oil crisis. *Weltwirtschaftliches Archiv*, (H. 1), 142-194.
- Begum, R. A., Sohag, K., Abdullah, S. M. S., & Jaafar, M. (2015). CO2 emissions, energy consumption, economic and population growth in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 594-601. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.205>
- Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative research journal*, 9(2), 27-40. Doi: <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>
- BP (2022). Statistical Review of World Energy. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed 8 June 2024)
- Caineng, Z. O. U., Xiong, B., Huaqing, X. U. E., Zheng, D., Zhixin, G. E., Ying, W. A. N. G., ... & Songtao, W. (2021). The role of new energy in carbon neutral. *Petroleum exploration and development*, 48(2), 480-491. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60039-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60039-3)

- Crowe, J. A., & Li, R. (2020). Is the just transition socially accepted? Energy history, place, and support for coal and solar in Illinois, Texas, and Vermont. *Energy Research & Social Science*, 59, 101309. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101309>
- Çetin, S., Turan, E., & Bayrakdar, E. (2019). Türkiye'nin güneş enerjisi politikaları. *Third Sector Social Economic Review*, 54(2), 949-968.
- Enerdata (2024). World Energy & Climate Statistics-Yearbook. <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> (accessed 18 June 2024)
- Erdem, K. O. Ç., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 32-44.
- Erdil, A., & Erbiyık, H. (2015). Renewable energy sources of Turkey and assessment of sustainability. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 207, 669-679. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.10.137>
- Erdogdu, E. (2009). On the wind energy in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1361-1371. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.003>
- European Commission (2022). CO₂ emissions of all world countries. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022 (accessed 05 June 2024)
- European Commission (n.d.-a). Paris Agreement, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en (accessed 12 June 2024)
- European Commission (n.d.-b). European Neighbourhood Policy and Enlargement Negotiations, National Programme. https://neighbourhood-enlargement.ec.europa.eu/enlargement-policy/glossary/national-programme_en (accessed 18 June 2024)
- European Council (2022). Impact of Russia's invasion of Ukraine on the markets: EU response. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/eu-response-ukraine-invasion/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/> (accessed 04 June 2024)
- European Union (2021). The Eu in 2021. <https://op.europa.eu/webpub/com/general-report-2021/en/> (accessed 16 June 2024)
- European Wind Energy Association (2009). The economics of wind energy. EWEA. https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf (accessed 04 June 2024)
- Global Wind Energy Council (2022). Global Wind Report. <https://gwec.net/global-wind-report-2022/> (accessed 08 June 2024)

- Güney, T. (2022). Solar energy, governance and CO₂ emissions. *Renewable Energy*, 184, 791-798. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.124>
- Gürel, B. (2020). Türkiye'deki Güncel Biyokütle Potansiyelinin Belirlenmesi ve Yakılmasıyla Enerji Üretimi İyi Bir Alternatif Olan Biyokütle Atıklar İçin Sektörel Açidan ve Toplam Yanma Enerji Değerlerinin Hesaplanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 407-416. Doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.671767>
- Hayat, M. B., Ali, D., Monyake, K. C., Alagha, L., & Ahmed, N. (2019). Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research*, 43(3), 1049-1067. Doi: <https://doi.org/10.1002/er.4252>
- İnançlı, S., & Aylin, A. K. I. (2020). Türkiye'nin Enerji İthalatı ve Yenilenebilir Enerji Arasındaki İlişkinin Ampirik Olarak İncelenmesi. *Econder International Academic Journal*, 4(2), 551-565. Doi: <https://doi.org/10.35342/econder.849015>
- International Energy Agency (2022). *World Energy Balances*. <https://www.iea.org/countries/turkiye> (accessed 02 June 2024)
- International Energy Agency (n.d.). Russia's War on Ukraine, <https://www.iea.org/topics/russias-war-on-ukraine> (accessed 05 June 2024)
- International Hydropower Association (2022). Hydropower Status Report. https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594_IHA202212-status-report-02.pdf (accessed 06 June 2024)
- IRENA (2022). Renewable Capacity Statistics. <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022> (accessed 17 June 2024)
- IRENA (2024). Renewable Capacity Statistics. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf?rev=a587503ac9a2435c8d13e40081d2ec34 (accessed 19 June 2024)
- Issawi, C. (1978). The 1973 oil crisis and after. *Journal of Post Keynesian Economics*, 1(2), 3-26. Doi: <https://doi.org/10.1080/01603477.1978.11489099>
- Kaya, M. N., Aksoy, M. H., & Kose, F. (2017). Renewable energy in Turkey: potential, current status and future aspects. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 15(1), 65.
- Kaygusuz, K. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing

- countries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(2), 1116-1126. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.013>
- Khan, S. A. R., Godil, D. I., Quddoos, M. U., Yu, Z., Akhtar, M. H., & Liang, Z. (2021). Investigating the nexus between energy, economic growth, and environmental quality: A road map for the sustainable development. *Sustainable Development*, 29(5), 835-846. Doi: <https://doi.org/10.1002/sd.2178>
- Kırlı, M. S., & Fahrioğlu, M. (2019). Sustainable development of Turkey: Deployment of geothermal resources for carbon capture, utilization, and storage. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(14), 1739-1751. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549149>
- Kothari, R., Tyagi, V. V., & Pathak, A. (2010). Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3164-3170. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.05.005>
- Lehtola, T., & Zahedi, A. (2019). Solar energy and wind power supply supported by storage technology: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 25-31. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.05.013>
- Levenda, A. M., Behrsin, I., & Disano, F. (2021). Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. *Energy Research & Social Science*, 71, 101837. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837>
- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Magazzino, C., Mele, M., Schneider, N., & Shahbaz, M. (2021). Can biomass energy curtail environmental pollution? A quantum model approach to Germany. *Journal of Environmental Management*, 287, 112293. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112293>
- Melikoglu, M. (2013). Vision 2023: Forecasting Turkey's natural gas demand between 2013 and 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 393-400. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.048>
- Michaelides, E. E. S. (2012). *Alternative energy sources*. New York: Springer Science & Business Media.
- Mitchell, T. (2010). The Resources Of Economics. *Journal of Cultural Economy*, 3:2, 189-204. Doi: <https://doi.org/10.1080/17530350.2010.494123>
- Morris, C., Pehnt, M., Landgrebe, D., Jungjohann, A., Bertram, R., Glastra, K., &

- Franke, A. (2012). Energy Transition. The German Energiewende. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50064834. (accessed 16 June 2024)
- MTA (n.d.). Geothermal Energy Potential And Exploration Studies In Turkey, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/jeotermal-enerji-arastirmalari> (03 June 2024)
- Müftüler-Baç, M. (2018). Remolding the Turkey-EU relationship. *Turkish policy quarterly*, 17(1), 119-128.
- Muhammed, G., & Tekbiyik-Ersoy, N. (2020). Development of renewable energy in China, USA, and Brazil: A comparative study on renewable energy policies. *Sustainability*, 12(21), 9136. Doi: <https://doi.org/10.3390/su12219136>
- Mukhtarov, S., Yüksel, S., & Dinçer, H. (2022). The impact of financial development on renewable energy consumption: Evidence from Turkey. *Renewable Energy*, 187, 169-176. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.061>
- Nautiyal, H., & Goel, V. (2020). Sustainability assessment of hydropower projects. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121661. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121661>
- Nazir, M. S., Ali, N., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2020). Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13, 85-90. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.002>
- Nelson, V. (2009). *Wind energy: renewable energy and the environment*. Boca Raton: CRC press. Doi: <https://doi.org/10.1201/9781420075694>
- Ocal, O., & Aslan, A. (2013). Renewable energy consumption-economic growth nexus in Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 28, 494-499. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.036>
- Official Journal of Türkiye (2011). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/01/20110108-3.htm> (accessed 07 June 2024)
- Official Legislation of Türkiye (2005). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5346.pdf> (accessed 04 June 2024)
- Omri, A. (2014). An international literature survey on energy-economic growth nexus: Evidence from country-specific studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 951-959. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.084>

- Ourworldindata (n.d.). Renewable energy generation, Turkey. <https://ourworldindata.org/grapher/renewable-energy-gen?time=1990..latest&country=~TUR> (accessed 19 June 2024)
- Ozcan, B., Tzeremes, P. G., & Tzeremes, N. G. (2020). Energy consumption, economic growth and environmental degradation in OECD countries. *Economic Modelling*, 84, 203-213. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2019.04.010>
- Özgül, S., Koçar, G., & Eryaşar, A. (2020). The progress, challenges, and opportunities of renewable energy cooperatives in Turkey. *Energy for Sustainable Development*, 59, 107-119. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.09.005>
- Özkan, A., Yeter, U. S. L. U., & Gedikli, E. (2022). Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinde rüzgâr gücü ve Danimarka örneği. *Akdeniz İİBF Dergisi*, 22(2), 26-35. Doi: <https://doi.org/10.25294/aiuibfd.1111423>
- Ozturk, I., & Acaravci, A. (2010). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3220-3225. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.005>
- Peidong, Z., Yanli, Y., Jin, S., Yonghong, Z., Lisheng, W., & Xinrong, L. (2018). Opportunities and challenges for renewable energy policy in China. *Renewable Energy*, Vol4_486-Vol4_503.
- Petform (n.d.). Natural Gas Market in Turkey. <http://www.petform.org.tr/dogalgaz-piyasasi/turkiye-dogalgaz-piyasasi/> (accessed 08 June 2024)
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K. J., Wilberforce, T., & Olabi, A. G. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, 754, 141989. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989>
- Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (2022a). Türkiye Ulusal Enerji Planı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf (accessed 19 June 2024)
- Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (2022b). Güneş. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (accessed 06 June 2024)
- Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (2023). Atlas of solar energy potential. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (accessed 03 June 2024)
- Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (2024). Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=2024%20>

y%C4%B1%C4%B1%20Mart%20ay%C4%B1%20sonu,i%20ise%20di%C4%9Fer%20kaynaklar%20 (accessed 19 June 2024)

Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (n.d.-a). *Enerji*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji> (accessed 04 June 2024)

Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (n.d.-b). Rüzgar. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (accessed 04 June 2024)

Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (n.d.-c). Güneş. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (accessed 06 June 2024)

Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (n.d.-d). Hidrolik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-hidrolik> (05 June 2024)

Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (n.d.-e). Biyokütle. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-biyokutle> (accessed 03 June 2024)

Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (n.d.-f). Jeotermal. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal> (accessed 07 June 2024)

Ritchie H. and Roser M. (2020). "CO₂ emissions" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/co2-emissions>' [Online Resource] (accessed 19 June 2024)

Ritchie H., Rosado P. & Roser M. (2020). "Energy Production and Consumption" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>' [Online Resource] (accessed 18 June 2024)

Ritchie H., Roser M. & Rosado P. (2020). "Renewable Energy" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/renewable-energy>' [Online Resource] (accessed 19 June 2024)

Ritchie, H., Rosado P. & Roser M. (2023). "Data Page: Wind energy capacity". "Energy". Data adapted from International Renewable Energy Agency. Retrieved from <https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-installed-wind-energy-capacity-gigawatts> [online resource] (accessed 18 June 2024)

Sadorsky, P. (2021). Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125779. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125779>

Saidi, K., & Omri, A. (2020). The impact of renewable energy on carbon emissions

- and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries. *Environmental research*, 186, 109567. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109567>
- Sarkodie, S. A., & Adams, S. (2018). Renewable energy, nuclear energy, and environmental pollution: accounting for political institutional quality in South Africa. *Science of the total environment*, 643, 1590-1601. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.320>
- Sayan, R. C. (2019). Exploring place-based approaches and energy justice: ecology, social movements, and hydropower in Turkey. *Energy Research & Social Science*, 57, 101234. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101234>
- Scott, J. (1990). *A matter of record: Documentary sources in social research*. Cambridge: Polity Press.
- Sinsel, S. R., Riemke, R. L., & Hoffmann, V. H. (2020). Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *Renewable Energy*, 145, 2271-2285. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>
- Stern, D. I. (2019). *Energy and economic growth*. In Routledge handbook of Energy economics (pp. 28-46). London: Routledge.
- Statista (2024a). Historical carbon dioxide emissions from global fossil fuel combustion and industrial processes in selected years from 1750 to 2022. <https://www.statista.com/statistics/264699/worldwide-co2-emissions/> (accessed 09 June 2024)
- Statista (2024b). Cumulative hydropower capacity worldwide in 2022, by major country. <https://www.statista.com/statistics/474652/global-total-hydropower-capacity-in-major-countries/> (accessed 18 June 2024)
- Şenel, M. C., & Erdem, K. O. Ç. (2015). Dünyada ve Türkiye’de rüzgar enerjisi durumu-Genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 56(663), 46-56.
- TEİAŞ (2024). Türkiye Elektrik İstatistikleri. https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (accessed 18 June 2024)
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy policy*, 33(3), 289-296. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)
- Turkish Coal Enterprises. (2021). Installation of TCE's first solar power plant completed. <https://eli.tki.gov.tr/haberler/tkinin-ik-gunes-enerjisi-santrali-kurulumu-tamamlandi> (accessed 15 June 2024)
- Turkish Statistical Institute (2023). Data Portal, <https://data.tuik.gov.tr/> (accessed 07 June 2024)

- United Nations (n.d.). What is the Kyoto Protocol? https://unfccc.int/kyoto_protocol (accessed 12 June 2024)
- Wang, Y., Liu, Y., Dou, J., Li, M., & Zeng, M. (2020). Geothermal energy in China: Status, challenges, and policy recommendations. *Utilities Policy*, 64, 101020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101020>
- Wang, Z. (2019). Does biomass energy consumption help to control environmental pollution? Evidence from BRICS countries. *Science of the Total Environment*, 670, 1075-1083. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.268>
- Wang, Z., Bui, Q., Zhang, B., & Pham, T. L. H. (2020). Biomass energy production and its impacts on the ecological footprint: An investigation of the G7 countries. *Science of the Total Environment*, 743, 140741. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140741>
- Warloutzet, L. (2017). *Governing Europe in a globalizing world: neoliberalism and its alternatives following the 1973 oil crisis*. London: Routledge.
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54. Doi: https://doi.org/10.1501/Csaum_00000000064
- Zafar, M. W., Sinha, A., Ahmed, Z., Qin, Q., & Zaidi, S. A. H. (2021). Effects of biomass energy consumption on environmental quality: the role of education and technology in Asia-Pacific Economic Cooperation countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110868. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110868>
- Zhang, X. P., & Cheng, X. M. (2009). Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics*, 68(10), 2706-2712. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.011>



60° EĞİMLİ İKİNCİL JETLERE SAHİP SINIRLANDIRILMIŞ ÇARPAN JET DİZİSİNDE ISI TRANSFERİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Haluk KELEŞ^{1*}, Yücel ÖZMEN²

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6562-8902>

² Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-1127-1060>

Anahtar Kelimeler

Öz

Çarpan dizi jet, eğimli ikincil jet, sınırlandırıcı levha, nusselt dağılımı, türbülans modeli

Bu çalışmada, 60° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında, Reynolds sayısı değerleri 20000 ve 30000, levhalar arası açıklık değerleri 0.5, 1, 3 ve 6 için çarpma levhasının merkez eksenini üzerine termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Çalışmanın sayısal kısmında ise, Reynolds sayısının 30000 değerinde aynı açıklık değerleri için Standard k-ε ve Standard k-ω türbülans modellerinin Kato Launder ile modifiye edilmiş versiyonları kullanılarak 2-boyutlu çözümler gerçekleştirilmiş ve çarpma levhası üzerinde hesaplanan sıcaklık dağılımları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ölçümlenen sıcaklık dağılımlarıyla, Reynolds sayısı ve levhalar arası açıklık değerlerinin çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. Çarpma levhası boyunca Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile artmakta, artan levhalar arası açıklık değerleri ile azalmaktadır. Çarpma levhası üzerinde ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma konumlarında Nusselt sayısı pik değerler almakta ve oluşan piklerin konumları artan levhalar arası açıklığı ile daha büyük xr/D değerlerine kaymaktadır. Her iki türbülans modeliyle hesaplanan Nusselt dağılımlarının benzer olduğu ve çarpma bölgesinde hesaplanan sonuçların Standard k-ε ve Standard k-ω türbülans modelleri için sırasıyla % 9 ve % 11'lik hata payı ile deneysel sonuçlara uyum sağlandığı görülmektedir.

* hkeles@artvin.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1472779

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER EFFECTS IN A CONFINED IMPINGING JET ARRAY WITH 60° INCLINED SECONDARY JETS

Keywords

Impinging jet array, inclined secondary jet, confinement plate, nusselt distribution, turbulence model

Abstract

In this study, the effects of heat transfer on the impingement surface of a confined impinging array jet flow with 60° inclined secondary jets are investigated both experimentally and numerically. In the experimental section of the study, temperature distributions were obtained with a thermal camera along the middle axis of the impingement plate for 20000 and 30000 values of Reynolds number and 0.5, 1, 3 and 6 values of the aperture among plates. In the numerical section of the study, for the same Reynolds number and spacing values, bidimensional solutions were performed with the Kato Launder modified version of the Standard k-ε and Standard k-ω turbulence models and the calculated temperature distributions on the target impingement plate were compared with the experimental results. With measured temperature distributions, the effect of Reynolds number and aperture between plates on the Nusselt distributions on the target impingement plate is investigated. The Nusselt values on the surface of target impingement plate increase with increasing Reynolds number and decrease with increasing aperture between plates. The Nusselt number takes top point values at the impingement positions of the secondary jets on the impingement plate in the direction of their axes, and the positions of the top points shift to larger $\pm r/D$ values with increasing inter-plate spacing. It is observed that the Nusselt distributions calculated with both turbulence models are similar and the calculated results in the impingement region agree with the experimental results with a margin of error of 9 % and 11 % for the Standard k-ε and Standard k-ω turbulence models, respectively.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 24.04.2024

Kabul Tarihi : 10.07.2024

Research Article

Submission Date : 24.04.2024

Accepted Date : 10.07.2024

Extended Abstract

Introduction

In this study, the heat transfer effects of 60° inclined secondary jets on the impingement surface in confined impinging array jet flow are investigated both experimentally and numerically. In the experimental part, temperature distributions were measured with a thermal camera on the middle axis of the impingement plate for Reynolds number values of 20000 and 30000 and interplate spacing values of 0.5, 1, 3 and 6. In the numerical part, 2-D solutions were carried out with Kato Launder modified version of the Standard $k-\epsilon$ and Standard $k-\omega$ turbulence models for the same spacing values at Reynolds number 30000 and the calculated temperature distributions on the target impingement plate were compared with the experimental results.

With the measured temperature distributions, the influence of Reynolds number and inter-plate aperture on the Nusselt distributions on the impingement plate is investigated. The Nusselt values along the impingement plate increase with increasing Reynolds number and decrease with increasing inter-plate aperture values. At the impingement locations along the axes of the secondary jets, the Nusselt number peaks and the positions of the peaks shift to larger $\pm r/D$ values with increasing interplate spacing.

It is observed that the Nusselt distributions calculated with both turbulence models are similar and provide a better alignment with the experimental results in the impingement region. These findings provide an important contribution to understanding and optimizing the heat transfer characteristics in confined impinging array jet flow.

Objectives

Conventional single impinging jet flow is unable to provide homogeneous surface cooling by creating different temperature zones in the amount of heat transferred from the surface, which adversely affects the operating characteristics of electronic components. Homogeneous cooling is necessary for electronic components to perform as desired. Therefore, new studies should be investigated on the impingement surface with impinging jets that provide homogeneous cooling. In this study, the heat transfer effects in a confined impinging array jet flow with 60° inclined secondary jets are investigated experimentally and numerically. In the experimental part, temperature distributions were measured with a thermal camera along the back surface of the impingement plate. In the numerical part, the Nusselt distributions on the impingement plate are calculated by two-dimensional solutions with Kato Launder modified versions of the Standard $k-\epsilon$ and Standard $k-\omega$ turbulence models. By comparing the numerical and experimental results, it can be clearly seen that the use of inclined secondary jets constitutes the innovative and unique aspect of the study.

Methods

In the experimental part of this study, the influence of heat transfer on the impingement plate in a confined impinging array jet flow with inclined secondary jets are

investigated. The experimental setup was created by directing the ambient air sucked by the fan into the expansion chamber. Inclined secondary jets were generated by an attachment to the replaceable nozzle head located at the outlet of the expansion chamber. These jets hit the preheated target impingement plate. The heated impingement plate can move in the horizontal direction with a slide-slide mechanism. The distance among the plate and the nozzle is adjustable and the cover aperture at the fan inlet can be adjusted for different flow rates.

The impingement plate with heater is formed with a circular electrical circuit by PCB technique and its back surface is painted in matte black color. A circular heater surface was used to create a heater surface compatible with the circular jet flow. Surface temperature measurements were made using a thermal camera.

In the experimental setup, the heat transfer of the jet impinging on the impingement plate was investigated and the temperature distributions were recorded. The measurements made with the thermal camera were verified with thermoelements and the accuracy of the temperature values was checked. The emissivity value of the impingement plate was determined as a result of the comparisons.

In the numerical part of the study, Nusselt distributions on the impingement plate are calculated by two-dimensional numerical solutions in the steady regime in a confined array jet flow field with secondary jets inclined at $\alpha=60^\circ$ for Reynolds number 30000 and inter-plate clearance values of 0.5, 1, 3 and 6 using the Kato Launder modified variation of the widely used turbulence models Standard $k-\varepsilon$ and Standard $k-\omega$.

This study complied with research and publication ethics.

Results and Discussions

The local Nusselt number peaks at the stagnation point on the impingement plate in the direction of the axis of the primary nozzle and at the position of the impingement plate in the direction of the axes of the secondary jets. The peaks on the impingement plate become sharper as the Reynolds number increases. The Nusselt values on the impingement plate increase with increasing Reynolds number, decrease with increasing interplate aperture, and the positions of the peaks on the impingement plate in the direction of the axes of the secondary jets shift to larger $\pm r/D$ values. In the case of a confined impinging array jet flow with inclined secondary jets, the Nusselt distributions calculated with both turbulence models used in the two-dimensional numerical solutions are similar, and the good alignment with the experimental results in the impingement region decreases away from the impingement region. As the spacing between the plates increases, the numerical and experimental results are in better alignment.

1. Giriş

Bir lüle veya huzmeden çıkan ve bir yüzeye çarpan akışlar çarpan jet akışları olarak tanımlanmaktadır. Çarpan jetler, ısıtma ve soğutma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek ısı transfer oranı sağlamaları nedeniyle, elektronik devrelerde bulunan transistörler ve çipler gibi yoğun ısı üretimi olan parçaların ve gaz türbinlerinin soğutulması, uçak gibi çeşitli hava araçlarının yüzeylerinde oluşan buzlanmanın giderilmesi ve tekstil, kağıt ve gıda endüstrisine yönelik uygulamalar gibi birçok alanda jet akışlarından yararlanılmaktadır.

Literatürde, çarpan jetlerin, tekli, çoklu ve dizi şeklindeki uygulamaları üzerine ısı ve kütle transferine yönelik korelasyonları da içeren çok miktarda çalışma mevcuttur. Bununla birlikte, çarpan jetlerin en önemli dezavantajı, çarpma yüzeyine/yüzeyinden gerçekleştirdikleri ısı transferinin homojen olmamasıdır. Bu nedenle, çarpan jet akışlarında ısı transferinin iyileştirilmesi ve çarpma yüzeyi boyunca tekdüze ısı transferinin sağlanması problemi, çözümü gereken güncel bir problem olma özelliğini sürdürmektedir.

Çarpan jet akışlarında, daha homojen ısı transferi sağlamayı amaçlayan çalışmalarda, slot, dairesel ve halkasal geometrilerdeki tekli, çoklu ve dizi şeklindeki lüleler sınırlandırılmamış veya sınırlandırılmış olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda, çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutma sağlamak ve yüzey boyunca ısı kararlılık elde etmek amacıyla birden çok jetin bir yüzeye çarptırıldığı çalışmalar artmaktadır. Literatürde çarpan çoklu jetlere yönelik çalışmaların büyük bir kısmında akış laminer özelliktedir. Türbülanslı çarpan çoklu jetlerle ilgili çalışmalar oldukça az sayıdadır. Bu konudaki çalışmalar daha çok sayısal incelemeler şeklindedir. Dong, Leung ve Cheung, yatay bir yüzeye çarpan ikili laminer hava alevi jetinde ısı transferi karakteristiklerini ve yüzey basınç dağılımlarını deneysel olarak incelemiştir. Çarpan ikiz jet akışını inceleyen Abdel-Fattah (2007), çarpma yüzeyinde bir subatmosferik bölgenin meydana geldiğini ve artan lüle ve levha arası açıklık ile birlikte bu bölgenin etkisinin azaldığını belirtmiştir. Özmen (2011), düzgün bir yüzeye dik bir şekilde çarpan sınırlandırılmış ikiz hava jetinde akış alanlarının yapılarını deneysel olarak inceleyerek, çarpma ve sınırlayıcı yüzeylerde oluşan subatmosferik bölgelerini belirlemiş ve bu yüzeyler üzerindeki basınç dağılımlarının lüle ve levha arası açıklık değerleri ve lüleler arası mesafe değerlerinden ciddi oranda etkilendiğini saptamıştır. Al Mubarek, Shaahid ve Al-Hadhrani (2013), belirli bir eğim açısına sahip yüzeye çarpan jet dizisinin akışında çarpma yüzeyi üzerinde ısı transferi özelliklerini deneysel olarak incelemiş ve artan Reynolds sayısı ile birlikte ortalama yerel Nusselt sayısının arttığını vurgulamışlardır. Buchlin (2011), çarpan dizi jet akışını incelediği çalışmasında, lüle-levha arası ve lüleler arası açıklıkların jet karakteristikleri üzerinde doğrudan etkisi olduğunu belirtmiştir. Attalla ve Specht (2009), düz bir yüzeye çarpan çoklu jet sisteminde çarpma yüzeyindeki taşınım ile ısı transferini deneysel ola-

rak incelemişlerdir. Çoklu jet uygulamasının, tekli jete göre yerel ve ortalama ısı transferini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Maddox, Knight, ve Bhavnani (2015), eğimli levhalarla sınırlandırılmış çarpan çoklu su jetinde ısı transferi etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı sınırlandırıcı levha eğim açılarının incelendiği çalışmada en etkili soğutma performansının 5° eğimli sınırlandırıcı levha durumunda olduğunu belirtmişlerdir. Polat, Huang, Mujumdar ve Douglas (1989), çarpan jet akışlarındaki ısı transferi üzerine hem deneysel hem de sayısal çalışmalardan oluşan kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalarda kullanılan türbülans modellerinden düşük Reynolds sayılı $k-\epsilon$ türbülans modelinin Standard $k-\epsilon$ türbülans modeline kıyasla durma noktasındaki ısı transferini daha doğru tahmin ettiğini vurgulamışlardır. Özmen ve İpek (2016), çoklu slot jetlerin düz bir yüzeye çarpması ile oluşan jet akışında akış karakteristikleri ve ısı transferi performansını hem deneysel hem de sayısal olarak araştırmışlardır. Hedef çarpma levhası yüzeyi boyunca oluşan ortam altı basınç bölgeleri ile Nusselt dağılımlarındaki ikincil pikler arasında önemli bir korelasyon olduğunu belirtmişlerdir. Çalışkan, Başkaya ve Çalışır (2014), jet geometrisinin akış ve ısı aktarım özellikleri üzerindeki etkisini, eliptik ve dikdörtgen çarpan jet dizileri için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Eliptik jetlerin, dikdörtgen jetlerden daha yüksek ısı transfer katsayısına ulaştığını ifade etmişlerdir. Tepe (2019), sınırlandırılmış çarpan dairesel çoklu jet akışında, lüle çıkış konumlarının sınırlandırıcı levhadan uzaklaştırılarak akış doğrultusunda ilerletilmesi ile sağlanan akış alanlarında çarpma levhası üzerindeki akış karakteristikleri ve ısı transferi performansını deneysel bir çalışmanın yanı sıra sayısal olarak da araştırmışlardır. Sıvı kristal tekniği ve ticari bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalarda, jet çıkış konumunun çarpma levhasına yaklaşmasının ısı transfer oranını artırdığı belirtilmiştir. Seydein, Hasan ve Mujumdar (1995), iki boyutlu türbülanslı sınırlandırılmış çarpan jet dizisi akışında ısı transferi etkisini, geliştirdikleri matematiksel bir yöntemle incelemişlerdir. Eğimli levhalarla sınırlandırılmış çarpan çoklu slot jetlerde akış yapısı ve ısı transferi etkilerinin sayısal olarak incelendiği bir çalışma Yang ve Shyu (1998), tarafından gerçekleştirilmiştir. Sınırlandırıcı levha eğim açısı ve Reynolds sayısı etkilerinin incelendiği çalışmada, akış alanında oluşan girdap yapılarının Reynolds sayısından bağımsız olduğu ancak eğim açısından etkilendiği ve artan sınırlandırıcı levha eğim açısı ile birlikte hedef çarpma levhası boyunca yerel Nusselt sayısı değerlerinin azaldığı ifade edilmiştir. Chuang, Chen, Lii ve Tai (1992), iki boyutlu sayısal bir model kullanarak çarpan ikili slot jetlerde akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Chuang ve Nieh (2000), kare kesitli ikili çarpan jetlerde üç boyutlu türbülanslı akış alanlarını PHOENICS ticari yazılımı ile incelemişlerdir. Aldabbagh ve Sezai (2002), kare enkesitli ikiz lüleden çıkan ve düz bir levhaya çarpan laminer jetlerde akış özelliklerini ve ısı transferi etkilerini sayısal bir çalışma gerçekleştirerek araştırmışlar ve sıcak bir yüzeye çarpan ikili

jetlerde akış yapısının lüle-levha arası mesafeden güçlü bir şekilde etkilendiğini belirtmişlerdir. Düz bir yüzeye çarpan türbülanslı ikili jet akışı Fernandez, Elicer-Cortés, Valencia, Pavageau ve Gupta (2007), tarafından Standard ve Realizable $k-\epsilon$ modellerinin yanı sıra Standard $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak incelenmiş ve kullanılan türbülans modellerinden hiçbirinin çarpma bölgesindeki akışı doğru tahmin etmediği sonucuna varılmıştır. Düz bir yüzeye çarpan sınırlandırılmış jet dizisinde akış yapısı ve ısı transfer özellikleri Miao, Wu ve Chen (2009), tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Kare kesitli lülelerden çıkan ve düz bir yüzeye çarpan sınırlandırılmış laminer jet dizisinde lüle-levha arası açıklığın etkisi Aldabbagh ve Mohamad (2007) tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Dağtekin ve Öztop (2008), ikili çarpan jet akışında lüle-levha açıklığının, jetler arası mesafenin ve Reynolds sayısının akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Özmen ve Baydar (2013), bir yüzeye çarpan sınırlandırılmış jet dizisi akışında akış yapısı ve karakteristiklerinin yanı sıra ısı transferi performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Çarpma yüzeyi boyunca hem basınç dağılımlarının hem de Nusselt dağılımlarının lüle-levha açıklığından önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir.

San ve Chen (2014) ısıtılmış bir yüzey üzerine çarpan beş dairesel hava jetinden oluşan bir dizi jet akışını incelemişlerdir. Reynolds sayısını 20000 olarak belirledikleri çalışmalarında, jetler arası mesafe, jet çapı ve lüle-levha arası mesafenin ısı transferi karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte jetler arası etkileşimin azaldığı ve artan jetler arası mesafenin yüzeydeki ısı transferini tekdüzelikten uzaklaştırdığı sonucuna varmışlardır. Guoneng, Zhihua, Youqu, Wenwen ve Cong (2016), düz bir plakaya çarpan dizi jet akışını deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, jetler ile plaka arasındaki mesafe arttığında, ısı transferi performansında keskin bir düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Godi, Pattamatta ve Balaji (2020) düz bir plakaya çarpan dizi jet akışını sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında, jetler arasındaki mesafe arttıkça, jetlerin birbirleri üzerindeki etkilerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Talapati, Baghel, Shrigondekar ve Katti (2024) jet eğiminin yerel ısı transferi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Isı transferi karakteristiği odaklı çalışmada ince folyo ve termal kamera ile görüntüleme tekniği kullanılmıştır. Nu karakteristiklerindeki asimetrinin jet eğiminin azalmasıyla arttığını belirterek, geometrik ve maksimum ısı transfer noktasındaki Nu sayısı için korelasyonlar elde etmişlerdir. Yalçınkaya, Durmaz, Tepe, Benim ve Uysal (2024), kanatçık kullanılarak pürüzlendirilmiş kavslü bir yüzeye çarpan dizi jet akışında, farklı kanatçık düzenlemelerinin konvektif ısı transferi üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Kanatçık kullanımının yerel ve alan ortalamalı Nusselt sayılarında önemli artışlara yol açtığını ortaya koymuşlardır. Baz, Elshenawy, El-Agouz, El-Samadony ve Marzouk (2024), dikdörtgen bir kanala monte edilmiş ayrıık çıkıntılı ısı kaynakla-

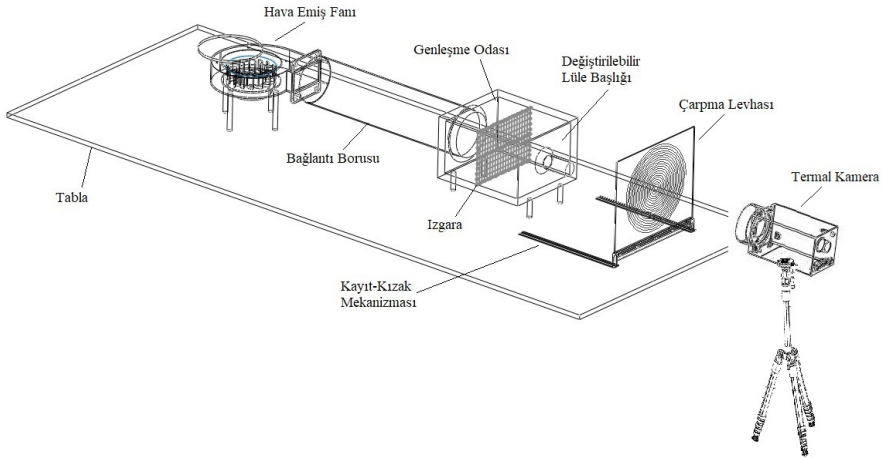
rının farklı eğim açlarına sahip çift hava jetleri kullanılarak soğutulmasına yönelik gerçekleştirdikleri çalışmalarında, en yüksek ortalama Nusselt değerinin jet eğim açısının 10° olduğu durumda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Tekli çarpan jet akışı ile bir yüzeyin soğutması uygulamalarında, yüzeyden transfer edilen ısı miktarının yüzey boyunca azalarak farklı sıcaklık bölgeleri oluşturması nedeniyle homojen bir yüzey soğutması yapılamamaktadır. Transistör, çip ve benzeri elektronik elemanların çalışma karakteristikleri, yüzeylerindeki sıcaklık değişimlerinden ciddi oranda etkilenmektedir. Elektronik elemanların, istenen performansta görevlerini yerine getirmeleri, yüzeylerindeki sıcaklık artışını önleyecek etkin ve yüzeylerin tamamına yansıyacak homojen bir soğutma ile mümkün olmaktadır. Bu durum, çarpan jetlerle çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutmayı amaçlayan yeni çalışmalara olan ihtiyacı göstermektedir. Bu nedenle mevcut çalışmada; çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutmayı gerçekleştirmek için, açılı dizi jet uygulamasıyla ısı transferinin iyileştirilmesi ve yüzey boyunca homojen bir ısı transferinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, 60° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışında, ısı transferi etkileri ve karakteristikleri hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmanın deneysel kısmında, çarpma levhası arka yüzeyi boyunca termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sayısal çalışmada ise, oldukça yaygın kullanımı olan türbülans modellerinden Standard k- ϵ ve Standard k- ω 'nın Kato Launder ile modifiye edilmiş varyasyonu kullanılarak, iki boyutlu çözümlerle çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları hesaplanmıştır. Sayısal çalışmadan hesaplanan Nusselt değerleri, deneysel çalışmada ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımlarıyla karşılaştırılmıştır. Reynolds sayısının ve levhalar arası açıklığın çarpma levhası üzerindeki ısı transferine etkisinin incelendiği çalışmada, sayısal çözümlerde kullanılan türbülans modellerinin hassasiyetleri de test edilmiştir. Çalışmada eğimli ikincil jetlerin kullanılması, çalışmanın yenilikçi yönünü ve özgünlüğünü oluşturmaktadır

2. Deneysel Çalışma

Eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışında çarpma levhası üzeri boyunca ısı transferi etkilerinin incelenmesi gayesiyle yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği tasarlanmıştır. Şekil 1'de şematik olarak gösterilen deneysel düzende, bir emiş fanı tarafından çekilen çevre ortamın havası yatay bir bağlantı borusu aracılığıyla genişleme odasına yönlendirilmektedir. Genişleme odası çıkışına yerleştirilmiş değiştirilebilir lüle başlığına takılan eklenti ile elde edilen eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akış alanında, lülelerden çıkan yatay hava jetleri, Joule etkisi ile önceden ısıtılan hedef çarpma levhasına çarptırılmaktadır. Düşey konumda bulunan ısıtıcı çarpma levhası, kayıt-kızak mekanizması ile yatay doğrultuda hareket kabiliyetini kazanmıştır. Bu

mekanizma ile lüle ve levha arası mesafe istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Fan girişindeki kapak açıklığı ile farklı akış debileri ayarlanabilmektedir. Yüzey sıcaklık dağılımlarının ölçümü, PCB levhanın arka tarafında, levha yüzeyine dik doğrultuda konumlandırılmış bir tripod üzerine kurulu termal kamera ile gerçekleştirilmiştir. Yatay ekseni çarpan jet akış düzeneğindeki değiştirilebilir lüle başlığına takılan eklenti ile oluşturulmuş eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akış sistemi Şekil 2’de görülmektedir. $\alpha=60^\circ$ eğim açısına sahip ikincil jetlerle birlikte özdeş üç lüleden oluşan çarpan dizi jet akışında lüle çapları $D=10\text{ mm}$ ’dir. Lülelerden çıkan hava jetleri, sınırlandırıcı levha uçlarından belirli bir H değeri kadar açıklıkta konumlandırılan ve birincil jet eksenine dik doğrultuda yerleştirilmiş önceden Joule etkisi ile ısıtılmış düz levhalara çarpmaktadır.

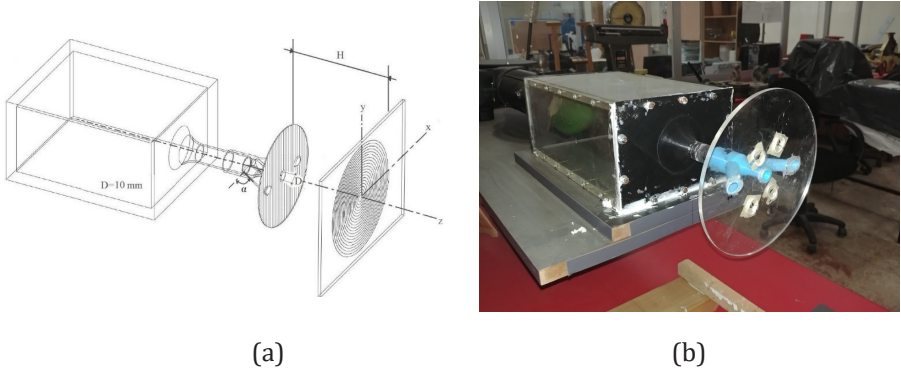


(a)



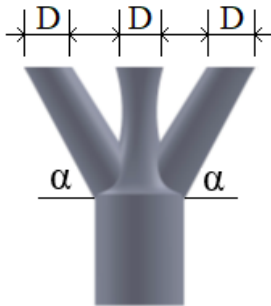
(b)

Şekil 1. Çarpan dizi jet akış düzeneği: (a) şematik görünüm, (b) gerçek görünüm



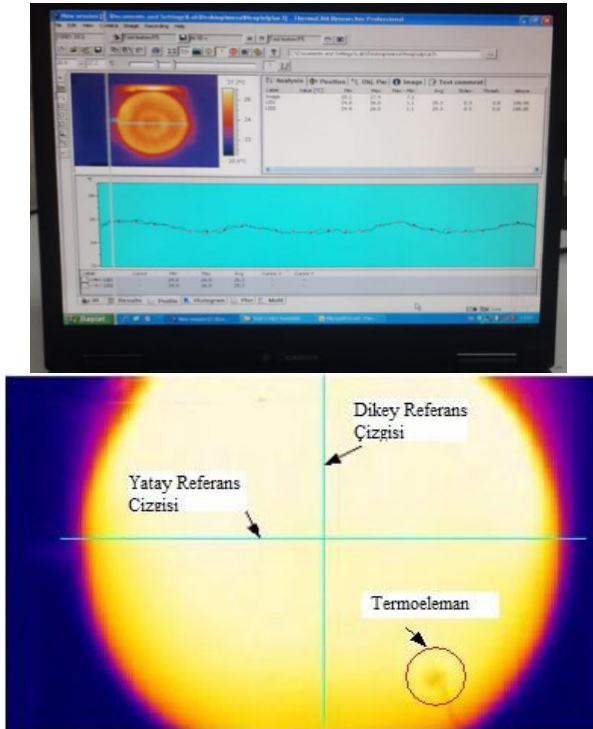
Şekil 2. Eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akış sistemi: (a) şematik görünüm, (b) gerçek görünüm

Kalınlığı 1.5 mm olan hedef çarpma levhasının dairesel ısıtıcı yüzeyinde, tekdüze sıcaklık dağılımının sağlanması amacıyla baskılı devre kartı (PCB) tekniği ile 1 mm genişliğinde ve 40 μm kalınlığında bakır şeritlerle dairesel bir elektrik devresi oluşturulmuştur. 300x400mm² dikdörtgen yüzey alanına sahip levhada, dairesel jet akışı ile uyumluluk dikkate alınarak 180mm'lik çapta dairesel form ısıtıcı yüzeyi oluşturulmuştur. Bu ısıtıcı çarpma levhasının arka yüzeyi mat siyah renge spreyci boya ile boyanmıştır. Epoksi levhanın emisivitesi 0.95'tir. Yatay eksenli jet düzeneğindeki hedef PCB çarpma levhası üzerine ayarlanabilir varyak kullanılarak 20.3 volt ve 2.01 amper elektrik akımı uygulanmış ve 1603.5 W/m² düzeyinde sabit ısı akışı oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde bulunan D=20 mm çapındaki değiştirilebilir lüle başlığına takılan ve eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışını oluşturan eklenti Şekil 3'te görülmektedir. Üç boyutlu yazıcıda üretilen dizi jet eklentisi, $\alpha = 60^\circ$ eğimli ikincil lülelerle birlikte çapları birbirine eşit ve D=10 mm olan üç dairesel kesitli lüleden oluşmaktadır.



Şekil 3. Dizi jet eklentisinin şematik görünümü

Çarpma dizi jet akışı durumlarında, hedef levhaya çarpma ortam hava sıcaklığındaki jetin, levhadan gerçekleşen ısı transferi, önceden ısıtılan levhanın arka yüzüne dik doğrultuda konumlandırılmış olan termal kamera ile sıcaklık dağılımı ölçümleri şeklinde yapılarak incelenmiştir. -40°C ila $+500^{\circ}\text{C}$ aralığında ölçüm yapabilen, 0.08°C sıcaklık hassasiyetine ve QVGA (320x240) çözünürlüğe sahip FLIR A20 marka termal kamera ile yüzey sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri, ThermaCAM yazılımı kullanılarak kayıt altına alınmıştır (Şekil 4). Çarpma levhasının her iki yüzüne yerleştirilen T tipi termoelemanlar ile termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin doğrulaması yapılmıştır. Termoelemanla ölçülen levhanın gerçek sıcaklığı ve bilgisayarda okunan levha sıcaklığı arasındaki karşılaştırmayla, termal kameranın kalibrasyon eğrisi çıkarılmış, ölçüm sonuçları doğrulanmıştır. Bu yöntem ile çarpma yüzeyindeki sıcaklığın arka yüzle eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Çarpma yüzeyine yerleştirilen termoeleman tarafından ölçülen sıcaklık değeri, aynı nokta için termal kamera tarafından ölçülen sıcaklık değeri ile karşılaştırılarak yüzeyin emisivite değeri (ϵ) 0.98 olarak belirlenmiştir. Çarpma levhası yüzeyindeki sıcaklık değerleri, yerel sıcaklıkların zaman içinde değişmediği ve akışın sürekli bir duruma ulaştığı süre boyunca kaydedilmiştir.



Şekil 4. Sıcaklık ölçümüne ilişkin görüntüler

Çarpan jet akışlarında Reynolds sayısı, lüle çıkışındaki akış hızına ve lüle çapına göre belirlenmektedir. U_o , özdeş lüleler çıkışındaki hava jeti hızını ifade etmekte olup, bununla ilişkilendirilen Reynolds sayısı aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

$$U_o = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho U_o D}{\mu} \quad (2)$$

Denklemlerde, basınç farkı ΔP , akışkan yoğunluğu ρ , dinamik viskozite μ ile gösterilmekte olup, lüle çapı ise D , ile ifade edilmiştir. Pitot tüpü ile ölçülen basınç farklarından hesaplanan ve özdeş üç lüle için aynı olan çıkış hızları Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri için sırasıyla 31 m/s ve 46.5 m/s olarak gerçekleşmiştir.

Isı transferi etkileri, çarpan jet akışlarında çarpma levhaları üzerindeki ısı taşıma katsayısı (h) ve boyutsuz Nusselt sayısı (Nu) denklemleri ile araştırılır.

$$h = Q_{\text{taşınım}}/A_w(T_w - T_j) \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

Burada taşınım ile ısı miktarı $Q_{\text{taşınım}}$, levhanın ısıtıcı yüzey alanı A_w , levhanın jete maruz kalan tarafındaki yüzey sıcaklığı T_w , ve jet çıkış sıcaklığı ise T_j ile ifade edilmektedir. Nusselt denkleminde, havanın ısı iletim katsayısı k ile tanımlanmıştır. Joule etkisi ile üretilen toplam ısı akısı q''_{toplam} 'dan ısı kayıplarının çıkarılması ile $q_{\text{taşınım}}$ hesaplanmıştır. Enerji dengesi ile çarpma levhası yüzeyinden olan ısı transferi,

$$q''_{\text{taşınım}} = q''_{\text{toplam}} - q''_{\text{iletim}} - q''_{\text{ışınım}} - q''_{\text{doğaltaşınım}} \quad (5)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir. İfadeye göre, burada q''_{toplam} , toplam ısı akısı miktarını, q''_{iletim} , $q''_{\text{ışınım}}$ ve $q''_{\text{doğaltaşınım}}$ ise sırasıyla çarpma yüzeyinden iletimle, ışınlama ve doğal taşınım ile kaybedilen ısıyı temsil eder. Epoksi levhaya uygulanan toplam güç, ayarlı varyak tarafından sağlanan gerilim ve levha direnci değerleri kullanılarak hesaplanır ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$Q_{\text{toplam}} = IV = V^2/R \quad (6)$$

Isıl kayıplar, levhanın jet tarafından etkilenmeyen yüzeyi boyunca ışınlama, ile-

tim ve doğal taşınım etkilerine bağlıdır. Çarpma levhası üzerindeki radyal yönde iletimle oluşan ısı transferi, radyal yönde mesafenin fazla olması ve sıcaklık gradyanının az olması sebebiyle dikkate alınmamıştır. Levhanın jete maruz kalan tarafındaki ışınlım kayıpları ise bakırın düşük emisivite değeri sebebiyle ihmal edilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi ile çevre ortamı arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ışınlım yoluyla ısı transferi, aşağıda verilen Stefan-Boltzmann denklemi (Bergman, Lavine, Incropera ve Dewitt, 2011) kullanılarak hesabı gerçekleştirilmiştir.

$$q_{ışınlım} = \varepsilon A_s \sigma (T_w^4 - T_{çev}^4) \quad (7)$$

Çarpma levhasının emisivite değeri ε ile gösterilmektedir. Stefan-Boltzmann sabiti ise $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{K}^4\text{)]}$ değerindedir.

Düşey olarak konumlandırılmış çarpma levhası üzerinden doğal taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, Churchill ve Chu (1975) tarafından sunulan aşağıdaki empirik bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra \leq 109 \quad (8)$$

Bu denklemlerde, Rayleigh sayısını Ra ve Prandtl sayısı ise Pr ile ifade edilmiştir. Verilen bu denklemleri kullanarak, dizi jet düzeneğinde gerçekleşen ısı kayıplarından doğal taşınım ve ışıma kayıpları, toplam ısı miktarının sırasıyla % 3'ü ve % 4'ü olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıplar ise, toplam ısı akısının % 7'si değerinde olmaktadır.

Ölçümler, Kline ve McClintock (1953) tarafından tavsiye edilen denklem ve hesaplama yöntemi kullanılarak belirsizlik analizine tabi tutulmuştur. İncelenen Reynolds sayısı için hesaplanan belirsizlik oranı $\pm \% 2.61$ iken, Nusselt sayısı için $\pm \% 2.87$ seviyesindedir.

3. Sayısal Çalışma

Çalışmanın sayısal kısmında, $\alpha = 60^\circ$ eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış dizi jet akış alanında, Reynolds sayısının 30000 değeri ve levhalar arası açıklık değerleri 0.5, 1, 3 ve 6 için oldukça yaygın kullanımı olan türbülans modellerinden Standard k- ε ve Standard k- ω 'nın Kato Launder ile modifiye edilmiş varyasyonu kullanılarak, sürekli rejimde iki boyutlu sayısal çözümlerle çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları hesaplanmıştır. Akış alanlarının yapılarının aydınlatılması ile ısı transferi karakteristiklerinin anlaşılması üzerine gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda, akışkanlar dinamiğinin temel denklemleri olan süreklilik, Navier-Stokes ve enerji denklemleri, uygun başlangıç ve sınır koşulları altında

çözülerek yaklaşık sayısal çözümler elde edilmektedir. Bu denklemlerin kartezyen koordinatlardaki tensör formu aşağıda verilmektedir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (9)$$

Navier-Stokes denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (10)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (11)$$

Navier-Stokes denkleminde yer alan Reynolds gerilmesi,

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \delta_{ij} \quad (12)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu denklemlerdeki çalkantı terimlerinin hesaplanması için literatürde çok sayıda türbülans modeli mevcuttur. Çalışmada kullanılan türbülans modellerine ait denklemler aşağıda verilmiştir.

3.1 Standard k-ε Model

Bu model, türbülans kinetik enerjisi (k) ve yutulma oranı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içermektedir. Bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_k \quad (14)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, G_k ortalama hız gradyanından kaynaklanan türbülans kinetik enerjisinin üretimini ifade etmekte ve,

$$G_k = -\rho \overline{u_i' v_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (15)$$

biçiminde yazılmaktadır. Kaldırma kuvvetine bağlı olarak oluşmakta olan türbülans kinetik enerjisi G_b , kaynak terimleri S_k ve S_ω , sıkıştırılabilir türbülanslı bölge içindeki türbülans hacim değişiminin toplam yayılım oranına katkısı Y_M , k ve ε için türbülans Prandtl sayıları σ_k ve σ_ε , k - ε türbülans modeli sabitleri ise $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ ve $C_{\varepsilon 3}$ ifade edilmektedir. Modelin sabitleri; $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$ ve $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ şeklindedir. Ek olarak, $C_\mu=0.09$ olmak üzere, türbülans viskozitesi μ_t ise aşağıda (16) numaralı eşitliktir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (16)$$

3.2 Standart k- ω Model

Bu türbülans modelinde, k türbülans kinetik enerjisi; ω ise yutulmanın kinetik enerjiye oranını ($\omega=\varepsilon/k$) ifade etmektedir. Bu modelde türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (17)$$

olarak tanımlanmaktadır. Türbülans kinetik enerji (k) ve özgül yutulma (ω) için transport denklemleri,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + S_k \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega + S_\omega \quad (19)$$

şeklindedir. Bu denklemlerde, G_k , ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülans kinetik enerjisi üretimini; G_ω , ω 'nın üretimini ifade etmektedir. Γ_k ve Γ_ω , k ve ω için efektif difüzyivite; S_k ve S_ω ise, kaynak terimleridir.

3.3 Kato Launder Modifikasyonu

Kato ve Launder (1993) tarafından önerilen üretim teriminin kullanılmasıyla, Standard k- ε ve Standard k- ω türbülans modellerine ait transport denklemlerinde, daha yakınsak sonuçların elde edilebilmesi mümkün olmaktadır. k türbülans kinetik enerji denklemi içerisinde yer almakta olan P üretim terimi normalde aşağıdaki gibidir.

$$P = -\tau_{ij}^{turb} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (20)$$

Burada, türbülanslı kayma gerilmesi tensörünü ise kaynak terimini göstermektedir.

$$\tau_{ij}^{\text{turb}} = -\overline{\rho u_i' u_j'} \approx 2\mu_t S_{ij}^* - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (21)$$

$$S_{ij}^* = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (22)$$

Sıkıştırılmaz akışlarda P üretim terimi,

$$\begin{aligned} P &= -\tau_{ij}^{\text{turb}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ &= [2\mu_t S_{ij}^* - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ &= [2\mu_t \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \approx \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ &= \mu_t \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Kapalı formda üretim terimi

$$P = \mu_t S S \quad (24)$$

şekindedir. Burada S yine kaynak terimini göstermektedir.

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (25)$$

Kato-Lauder modifikasyonu ile türbülanslı üretim terimindeki S kaynak ifadelerinden biri vortisite ile değiştirilir. Böylece modifiye edilmiş üretim terimi,

$$P = \mu_t S \Omega \quad (26)$$

şekline dönüşür. Burada, vortisite terimi Ω aşağıdaki gibidir.

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (27)$$

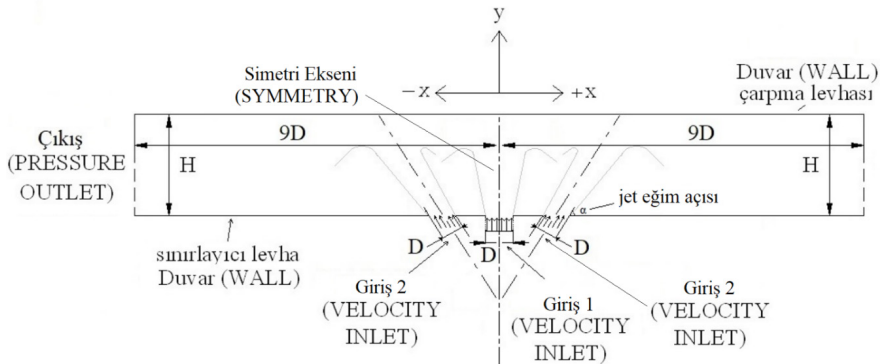
3.4 Çözüm Yöntemi

60° eğimli ikincil jetlere sahip dizi jet akış alanlarının iki boyutlu zaman bağımsız sayısal çözümleri, ANSYS-FLUENT ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş-

tir. Geometri ve ağ oluşturma işlemleri WorkBench arayüzü içerisinde çalışan ANSYS Meshing programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümlerin tamamında, oldukça yaygın kullanımı olan türbülans modellerinden Standard k- ϵ ve Standard k- ω 'nın Kato Launder ile modifiye edilmiş varyasyonu kullanılmıştır. Duvar yakınında çözümün iyileştirilmesi için iyileştirilmiş duvar ifadesi (EWT) kullanılmıştır. İterasyonel çözücü olarak SIMPLE algoritması benimsenmiştir. Dikkate alınan tüm denklemlerde (Süreklilik, TKE, Türbülans yutulma, Enerji) Second Order Upwind interpolasyon yöntemi kullanılarak ayrılaştırılıp çözülmüştür.

3.5 Sınır Şartları

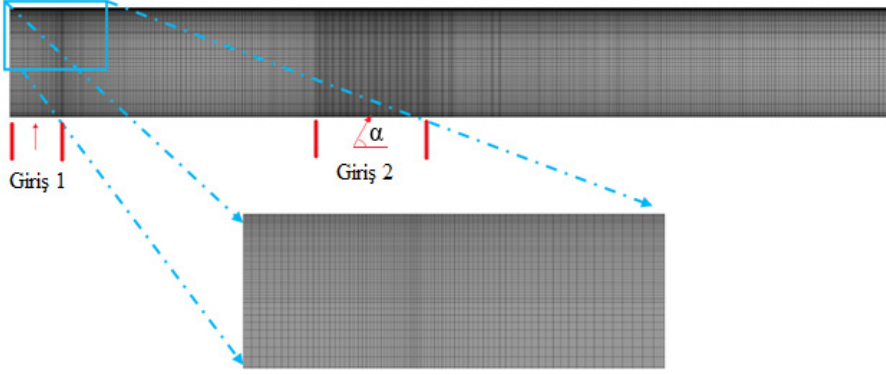
Sınır şartları, giriş bölgelerinde VELOCITY INLET, çıkış bölgelerinde PRESSURE OUTLET, simetri ekseninde SYMMETRY ve duvarlar ise WALL olarak tanımlanmıştır. Akış alanının iki boyutlu geometrisi ve sınır koşulları Şekil 5'te görülmektedir. Sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışında, ortadakinin çarpma levhasına dik doğrultuda olduğu, her iki yanındakinin ise ortadakine göre eğimli olduğu üç lüleden oluşan dizi jet, sınırlayıcı levhadan H uzaklıkta, orta lüle eksenine dik doğrultuda konumlandırılmış olan hedef çarpma levhası yüzeyine çarpmaktadır. D özdeş lülelerin çapını göstermekte olup çözüm alanının $\pm x$ doğrultusundaki genişliği 18D şeklindedir. Deneysel çalışmada ölçülen jet çıkış hızları, sayısal çözümün hız giriş koşulu olarak tekdüze şekilde dikkate alınmıştır. Dizi jet düzeneğinde ısıtılmış çarpma levhasında 1603.5 W/m^2 olan ısı akısı değeri, ışınlım ve doğal taşınım kayıpları çıkarıldıktan sonra 1492 W/m^2 değerine düşmektedir. Bu nedenle, çarpan dizi jetle ilgili sayısal çalışmalarda çarpma levhasında sabit ısı akısı sınır koşulu olarak 1492 W/m^2 değeri tanımlanmıştır. Hava jeti çıkış sıcaklığı ise $T_{jet}=293 \text{ K}$ olarak kullanılmıştır. Çözüm yakınsama kriteri olarak, normalize edilmemiş artıkların 1×10^{-5} 'ten küçük olma şartı dikkate alınmıştır. İterasyon sayısının yaklaşık 5500 değerinde yakınsama gerçekleşmektedir.



Şekil 5. Sayısal çözüm için iki boyutlu akış alanı geometrisi

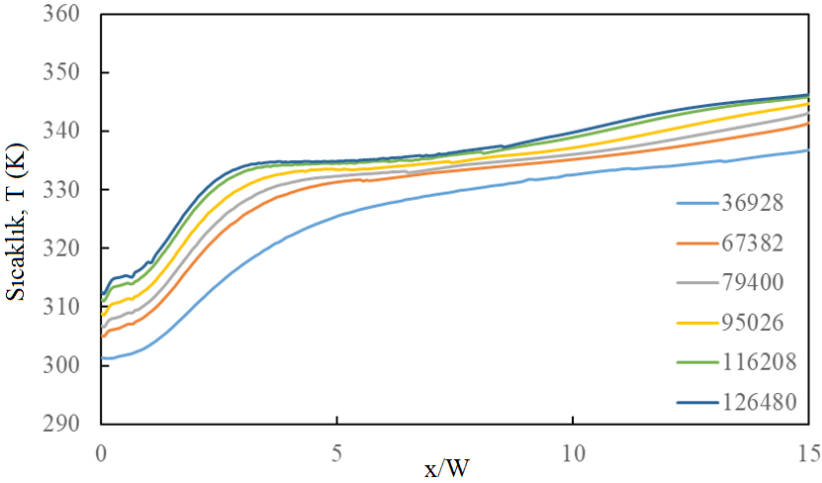
3.6 Ağ Yapısı

ANSYS Meshing programında iki farklı hücre tipi bulunmaktadır. Dörtgen şekilli hücreler ile yapılandırılmış ağ, üçgen şekilli hücreler ile ise yapılandırılmamış ağ oluşturulmaktadır. Hesaplanan akış alanlarının tamamında, dörtgen ağ kullanılmıştır. Akış alanındaki iki boyutlu tipik ağ düzeni Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Akış alanındaki tipik iki boyutlu ağ düzeni

Ağdan bağımsız çözümlerin sağlanması amacıyla, her iki türbülans modeli için farklı yoğunluktaki ağ yapıları ile ön denemeler gerçekleştirilmiş ve Standart k-ε türbülans modeli için elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Farklı ağ yoğunlukları için yapılan çözümler sonucunda ağdan bağımsız çözümlerin yaklaşık 120000 ağ sayısında gerçekleştiği belirlenmiştir.



Şekil 7. Standart k-ε türbülans modeli için ağ yoğunluğunun çözüm üzerine etkisi

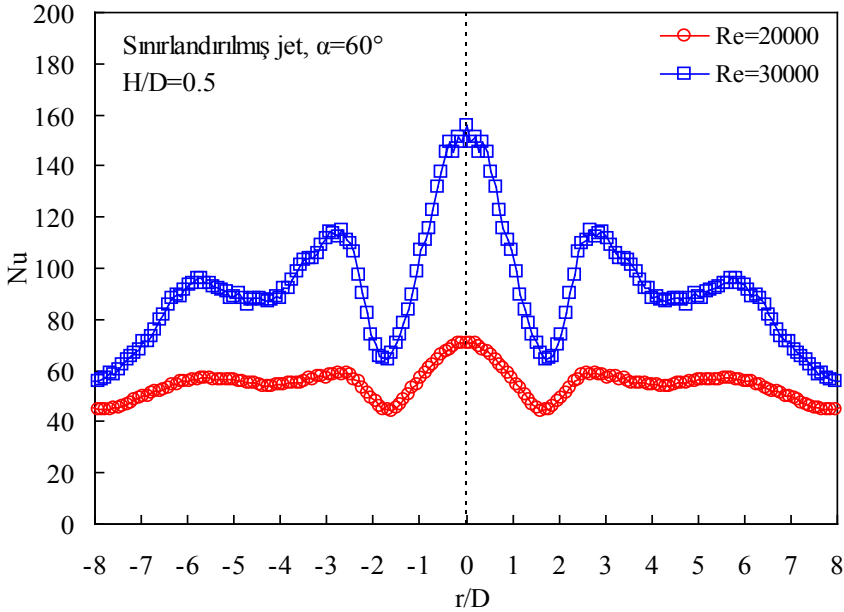
Duvar cidarına yakın bölgelerdeki çözümün hassasiyet derecesini iyileştirmek amacıyla için farklı duvar yaklaşımları denenmiştir. İki boyutlu ağ düzeni içerisinde, katı duvar cidarından ilk ağ düğüm noktasına olan aralık, model duvarlarında 0.015 mm olarak dikkate alınmıştır. Katı duvardan itibaren ilk ağ noktasına olan aralık, boyutsuz duvar uzunluğu (y^+) olarak tanımlanmaktadır. Laminer alt tabaka kalınlığı, standart duvar ifadesinde $y^+ < 11.5$; genişletilmiş duvar ifadesinde $y^+ < 5$ olarak verilmektedir. Mevcut çalışmada genişletilmiş duvar ifadesi kullanılarak her iki türbülans model için de $y^+ < 2$ sağlanmıştır.

4. Bulgular

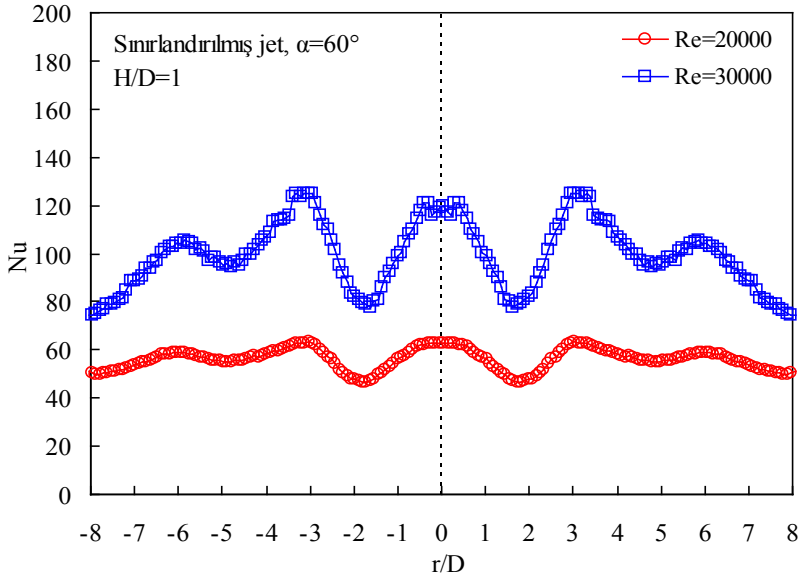
Bu çalışmada, 60° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpma dizi jet akışında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri hem deneysel hem de sayısal çalışma gerçekleştirilerek incelenmiştir. Çalışmanın deneysel bölümünde, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri ve sınırlandırıcı levha ile çarpma levhası arasındaki açıklık değerleri 0.5, 1, 3 ve 6 için çarpma levhasının orta eksen boyunca termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Çalışmanın sayısal kısmında ise, Reynolds sayısının 30000 değerinde aynı açıklık değerleri için oldukça yaygın kullanımı olan türbülans modellerinden Standard $k-\epsilon$ ve Standard $k-\omega$ 'nın Kato Launder ile modifiye edilmiş varyasyonu kullanılarak iki boyutlu çözümler gerçekleştirilmiş ve çarpma levhası üzerinde hesaplanan sıcaklık dağılımları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çarpma levhasına dik doğrultudaki birincil jetin her iki tarafında birincil jet çıkış düzlemine göre 60° eğimli olarak konumlanan ikincil jetlerle oluşturulmuş sınırlandırılmış dizi jet akışında, çarpma levhasının yatay merkez eksen boyunca iki farklı Reynolds sayısı için elde edilen Nusselt dağılımları, levhalar arası açıklık değerleri 0.5, 1, 3 ve 6 için sırasıyla Şekil 8-11'de verilmiştir. Levhalar arası açıklık değeri $H/D=0.5$ olduğu durumda, Reynolds sayısı değerleri 20000 ve 30000 iken çarpma levhası üzeri boyunca yatay orta eksen boyunca ölçülen sıcaklık değerlerinden elde edilmiş Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 8'de, çarpma levhası boyunca elde edilen Nusselt değerlerinin Reynolds sayısının 30000 değerinde daha büyük olduğu görülmektedir. Her iki Reynolds sayısı değerinde de, çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksen doğrultusundaki durma noktasında, ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında ($r/D \approx \pm 3$) ve ikincil durma noktalarında ($r/D \approx \pm 6$) yerel Nusselt sayıları maksimum (pik) değerler almaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısının 30000 değerinde daha belirgin olmaktadır. Çarpma levhası üzerinde birincil durma noktasındaki en yüksek değerdeki pike ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki piklere göre daha zayıf olarak ikincil durma noktalarında ($r/D \approx \pm 6$) pikler oluşmaktadır. İkincil durma noktalarındaki piklerin ikincil jetlerin çarpma konumlarına göre daha büyük $\pm r/D$ konumlarında oluşması, ikincil jetlerin çarp-

ma levhası üzerindeki çarpma konumları ile ikincil durma noktası konumlarının farklı olması ve çarpma sonrası gelişen duvar jetinde oluşan girdap yapıları ile ilgilidir.

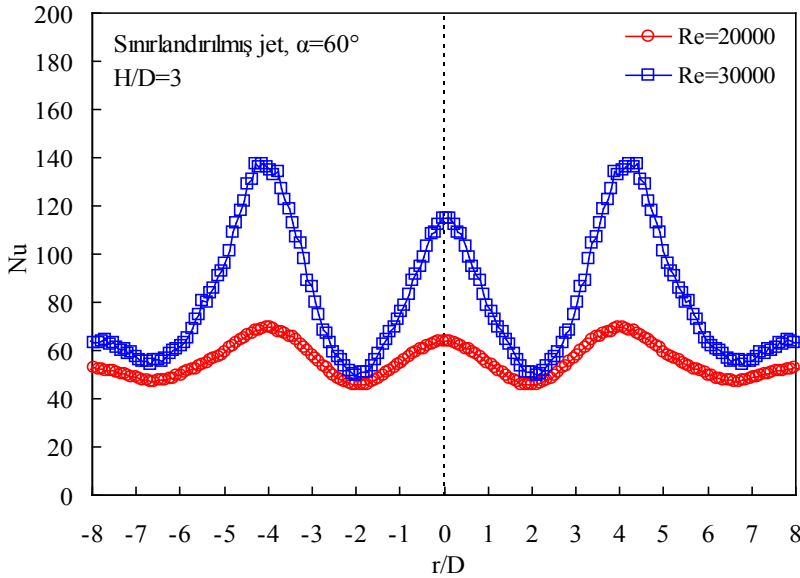
Levhalar arası açıklık değeri $H/D=1$ için Şekil 9'da verilen Nusselt dağılımları, Şekil 6'da verilen dağılımlarla benzerlik göstermektedir. Birincil durma noktasındaki pik ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki pikler aynı seviyede kalmaktadır. Şekil 10'da, levhalar arası açıklık değeri $H/D=3$ için iki farklı Reynolds sayısında çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımları görülmektedir. İkincil jetlerin çarpma levhası üzerinde oluşturduğu $r/D \approx \pm 4$ konumundaki pikler, birincil durma noktasındaki pikten daha kuvvetli hale gelmektedir. Levhalar arası açıklık değeri $H/D=6$ iken, iki farklı Reynolds sayısı değeri için Şekil 11'de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhası üzerinde ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda oluşan piklerin $r/D \approx \pm 6$ konumunda oluştuğu görülmektedir. Dört farklı levhalar arası açıklığa ait grafikler bir arada değerlendirildiğinde, artan Reynolds sayısı ile birlikte çarpma levhası boyunca Nusselt değerlerinin arttığı görülmektedir. Her iki Reynolds sayısında da artan levhalar arası açıklıkla birlikte ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan piklerin konumları daha büyük $\pm r/D$ değerlerine kaymaktadır.



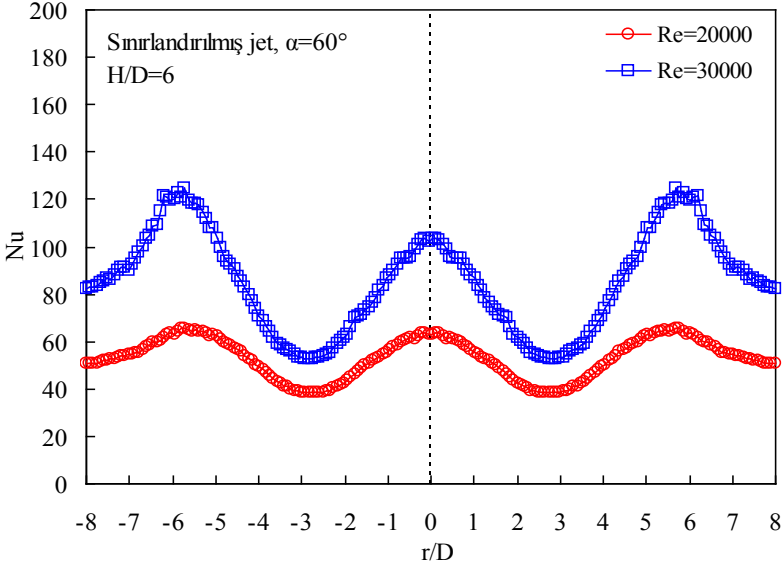
Şekil 8. $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=0.5$ için sınırlandırılmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları



Şekil 9. $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=1$ için sınırlanmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları

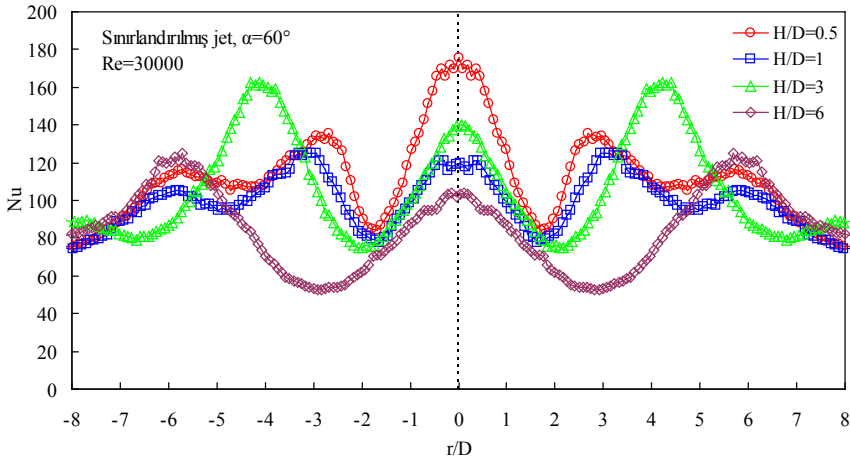


Şekil 10. $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=3$ için sınırlanmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları



Şekil 11. $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=6$ için sınırlanmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt dağılımları

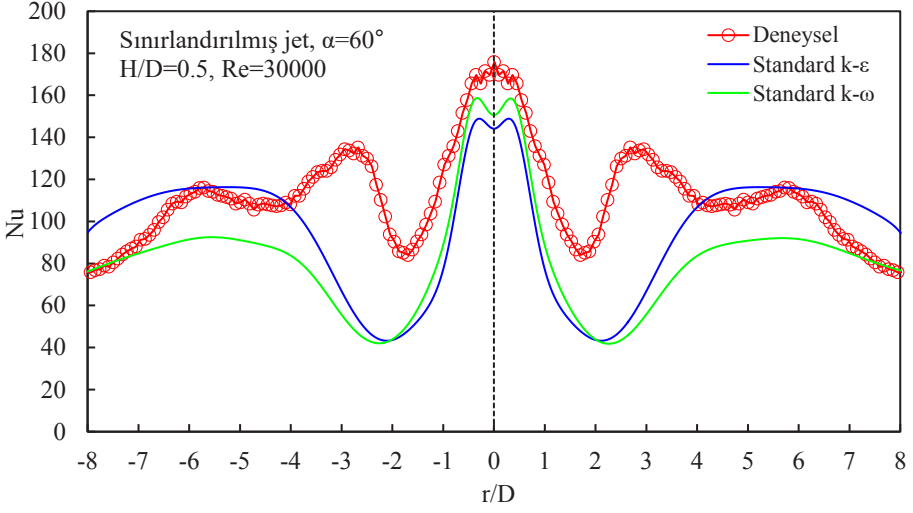
Şekil 12’de Reynolds sayısı değeri 30000 iken, çarpma levhası üzerinde açıklık oranları $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için elde edilen Nusselt dağılımlarında, levhalar arası açıklığın etkisi görülmektedir. Artan açıklıkla, yerel Nusselt değerleri azalmaktadır. Çarpma levhası üzerinde ikincil jetlerin çarpması nedeniyle oluşan piklerin konumu artan levhalar arası açıklıkla birlikte levha uçlarına kaymaktadır.



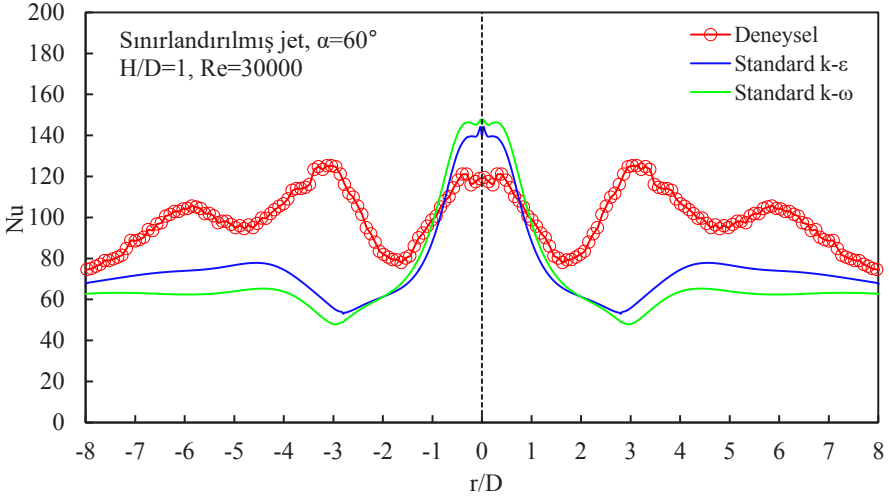
Şekil 12. $Re=30000$ ve $\alpha=60^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

60° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlanmış çarpan dizi jet akışında, çarpma yüzeyi üzerinde iki farklı türbülans modeli ile hesaplanmış Nusselt dağılımları, deneysel sonuçlarla birlikte Reynolds sayısının 30000 değeri ve levhalar arası açık değeri $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için sırasıyla Şekil 13-16'da verilmiştir. Levhalar arası açıklığın $H/D=0.5$ değerinde, her iki türbülans modeli ile çarpma levhası üzerinde hesaplanan Nusselt değerleri deneysel değerlerden daha küçük olmaktadır. (Şekil 13). $H/D=1$ açıklıkta, iki türbülans modeli ile hesaplanan Nusselt dağılımı da benzer olmakta ve çarpma levhası üzerindeki deneysel sonuçlarla farklılık göstermektedir (Şekil 14). Levhalar arası açıklığın $H/D=3$, değerinde, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında çarpma bölgesinde sağlanan uyum, $H/D=6$ açıklıkta daha da artmaktadır (Şekil 15-16).

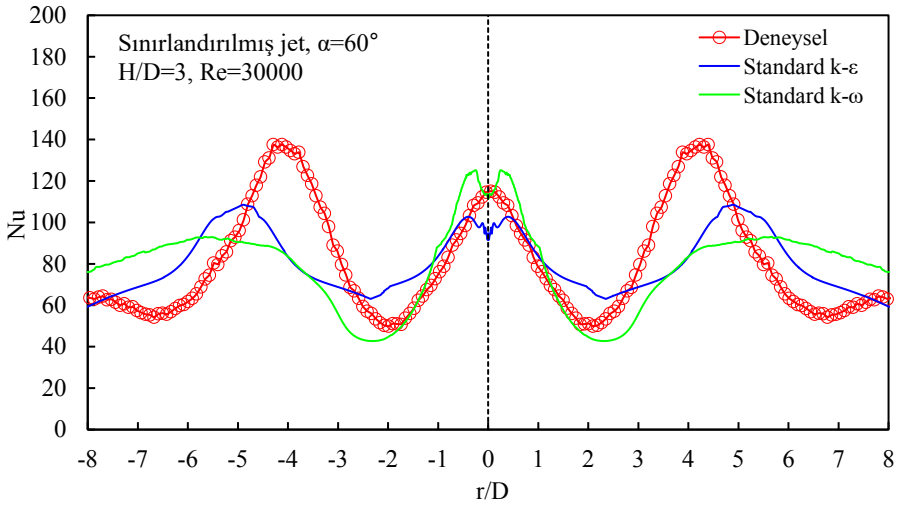
Elde edilen bulguların, Geers, Hanjalic ve Tummers (2006) tarafından çoklu çarpan jet dizilerinde jet eğiminin ısı transferi üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile benzer olduğu görülmektedir.



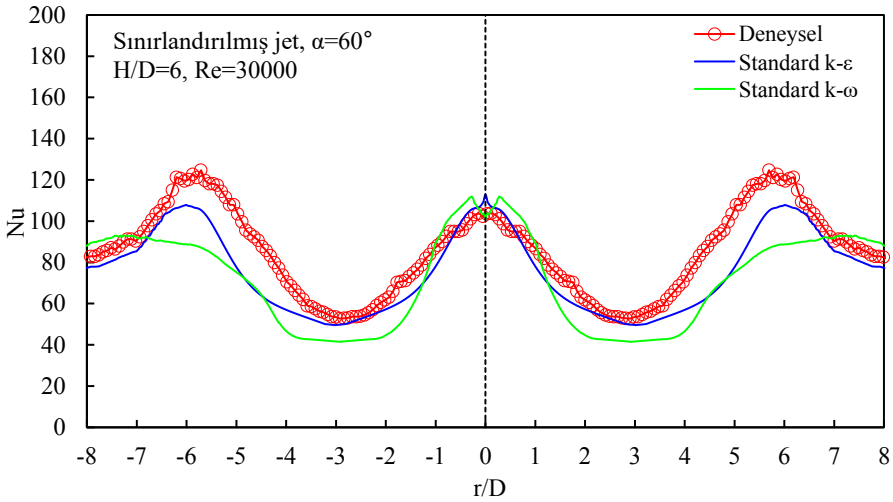
Şekil 13. $Re=30000$, $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=0.5$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 14. $Re=30000$, $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=1$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 15. $Re=30000$, $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=3$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 16. $Re=30000$, $\alpha=60^\circ$ ve $H/D=6$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, 60° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akı-

şında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri hem deneysel hem de sayısal çalışma gerçekleştirilerek incelenmiştir. Çalışmanın deneysel bölümünde, Reynolds sayısı değerleri 20000 ve 30000 iken ve sınırlayıcı levha ile çarpma levhası arasındaki açıklık değerleri 0.5, 1, 3 ve 6 için çarpma levhasının orta eksenli boyunca termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Çalışmanın sayısal kısmında ise, Reynolds sayısının 30000 değerinde aynı açıklık değerleri için Standard k- ϵ ve Standard k- ω türbülans modellerinin Kato Launder modifiyeli versiyonları ile iki boyutlu çözümler gerçekleştirilmiş ve çarpma levhası üzerinde hesaplanan sıcaklık dağılımları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenli doğrultusundaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında yerel Nusselt sayısı pik değerler almaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir. Çarpma levhası üzeri boyunca Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile artmakta, artan levhalar arası açıklıkla azalmakta ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan piklerin konumları daha büyük $\pm r/D$ değerlerine kaymaktadır. Eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışında, iki boyutlu sayısal çözümlerde kullanılan her iki türbülans modeli ile hesaplanan Nusselt dağılımı da benzer olmakta, çarpma bölgesinde deneysel sonuçlarla sağlanan iyi uyum, çarpma bölgesi uzağında azalmaktadır. Levhalar arası açıklık arttıkça sayısal ve deneysel sonuçlar daha uyumlu olmaktadır.

Teşekkür

K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü'ne test ekipmanı ve programı sağladığı için teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Semboller ve Kısaltmalar

Kısaltmalar

PCB	:	Baskılı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
QVGA	:	Çeyrek Video Grafik Dizisi (Quarter Video Graphics Array)
EWT	:	İyileştirilmiş Duvar İfadesi (Enhanced Wall Treatment)

Latin Semboller

P	:	Basınç (Pa) veya Sıkıştırılmaz akışlarda üretim terimi
Q	:	Isıl enerji (W)
A	:	Çarpma yüzeyi alanı
D	:	Lüle çapı
h	:	Isı taşınım katsayısı
H	:	Lüle-çarpma yüzeyi arası mesafe

I	:	Akım
V	:	Voltaj
R	:	Elektriksel direnç
r	:	Durma noktasından radyal doğrultuda uzaklık veya Yarıçap
Re	:	Reynolds sayısı
T	:	Sıcaklık
U_0	:	Jet hızı
x	:	Yatay eksen tanımı
y	:	Düşey eksen tanımı
z	:	Derinlik yönündeki eksen tanımı
Nu	:	Nusselt sayısı
k- ω	:	k-omega türbülans modeli
k- ϵ	:	k-epsilon türbülans modeli
Pr	:	Prandtl sayısı
k	:	Isı iletim katsayısı veya Türbülans kinetik enerjisi
$^{\circ}\text{C}$:	Derece santigrat
y+	:	Hücre merkezi-duvar uzaklığı
q"	:	Isı akısı (W/m^2)
K	:	Kelvin

Grek Semboller

ρ	:	Ro (Akışkan yoğunluğu kg/m^3)
α	:	Alfa (Jet eğim açısı)
ϵ	:	Epsilon (Emisivite katsayısı veya Türbülans kinetik enerjisinin yutulması)
ω	:	Omega (Yutulmanın kinetik enerjiye oranı)
μ	:	Mü (Viskozite)
ν	:	Nü (Kinematik viskozite)
σ	:	Sigma (Stefan-Boltzman sabiti)
ζ_{ij}	:	Gerilme tensörü
μ_t	:	Türbülans viskozitesi
Δ	:	Delta (Fark ifadesi)

Alt İndisler

s	:	Yüzey (Surface)
w	:	Duvar (Wall)
j	:	Jet

Kaynakça

- Abdel-Fattah, A. (2007). Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, 1061-1072. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.11.006>
- Aldabbagh, L. B. Y., & Mohamad, A. A. (2007). Effect of jet-to-plate spacing in laminar array jets impinging. *Heat and Mass Transfer*, 43, 265-273. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-006-0109-7>
- Aldabbagh, L. B. Y., & Sezai, I. (2002). Numerical simulation of three-dimensional laminar, square twin-jet impingement on a flat plate, flow structure, and heat transfer. *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, 41, 835-850. Doi: <https://doi.org/10.1080/10407780290059378>
- Al Mubarak, A. A., Shaahid, S. M., & Al-Hadhrami, L. M. (2013). Heat transfer in a channel with inclined target surface cooled by single array of centered impinging jets. *Thermal Science*, 17, 1195-1206. Doi: <https://doi.org/10.2298/TSCI110630010A>
- Attalla, M., & Specht, E. (2009). Heat transfer characteristics from in-line arrays of free impinging jets. *Heat and Mass Transfer*, 45, 537-543. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-008-0452-y>
- Baz, F. B., Elshenawy, E. A., El-Agouz, S. A., El-Samadony, Y. A. F., & Marzouk, S. A. (2024). Experimental study on air impinging jet for effective cooling of multiple protruding heat sources. *International Journal of Thermal Sciences*, 196, 108707. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108707>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Introduction to Heat Transfer* (6th ed.). Wiley.
- Buchlin, J. M. (2011). Convective Heat Transfer In Impinging-Gas-Jet Arrangements. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4, 137-149. Doi: <https://doi.org/10.36884/jafm.4.02.11926>
- Caliskan, S., Baskaya, S., & Calisir, T. (2014). Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 685-703. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.005>
- Chuang, S. H., Chen, M. H., Lii, S. W., & Tai, F. M. (1992). Numerical simulation of twin-jet impingement on a flat plate coupled with cross-flow. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 14, 459-475. Doi: <https://doi.org/10.1002/flf.1650140406>
- Chuang, S. H., & Nieh, T. J. (2000). Numerical simulation and analysis of three-dimensional turbulent impinging square twin-jet flow field with no-crossflow. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 33, 475-498. Doi: [https://doi.org/10.1002/1097-0363\(20000630\)33:4%3C475::AID-](https://doi.org/10.1002/1097-0363(20000630)33:4%3C475::AID-)

FLD16%3E3.0.CO;2-Q

- Churchill, S. W., & Chu, H. H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329. Doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90243-4)
- Dagtekin, I., & Oztop, H. F. (2008). Heat transfer due to double laminar slot jets impingement onto an isothermal wall within one side closed long duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 65-75. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.013>
- Dong, L. L., Leung, C. W., & Cheung, C. S. (2004). Heat transfer and wall pressure characteristics of a twin premixed butane/air flame jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 489-500. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.07.019>
- Fernández, J. A., Elicer-Cortés, J. C., Valencia, A., Pavageau, M., & Gupta, S. (2007). Comparison of low-cost two-equation turbulence models for prediction flow dynamics in twin-jets devices. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34, 570-578. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.02.011>
- Geers, L. F. G., Hanjalic, K. & Tummers, M. J. Wall imprint of turbulent structures and heat transfer in multiple impinging jet arrays, *J. Fluid Mech.*, 546, 2006, 255-284. Doi: <https://doi.org/10.1017/S002211200500710X>
- Godi, S.C., Pattamatta, A. & Balaji, C. (2020). Heat transfer from a single and row of three dimensional wall jets - A combined experimental and numerical study, *Int. J. Heat Mass Transf.* 159, 119801, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119801>.
- Guoneng, L., Zhihua, X., Youqu, Z., Wenwen, G. & Cong, D. (2016). Experimental study on convective heat transfer from a rectangular flat plate by multiple impinging jets in laminar cross flows, *Int. J. Therm. Sci.* 108, 123–131, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.006>.
- Kato, M., & Launder, B. E. (1993). The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders. *In Proceedings of the 9th Symposium on Turbulent Shear Flows* (pp. 10.4.1–10.4.6).
- Kline, S., & McClintock, F. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.
- Maddox, J. F., Knight, R. W., & Bhavnani, S. H. (2015). Liquid Jet Impingement With an Angled Confining Wall for Spent Flow Management for Power Electronics Cooling With Local Thermal Measurements. *Journal of Electronic Packaging*, 137. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.4030953>

- Miao, J. M., Wu, C. Y., & Chen, P. H. (2009). Numerical investigation of confined multiple-jet impingement cooling over a flat plate at different crossflow orientations. *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, 55, 1019-1050. Doi: <https://doi.org/10.1080/10407780903014335>
- Ozmen, Y. (2011). Confined impinging twin air jets at high Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 355-363. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.10.006>
- Ozmen, Y., & Baydar, E. (2013). A numerical investigation on confined impinging array of air jets. *Journal of Thermal Science and Technology*, 33, 65-74.
- Ozmen, Y., & Ipek, G. (2016). Investigation of flow structure and heat transfer characteristics in an array of impinging slot jets. *Heat and Mass Transfer*, 52, 773-787. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1598-z>
- Polat, S., Huang, B., Mujumdar, A. S., & Douglas, W. J. M. (1989). Numerical flow and heat transfer under impinging jets: A review. *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 2, 157-197. Doi: <https://doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.v2.60>
- San, J. Y. & Chen, J. J. (2014). Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array, *Int. J. Heat Mass Transf.* 71 (2014) 8–17, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.079>.
- Seyedein, S. H., Hasan, M., & Mujumdar, A. S. (1995). Turbulent flow and heat transfer from confined multiple impinging slot jets. *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, 27, 35-51. Doi: <https://doi.org/10.1080/10407789508913687>
- Talapati, R. J., Baghel, K., Shrigondekar, H., & Katti, V. V. (2024). Influence of inclined unconfined circular air jet impingement on local heat transfer characteristics of smooth flat plate. *International Journal of Thermal Sciences*, 197, 108848. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108848>
- Tepe, A. Ü. (2019). *Gaz Türbin Kanatlarında Jet Çarpmalı Soğutmanın Deneysel ve Sayısal İncelenmesi* [Doktora tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Yang, Y. T., & Shyu, C. H. (1998). Numerical study of multiple impinging slot jets with an inclined confinement surface. *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, 33, 23-37. Doi: <https://doi.org/10.1080/10407789808913926>
- Yalçinkaya, O., Durmaz, U., Tepe, A. Ü., Benim, A. C., & Uysal, Ü. (2024). Heat and Flow Characteristics of Aerofoil-Shaped Fins on a Curved Target Surface in a Confined Channel for an Impinging Jet Array. *Energies*, 17(5), 1238. Doi: <https://doi.org/10.3390/en17051238>



ELEKTRONİK ATIKLARIN GERİ DÖNÜŞÜMÜ İÇİN ÖN KIRMA VE ÖĞÜTME EKİPMANININ TASARIMI

Furkan BULUT^{1*}, Prof. Dr. Ayhan ÇELİK²

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, Erzurum
ORCID No : <http://orcid.org/0009-0001-8624-4270>

² Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğikontrüksiyon ve İma-
lat Ana Bilim Dalı, Erzurum, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8096-0794>

Anahtar Kelimeler

Öz

*E-atık, geri dönüşüm,
kıymetli metal,
parçalayıcı, kırıcı, çekiçli
kırıcı*

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile elektronik ürünler, hem evlerde hem de işyerlerinde kullanılarak hayatı kolaylaştırmaktadır. Kullanım ömrü dolmuş elektronik ürünlere ise elektronik atık adı verilir. Elektronik atıklar, yapılarında bulunan ağır metaller nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümü, atıkların bertarafı ve değerli materyallerin geri kazanımı açısından son derece önemlidir. Saf metaller yerine geri dönüştürülmüş materyallerin kullanılması, öncelikle kayda değer enerji tasarrufu sağlamaktadır. Shredder ve çekiçli kırıcı makineleri, kompakt bir yapı altında toplayarak kırma ve öğütme işlemlerinin aynı ekipman içinde yapılabileceğini göstermekte, bu sayede maddi, zaman ve verim açısından kazanç sağlanmaktadır. Bu tür bir sürecin ilk kez kompakt bir tasarımda bir arada yapılabileceğini vurgulamak da önemlidir. Yapılan araştırmalar sonucunda, piyasada yer alan kırma işlemlerinin yapıldığı ekipmanların, istenilen tane boyutlarına, maliyete ve parça büyüklüklerine göre birçok çeşidi mevcuttur. Ön kırma elemanı olan shredder, bıçak sayıları, şaft sayıları ve elek kısımları açısından birbirinden ayrılmaktadır. Ön araştırmalara göre dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır: bıçak sayısı, şaft sayısı, bıçak tasarımı, kırma işlemlerinde bıçak kısımlarının zarar görmesi ve aşınması, malzemenin ön kırma ekipmanı içinde atlama yapmaması ve ekipman içinde sıkışma olmamasıdır. Bu nedenle, tork hesabı, redüktör gücünün hesaplanması, bıçak kısımlarının malzemeyi tutma açısından tasarımının uygun olması ve elek kısmının tasarımı tıkanma olmaması açısından önem taşımaktadır. Ön kırma ve çekiçli kırıcının kompakt bir yapıda olabilmesi için tasarımın buna uygun olması planlanmaktadır.

* furkanbulut9397@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1491583

DESIGN OF PRE-SHREDDING AND GRINDING EQUIPMENT FOR THE RECYCLING OF ELECTRONIC WASTE

Keywords

E-waste, recycling, precious metals, shredder, hammer, crusher

Abstract

With the advancement of technology today, electronic products are used in both homes and workplaces, making life easier. Electronic products that have reached the end of their lifespan are referred to as electronic waste. Due to the heavy metals they contain, electronic waste poses a significant threat to environmental and human health. The recycling of electrical and electronic waste is important not only for waste disposal but also for the recovery of valuable materials. Using recycled materials instead of pure metals primarily leads to substantial energy savings. This study aims to demonstrate that shredding and grinding processes can be performed within the same equipment by integrating shredder and hammer mill machines into a compact structure. This integration will illustrate how financial, time, and efficiency gains can be achieved. This type of process is being presented for the first time in a compact design. Research indicates that there are many types of equipment available on the market for crushing processes, varying according to desired particle sizes, costs, and part sizes. Shredder pre-crushers differ in terms of the number of blades, the number of shafts, and the design of the screen parts. Preliminary research highlights several important factors, including the number of blades, the number of shafts, blade design, damage and wear to blade parts during crushing processes, preventing material from jumping within the pre-crushing equipment, and avoiding blockages within the equipment. Therefore, it is essential to calculate the torque, determine the reducer power, ensure the blade design is suitable for holding the material, and design the screen part to prevent blockages. The design is planned to effectively integrate pre-crushing and hammer mill functions into a compact structure.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 29.05.2024

Kabul Tarihi : 17.07.2024

Research Article

Submission Date : 29.05.2024

Accepted Date : 17.07.2024

Extended Abstract

Introduction

With the advancement of technology in contemporary society, electronic devices have become ubiquitous in both households and workplaces, significantly facilitating daily life. Discarded electronic products, whose operational lifespan has expired, are referred to as electronic waste. Electronic waste poses a substantial threat to environmental and human health due to the presence of heavy metals in their composition. The recycling of electrical and electronic waste is crucial not only for waste management but also for the recovery of valuable materials. The utilization of recycled materials, instead of pure metals, primarily contributes to noteworthy energy conservation. The proper disposal and recycling of electronic waste are imperative for safeguarding the environment and human well-being in the face of the escalating technological landscape.

Objectives/ Research Purpose

Combining the functionalities of a shredder and a hammer mill under a compact structure enables the crushing and grinding processes to be performed within the same equipment, resulting in significant gains in terms of cost, time, and efficiency. This integrated approach demonstrates the potential for substantial benefits in material processing. By consolidating shredding and hammering functions into a single unit, this innovative design not only enhances operational convenience but also establishes a novel concept where these processes can be seamlessly executed in a compact form for the first time.

Results/ Findings

The decision has been made to design four different equipment components within a compact structure. These components are:

1. Dual-Shaft Shredder
2. Hammer Mill Crusher
3. Vibrating Screen
4. Spiral Conveyor

The design of the dual-shaft shredder features multiple shafts to facilitate easier material intake during the shredding process. The blade sections are crafted in a hook shape to enhance material grip. The design specifications for the hammer mill crusher are based on research and various calculations, taking into account the number of hammers, their weight, and the required shaft diameters to achieve the desired torque.

In the vibrating screen section, the screen opening is set to 1mm to ensure the material is reduced to this size. Materials larger than 1mm are redirected back to the crushing section for reprocessing via the spiral conveyor. Once the desired dimensions are achieved, the equipment is designed to transfer the material from the vibrating screen to the collection container.

1. Giriş

Elektronik atıkların geri dönüşümü, çevre ve insan sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle elektronik devre kartlarında bulunan kıymetli metallerin geri dönüşümü, ciddi miktarda maddi kazanç sağlamakta birlikte zaman ve çevre kirliliği açısından da önemlidir. Elektronik devre kartlarından kıymetli metallerin geri kazanımının ilk aşaması, kırma ve öğütme işlemlerinin yapıldığı ekipmanlardır. Malzeme, öncelikle ön kırma işlemlerinden geçirildikten sonra konveyör yardımıyla ikincil bir kırıcıya aktarılır ve istenilen boyutlara getirilir. Ancak bu işleyiş, hem maddiyat hem de zaman açısından kayıplara yol açmaktadır. Yeni üretilen ürünlere olan hızlı talep, “elektronik atık” (E-atık) adı verilen yeni bir çöp sorununu ortaya çıkarmıştır. E-atıkların çevre ve insan sağlığına uygun olmayan yöntemler ve yasal olmayan kurum ve kuruluşlar tarafından toplanması, depolanması ve bertaraf edilmesi, ortaya çıkan ağır metallerin çevre ve insan sağlığı açısından toplumu olumsuz yönde etkilemesine neden olmaktadır. Bu araştırmanın amacı, e-atıklar hakkında bilgi vermek, atıkların çevre ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerini göstererek bu konuda bir tasarım projesi ortaya koymak ve topluma fayda sağlamaktır (Aydın, 2017). Çalışmamız, geri dönüşüm sektörüne bir ışık tutmayı, aynı zamanda hem canlılar hem de çevre sağlığı adına kıymetli metallerin geri dönüşümünü daha kolay bir yapı altında gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Bu tasarım projesi, saha ziyaretlerinden edinilen deneyimler ve literatür taramaları sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda hazırlanmıştır. Tasarımda hedef, tüm bu ekipmanları kompakt bir yapı altında toplamaktır. Bu çalışmanın hesaplamaları, makine elemanları göz önüne alınarak yapılmıştır (Şekercioğlu, 2011).

2. Elektronik Atıkların Zararları

5/8/2008 tarihli ve 26891 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Türkiye’de Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik uyarınca, dünyadaki atıkların %1’i elektronik atıklardan oluşmaktadır. Buna rağmen, topraktaki tehlikeli madde kirliliğinin %70’i e-atıklar sebebiyle meydana gelmektedir. Ayrıca, e-atıklardaki tehlikeli materyaller, atık biriktirme ve depo alanlarında doğrudan ya da geri dönüşüm işlemleri sırasında ortaya çıkabilmektedir. Bu zararlı maddeler solunduğunda, yutulduğunda veya cilde temas ettiğinde insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu zararlı maddelerin neler olduğu, zararları ve nerelerde buldukları Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Elektronik Devre Kartlarında Zararlı Materyaller (Ayşegül, K, Besim, A, 2011).

Malzeme	Bulunduğu Yer	Zararları
Kurşun	Devre kartlarında	Kemik, Doku ve Beyin hasarı
Civa	Batarya, Lamba	Beyin, Karaciğer hasarı
Krom	Disk yerlerinde	Göz, Deri ve Mukoza tahrişi
Baryum	Baskı devre kartları	Beyin tümörü, Kas zayıflığı
Kadmiyum	Ekranlar, Bataryalar	Akciğer kanseri
Klorofloro Karbon	Soğutucu ünitelerde	Ozan Tabakası
Poliklorlu Bifeniller	Kondansatör, Transformator	Kanser, Sinir sistemi hasarı
Arsenik	Led	Deri hastalıkları
Fosfor	CRT tüplerinde	Solunumla zehirlenme
Berilyum	Anakart	Kanserojen

3. Elektronik Atıkların Geri Kazanılmasının Faydaları

Türkiye’de “Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılmasına Dair Yönetmelik,” Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından 30/05/2008 tarihli ve 26891 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanmıştır. Bu yönetmeliğin amacı, insan ve çevre sağlığı açısından elektrikli ve elektronik eşyalarda zararlı maddelerin kullanımının kısıtlanması ve bu kısıtlamadan muaf tutulacak uygulamaların belirlenmesidir. Ayrıca, elektrikli ve elektronik eşyaların ithalatının kontrol altına alınmasına dair idari, hukuki ve teknik esasları düzenleyerek elektrikli ve elektronik eşya atıklarının çevreyle uyumlu bir şekilde geri kazanılması ve bertaraf edilmesine ilişkin usul ve esasları belirlemektir (Akın, Kuru, 2011). Bu nedenlerle, elektronik atıkların geri dönüşümü oldukça önem taşımaktadır.

Elektronik atıkların geri kazandırılmasıyla enerji tasarrufu sağlanır ve doğal kaynaklarımız korunur. E-atık geri kazanımı, kullanım ömrü dolmuş elektronik eşyalardan kıymetli metallerin geri kazanılmasını ve yeni ürünlerde tekrar kullanılmasını sağlar. Bu durumda, enerji tasarrufu sağlanır ve çevre kirliliği önlenmiş olur (Çelik, 2009).

2018’de büyük ev eşyalarının %75’i, küçük ev aletlerinin %50’si, bilişim ekipmanları ve telekomünikasyon ekipmanlarının %65’i, elektrikli ve elektronik

aletlerin %50'si ile oyuncaklar, eğlence ve spor ekipmanlarının %50'sinin yönetmelik çerçevesinde geri kazanılması hedeflenmektedir. Bu sayede büyük bir ekonomik istihdam yaratılması öngörülmektedir (Akın, Kuru, 2011).

Geri dönüşüm, çevreyi korur: Elektronik atıklar içinde bulunan civa ve kurşun gibi zararlı materyaller geri kazanılarak çevre kirliliği önlenir. Yeni iş olanakları sağlar: E-atık geri kazanımı, sürekli gelişen bir sektör olarak yeni iş fırsatları yaratır ve geri dönüştürülen malzemeler için ikinci bir piyasa oluşmasını sağlar. Yeşil bir dünya için, e-atıkların geri dönüşümünden elde edilen kazançlar ile maden sektöründeki maliyetler göz ardı edilemeyecek kadar fazladır (Şentürk, 2019).

4. Elektronik Devre Kartlarındaki Değerli Metaller

4.1 Altın

Elektrik iletkenliği oldukça yüksek olan ve kolayca kimyasal tepkimelere girmeyen altın, en çok elektrik ve elektronik sanayilerde bağlantıların, baskı devrelerinin, transistörlerin ve yarı iletken kısımlarının kaplanmasında sıklıkla tercih edilmektedir (Çevikel B, 2009).

4.2 Gümüş

Gümüş, ışığı yansıtabilen, işlenebilen ve sünek bir metal malzemedir. Bir gram gümüşten 2 km uzunluğunda ince tel çekilebilir. Elektriksel sistemlerde küp ve altın olarak kristallenebilir. Elektrik iletkenliği ve dayanıklılığı oldukça yüksek olduğu için elektronik devre kartlarında kullanılmaktadır (Çevikel B, 2009).

4.3 Paladyum

Paladyum, kıymetli metaller arasında yer almakta olup beyaz altın elde etme işlemlerinde önemli bir role sahiptir. Piyasada maddi olarak değerinin oldukça fazla olduğu bilinmektedir ve gümüş gibi parlak bir yapıya sahiptir (Çevikel B, 2009).

4.4 Bakır

Bakır, elektrik iletkenliği oldukça yüksek bir malzemedir. Kolay işlenebilir olması, kullanım alanlarını yaygınlaştırmıştır. Isı iletkenliği ve aşınmaya karşı direnci yüksek bir malzemedir (Çevikel B, 2009).

Elektronik atıklardaki değerli metallerin geri dönüşümü, çevre, insan sağlığı ve maddi kazanç açısından oldukça önemlidir. Günümüzün en büyük sorunlarından biri çevre kirliliğidir ve bu kirliliğin canlılar üzerindeki olumsuz etkileri vardır. Bu nedenle, hayatımızın her aşamasında geri dönüşüm işlemi önemli bir role sahiptir (Çevikel B, 2009).

Tablo 2. Elektronik Devre Kartlarında Değerli Metaller (Tanısalı E, Özer M, Burat F, (2019))

Elektronik Atık	Ağırlık (%)					Ağırlık (ppm)		
	Fe	Cu	Al	Pb	Ni	Ag	Au	Pd
TV kart hurdası	28	10	10	1	0,3	280	20	10
PC kart hurdası	7	20	5	1,5	1	1000	250	110
Cep telefonu hur- dası	5	13	1	0,3	0,1	1380	350	210
	23	21	1	0,14	0,03	150	10	4
DVD çalar hurdası	62	5	2	0,3	0,05	115	15	4
Hesap makinesi hurdası	4	3	5	0,1	0,5	260	50	5
TV anakart hur- dası	4,5	14,3	2,8	2,2	1,1	639	566	124
Baskı devre kartı hurdası	12	10	7	1,2	0,85	280	110	
TV hurdası (CRT'si ayrılmış)		3,4	1,2	0,2	0,038	20	<10	<10
Elektronik hurdası	8,3	8,5	0,71	3,15	2	29	12	
PC hurdası	20	7	14	6	0,085	189	16	3
Genel elektronik hurdası	8	20	2	2	2	2000	1000	50
E-atık örnek 1	37,4	18,2	19	1,6		6	12	
E-atık örnek 2	27,3	16,4	11	1,4		210	150	20
Baskı devre kartı	5,3	26,8	1,9		0,47	3300	80	
E-hurda (1972 örneği)	26,2	18,6				1800	220	30
Karışık e-atık	36	4,1	4,9	0,29	1			

5. Elektronik Atıkların Geri Kazanım Prosesi

Günümüz teknolojisi ile geri kazanım prosesi, gelişmiş ekipman çeşitleri ve teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilen bir geri kazanım işlemidir. Günümüz şartlarında oldukça yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Tercih edilmesinin en büyük sebebi, çevre ve insan sağlığına herhangi bir tehdit oluşturmamasıdır. Metal ekipman çeşitleri, konveyör ve kimyasal bileşenler kullanılarak yapılan ayrıştırma işlemi, elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümünde büyük önem taşır. Ön işlem aşamalarının temel anlamda üç amacı vardır. Birincisi, malzemenin tane boyutunun küçük olması gerektiğidir. Ayrıştırma işlemi için bu önemli

dir çünkü küçük tane boyutları, büyük tane boyutlarına göre daha iyi tutunma ve birleşme sağlamaktadır. Kırma işlemi, yaygın olarak kullanılan parçalayıcı bıçakları bulunan hareketli bir ekipman ile başlar. İkinci aşamada çekiçli veya darbeli tip kırıcılar kullanılmaktadır. Elektronik devre kartlarındaki metaller, farklı ebatlardaki serbestleşme kabiliyetlerinden ötürü kırma ve öğütme işlemleri sırasıyla gerçekleştirilmektedir. İstenilen ölçüde serbestleşen metaller, plastik ve seramik malzemeler, fiziksel zenginleştirme yöntemleri kullanılarak plastik kısımdan ayrılır. Metaller, bükülebilir ve işlenebilir özellikte oldukları için serbestleşme boyutunun altına geçemez ve yalnızca şekil değiştirirler. Zenginleştirme çalışmalarında kullanılacak malzemeyi uygun tane boyutuna getirmek amacıyla, öncelikle kırma işlemi gerçekleştirildikten sonra elek kullanılarak malzeme iki ayrı boyuta sınıflandırılmalıdır. Tane boyutunun istenilen 1 mm'ye gelmesi için, ikinci kade me kırma işleminde çekiçli kırıcı kullanılmakta ve titreşimli elekten geçerek 1 mm çap sağlanması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, elde edilen malzemelerin tane boyutu, proses için önem taşımaktadır (Özkan, 2018).

6. Elektronik Atıkların ve Kıymetli Metallerin Geri Kazanımı İçin Tasarlanan Ön Kırma ve Öğütme Ekipmanı

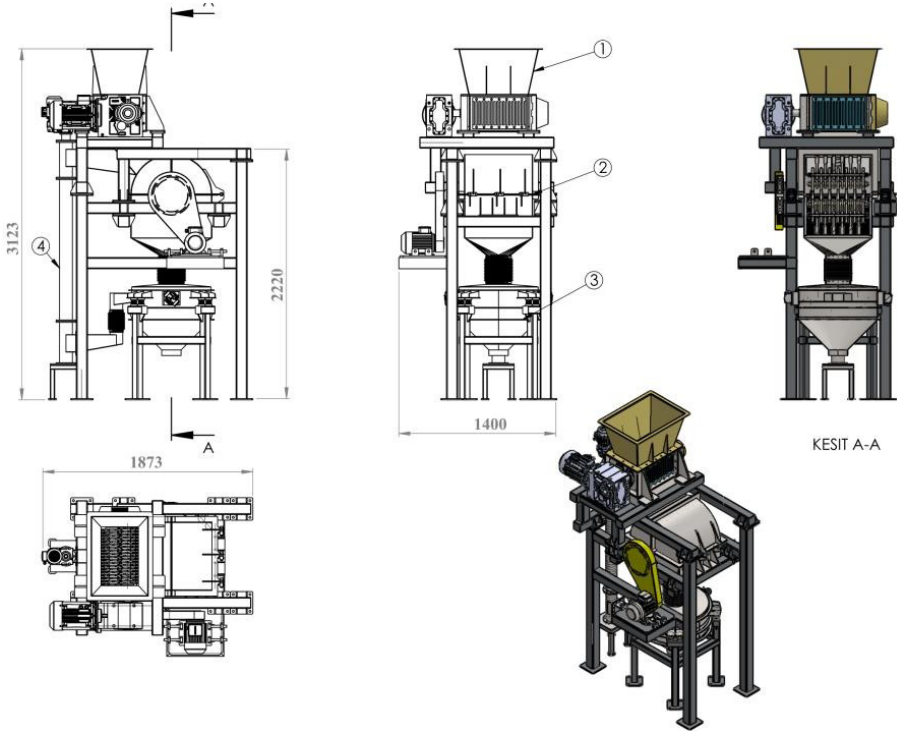
Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Elektronik atıkların geri dönüşümü ve kıymetli metallerin geri kazanımı için çeşitli yollar mevcuttur. Ön kırma ve öğütme ekipmanının çalışma prensibi, materyallerin parçalayıcı makinenin üst kısmından fan, fork-lift veya manuel (el ile) besleme ile konulmasıdır. Ekipmana aktarılan malzemeler shredder bıçaklarına doğru düşer. Burada parçalama işlemi gerçekleşir ve malzeme, direkt olarak bir chute yardımıyla hummer kırıcıya aktarılır. Daha sonra, vibrasyonlu bir elekten geçerek dikey helezon yardımıyla tekrar hummer kısmına iletilir. Bunun sebebi, malzemenin istenilen tane boyutlarına getirilmesidir. Bu çalışmanın amacı, piyasadaki ürünlerden farklı olarak shredder ve hammer (çekiçli kırıcı) makinelerini kompakt bir yapı altında toplayarak kırma ve öğütme işlemlerini aynı ekipman içinde gerçekleştirmektir. Böylece zaman, maddi ve verim açısından kazanç sağlamayı hedeflemektedir (Şekil 1).

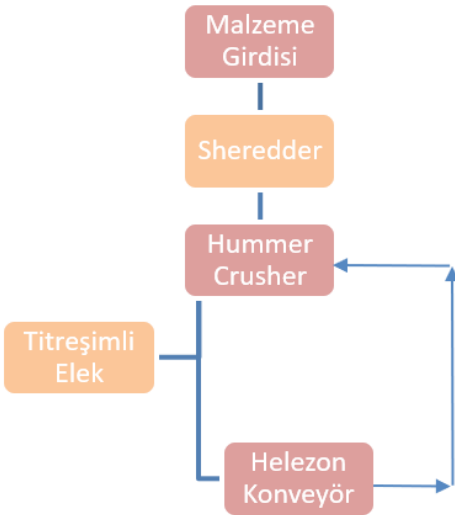
Ön kırma ve öğütme ekipmanı 4 kısımdan oluşmaktadır;

- Shredder (Parçalayıcı)
- Hummer mill crusher (Çekiçli kırıcı)
- Vibrasyonlu Elek
- Dikey helezon konveyör

Prosesin akış şemasını Şekil' de görebilirsiniz.



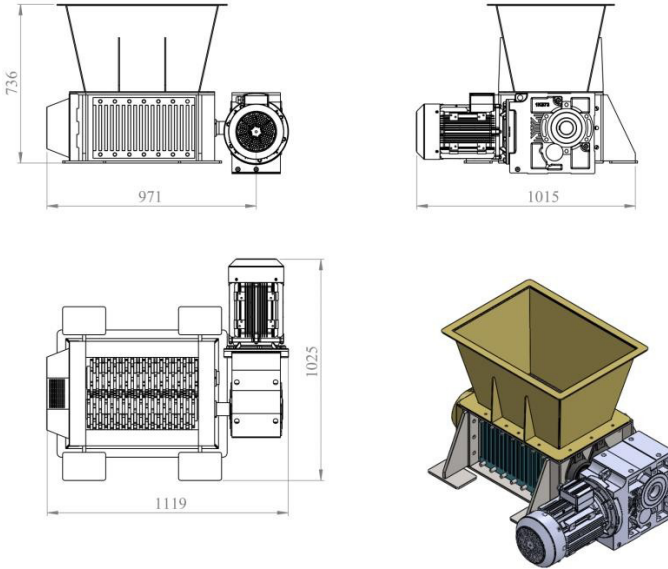
Şekil 1.Ön Kırma Öğütme Ekipmanı



Şekil 2. Akış Şeması

6.1 Shredder

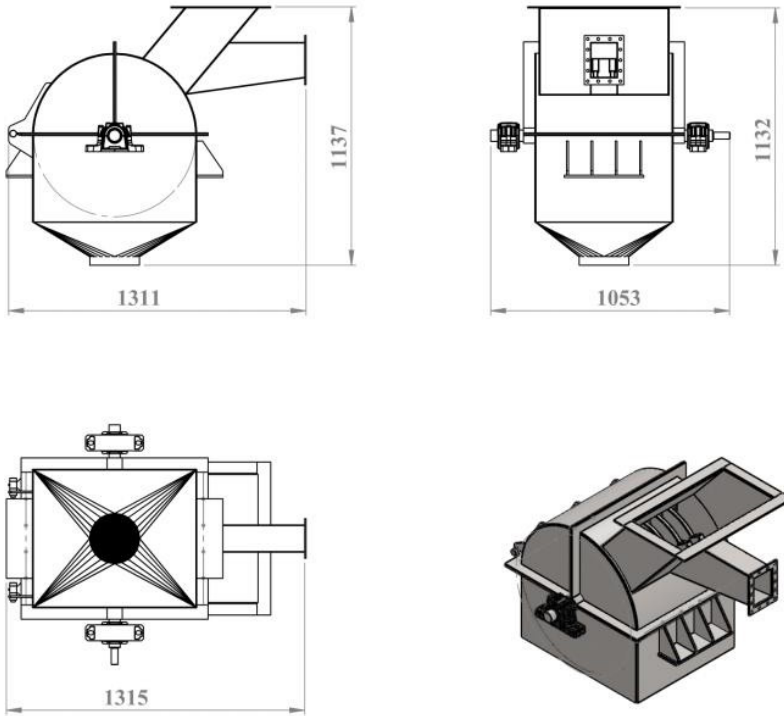
Plastik kaplar, poşetler, naylon, plastik şişeler, plastik parçalar, hafif çelikler, gıda ve tahıl ürünleri gibi materyaller, bıçaklar yardımıyla parçalanarak geri dönüşüm işlemine hazırlanır. Bu bıçaklar, güçlü motorlar sayesinde gelen malzemeyi parçalar ve aktarım elemanı olan chute'a doğru yönlendirir. Parçalanmış malzemeler, herhangi bir taşıma aracına ihtiyaç duymadan yer çekimi kullanılarak hummer kırıcıya aktarılabilir. İlk aşama, shredder kısmının tasarlanmasıdır. Piyasada birçok benzeri olan shredder'ların farklı çeşitleri bulunmaktadır. Farklı tasarımlar arasındaki en temel fark, bıçak millerinin sayısı ve kullanılan ekipmanlardır. İncelenen öğütücülerin çoğu ya tek ya da çift şaftlı olarak tasarlanmıştır; ancak bazı büyük tonajlı malzemeler için öğütücüler dört şaftla kullanılabilir, bu da daha yüksek motor gücü sağlar. Birden fazla bıçak şaftına sahip olmanın çeşitli avantajları vardır; örneğin, kesme eylemlerinin sayısı şaft sayısı ile birlikte artar, bu da prosesin hızını artırır. Bununla birlikte, birden fazla şaftın en büyük avantajı, malzemeyi makineden çekme yeteneğinde gözle görülür bir fark yaratmasıdır. Yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda bu sonuca ulaşılmıştır. Hem maliyet hem de istenilen özellikleri sağladığı için çift şaftlı shredder tasarlamaya karar verilmiştir. Shredder kısmı, iki şaft üzerine dizilmiş ve tek bir tahrik gücü kullanılarak çalışan bir yapıdan oluşmaktadır. Bıçaklar, malzemenin atlamasını engellemek adına kanca biçiminde bir forma sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Parçalayıcıdan geçen malzeme, bir aktarım chute'u aracılığıyla çekiçli kırıcıya aktarılır (Oluwatobi I, Damilola A, Olawale O, 2018) (Şekil 3).



Şekil 3. Shredder Ekipmanı

6.2 Hummer Mill Crusher (Çekiçli Kırıcı)

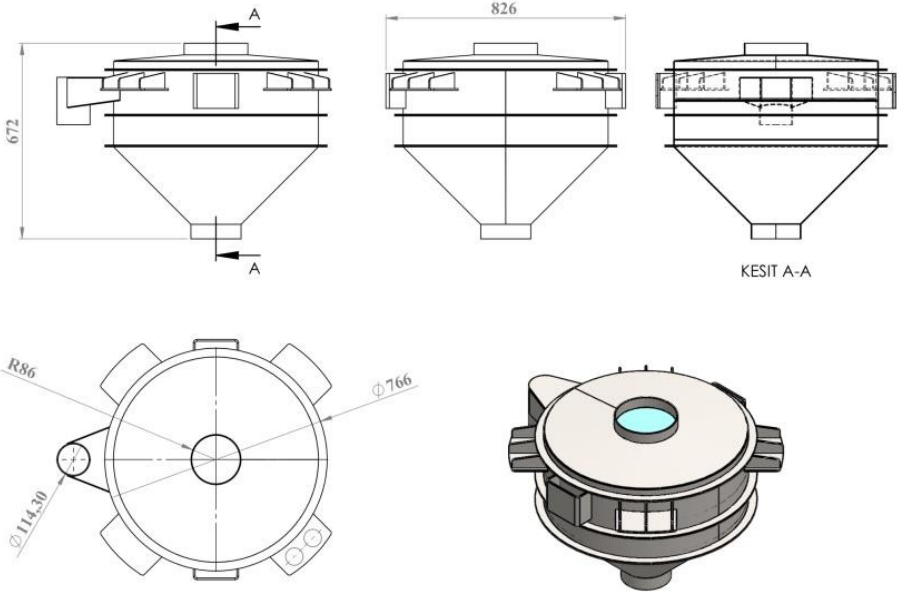
Hızlı bir şekilde dönerek hareket sağlayan ve çekiç adı verilen metal parçaların malzemeye çarpmasıyla kırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Çekiçlerin hızla dönmesi, tanelerin ufalanmasını sağlar. Kırma işleminin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kırıcı alt bölümde delikli bir ızgara veya elek yerleştirilebilir. Bu elek, malzemenin tane boyutunu istenilen ölçüye getirmeye yardımcı olur. Parçalayıcı kısımdan dökülen malzemeler, aktarım chute'undan geçtikten sonra çekiçli kırıcıya dökülmektedir. Çekiçli kırıcı, tek bir shaft üzerinde bulunan dairesel metal plakalar ile çalışır. Bu plakalar, bağlı çekiç parçalarının konumlandırılması için milden geçirilir ve salınım yapmaları amacıyla ara plakalar, burçlar ve diğer parçalar kullanılarak üzerine takılır. Mekanizmayı çalıştırmak için de bir redüktör motor kullanılmaktadır. Çekiçli kırıcının alt kısmında yer alan elek, malzeme çekiçler yardımıyla parçalandıktan sonra elekten geçerek vibrasyonlu elek ekipmanına aktarılmasını sağlar (Annoussamy, M. G., Richard, S., Recous, J., & Guerif, J., 2000) (Şekil 4).



Şekil 4.Çekiçli Kırıcı Ekipmanı

6.3 Vibrasyonlu Elek

Vibrasyonlu elek, dairesel yönde titreşimler yaparak aktarılan malzemeyi çeşitli tane boyutlarına sınıflandırır ve bu malzemenin aktarımını ayırım ekipmanlarına sağlar. Aynı anda birden fazla ürünün ayrıştırma işlemi gerçekleştirilebilir. Vibrasyonlu eleklerin kapasiteleri, eleme yapılacak malzemenin tipi, nem oranı ve yıkanma özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. Vibrasyon motorları, ekipmanın gövde kısmına yay ile montaj edilerek kullanılır. Vibrasyonlu elek kısmı, kademeli bölmelerden oluşacak şekilde tasarlanmıştır ve içinde 1 mm açıklığında delikler bulunan elek bulunmaktadır. Malzeme istenilen tane boyutlarına ulaştığında, döküş kısmına geçerek ön kırma ve eleme işlemi tamamlanmış olur. Ancak, malzeme 1 mm'den büyükse, farklı bir aktarım kısmından dikey helezonlu konveyöre aktarılır ve tekrar işleme alınmak üzere çekiçli kırıcıya yönlendirilir (Şekil 5).

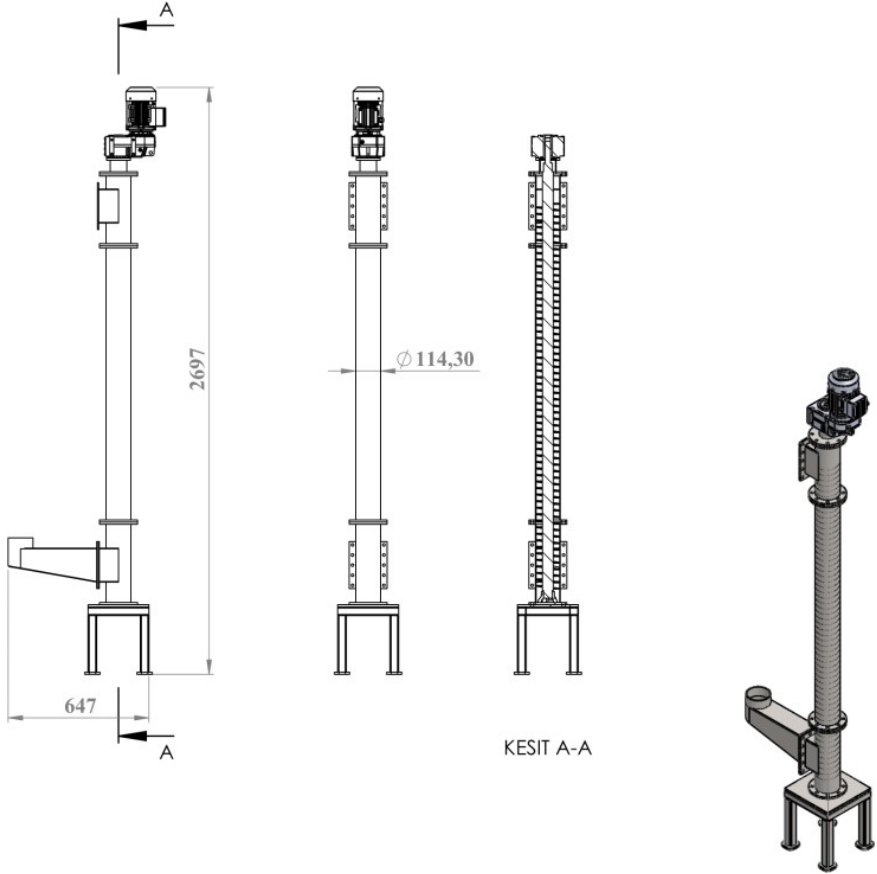


Şekil 5. Vibrasyonlu Elek

6.4 Helezon Konveyör

Helezon konveyör, giriş ve çıkış kısımlarına sahip bir borudan oluşur. Bu borunun içinde, sabitlenmiş yani yataklanmış bir mil üzerinde helezon şeklinde sarılmış iletici sac parçaları bulunmaktadır. Mil, bir ucundan tahrik sistemi ile hareket ettirilir; bu tahrik sistemi, motor, kaplin ve/veya dişli kutusundan oluşabilir. Mekanizmanın içine dökülen plastik malzeme, kendi ağırlığı ve sürtünme etkisi

ile mekanizmanın alt kısmına çöker. Aynı zamanda, dönmeyen dairesel hareket yapan helisel kanatlar sayesinde, doğrusal hareket yaparak ileriye doğru yatay, dikey veya farklı açılarda iletim sağlar. Bu yapı, kırıcıdan dökülen parçaların tekrar geri besleme için aktarım elemanı olarak kullanılmasına olanak tanır. Ayrıca, istenilen kısımlarda dikey iletim için de kullanılabilir. Helezon taşıyıcılar, birçok endüstri alanında (madenlerde, çimento, kireç, şeker ve yem fabrikalarında, plastik, un ve tahıl değirmenlerinde vb.) kısa iletim uzunluklarında kullanılır. Helezon, toz, taneli ve plastik parçalardan oluşan malzemelerin yanı sıra orta tane büyüklüğündeki malzemelerin aktarımını da gerçekleştirebilir. Vibrasyonlu elek kısmında elekten geçmeyen 1 mm'den büyük malzemeler, elek üzerinde bulunan aktarım kısmından dışarı çıkarak eğimli olarak bulunan chute kısmına dökülür. Dikey helezon üzerindeki helisler ve tahrik mekanizması yardımıyla bu malzemeler tekrar çekiçli kırıcı kısmına aktarılır (Şekil 6).



Şekil 6. Helezon Konveyör

7. Sonuç ve Öneriler

Tasarlanan ekipman, piyasada bulunan benzer işlemlere sahip ekipmanlardan farklı olarak ön kırma, öğütme, eleme ve aktarım işlemlerini aynı kompakt yapı altında gerçekleştirmektedir. Ekipmanla ilgili tüm parametreler matematiksel olarak hesaplanmıştır; gerekli veriler, saha ziyaretleri, tecrübe ve talepler doğrultusunda harmanlanarak dizayn edilmiştir. İstenilen tane boyutlarına ulaşmak için elek tasarımı veya ekipmanın içindeki bıçak ve çekiç tasarımlarında değişiklikler yapılabilir. Ekipman tasarımının temel amacı, piyasadaki bu tür ürünlerden farklı olarak shredder ve hammer (çekiçli kırıcı) makinelerini kompakt bir yapı altında birleştirerek kırma ve öğütme işlemlerini aynı ekipman içinde gerçekleştirip zaman, maliyet ve verim açısından kazanç sağlamaktır. Üretilen ekipmandan amaçlanan diğer bir hedef, ürünün 1 mm boyutunda olmasıdır. Yapılan araştırmalar sonucunda, piyasada yer alan kırma ekipmanlarının çeşitli tane boyutlarına, maliyetlere ve parça büyüklüklerine göre birçok çeşidi bulunmaktadır. Ön kırma elemanı olan shredder'ların bıçak sayıları, şaft sayıları ve elek kısımları açısından birbirinden ayrıldığı belirtilmelidir. Ön araştırmalara göre, dikkat edilmesi gereken hususlar arasında bıçakların sayısı, şaft sayısı, bıçakların tasarımı, kırma işlemlerinde bıçak kısımlarının zarar görmesi ve aşınması, malzemenin ön kırma ekipmanı içerisinde atlama yapmaması ve ekipman içinde sıkışma olmaması yer almaktadır. Bu nedenle, tork hesabının, redüktör gücünün hesaplanmasının yanı sıra, bıçak kısımlarının malzemeyi tutma açısından uygun bir tasarıma sahip olması ve elek kısmının tıkanma olmaması için dikkatli bir şekilde tasarlanması önem taşımaktadır. Ön kırma ve çekiçli kırıcının kompakt bir yapıda olabilmesi için tasarımın bu gereksinimlere uygun şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Yapılan tasarımda dört ekipmanın bir yapı altında toplanarak kompakt bir yapı elde edilmiştir. Bu yaklaşım, hem yer tasarrufu sağlamakta hem bakım ve işletme maliyetlerini düşürmekte hem de maddi anlamda kazanç elde etmeyi hedeflemektedir.

Kaynakça

- Annoussamy, M., Richard, G., Recous, J. ve Guerif, J. (2000). Change in mechanical properties of wheat straw due to decomposition and moisture. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(4), 475-479. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.5366>
- Aysun, Ö. (2018). Atık baskılı devre kartlarından değerli metal geri kazanım yöntemlerinin çok ölçütlü karar verme teknikleri ile değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(2), 3-7. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/43970/541295>
- Ayşegül, K. ve Besim, A. (2011). Elektrikli ve elektronik atıkların zararları, yöneti-

- mi ve Türkiye'deki uygulamalarının değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 62(3), 1-12. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iaud/issue/30057/324522>
- Banu, Ç. (2009). *Elektronik atıklardan değerli metal geri kazanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12619/81068>
- Çiğdem, A. (2017). Elektronik atıklar ve çevre sağlığı. *Mühendis ve Makina*, 58(1), 3-5. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/adusbfd/issue/36645/418223>
- Esra, T., Mustafa, Ö. ve Fırat, B. (2019). Baskı devre kartlarındaki değerli metallerin cevher zenginleştirme yöntemleri ile kazanımı. *Mühendis ve Makina*, 60(4), 4-7. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/madencilik/issue/51193/666380>
- İlknur, Ş. (2019). Elektrikli ve elektronik eşya atıklarının geri dönüşümü konusunda halkın bilinç düzeyinin ölçülmesi: Sivas ili örneği. *Mühendis ve Makina*, 57(18), 2-6. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/opus/issue/44324/548371>
- Oluwatobi, I., Okunola, O., Damilola, A. ve Oyebade, D. A. (2018). Development of shredding and washing machine for polyethylene terephthalate (PET) bottles pelletizer. *International Journal of Engineering Science and Application*. <https://www.acarindex.com/international-journal-of-engineering-science-and-application/development-of-shredding-and-washing-machine-for-polyethylene-terephthalate-pet-bottles-pelletizer-1159866>
- Tezcan, Ş. (2021). *Makine Elemanları*. İstanbul: Seçkin Yayıncılık, s. 48-102.



A QUALITATIVE COMPARISON OF DIMENSIONAL DEVIATION OF LASER POWDER BED FUSION PROCESSED MULTI MORPHOLOGY LATTICE STRUCTURES BASED ON THERMOMECHANICAL SIMULATIONS

Orhan GÜLCAN^{1*}, Kadir GÜNAYDIN², Ugur SIMSEK³, Cemal Efe GAYIR⁴

¹ General Electric Aerospace, Gebze, Kocaeli
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6688-2662>

² General Electric Aerospace, Gebze, Kocaeli
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-3045-130X>

³ General Electric Aerospace, Gebze, Kocaeli
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4405-5420>

⁴ Vibrations and Acoustics Laboratory, Ozyegin University, Istanbul
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-0748-3055>

Keywords

Fusion method, multi morphology, lattice structure, dimensional deviation, thermomechanical simulation

Abstract

Multi morphology lattices are composite lattice structures formed by different types of lattice structures in different configurations based on engineering application needs. These types of lattices can be manufactured with additive manufacturing modalities, specifically laser powder bed fusion process. However, due to the high cost and time spent on manufacturing these components, it is necessary to predict the properties of manufactured parts before build with numerical methods. This study focused on prediction of dimensional deviation of laser powder bed fusion produced multi morphology lattice structures composed of Schoen Gyroid, Schwarz Diamond, Schwarz Primitive, Schoen FRD and Neovius topologies via thermomechanical simulations qualitatively. Since the comparisons were made based on numerical study results, only qualitative assessments were performed. Among multi morphology lattices investigated in the present study, Schoen FRD topology at the center and Schwarz Primitive topology at the outer region showed the lowest deviations and Schoen FRD topology at the center and Schwarz Diamond topology at the outer region showed the highest deviations. It was also shown that adding Schoen FRD or Schwarz Primitive topologies at the outer region reduces the max. deviations, and Schoen Gyroid or Schwarz Diamond topologies increases the max. deviations.

* orhan.gulcan@ge.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1418560

LAZER TOZ YATAĞI FÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ ÇOKLU MORFOLOJİ KAFES YAPILARININ BOYUTSAL SAPMASININ TERMOMEKANİK SİMÜLASYONLARA BAĞLI NİTELİKSEL BİR KARŞILAŞTIRMASI

Anahtar Kelimeler

Öz

Füzyon yöntemi, çoklu morfoloji, kafes yapısı, boyutsal sapma, termomekanik simülasyon

Çoklu morfoloji kafes yapılar, mühendislik uygulama ihtiyaçlarına göre farklı konfigürasyonlardaki farklı tipteki kafes yapılarının oluşturduğu kompozit kafes yapılarıdır. Bu tip kafesler, başta lazer toz yatağı füzyon prosesi olmak üzere, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilebilir. Ancak bu bileşenlerin imalatında harcanan yüksek maliyet ve zaman nedeniyle, üretilen parçaların özelliklerinin imalattan önce sayısal yöntemlerle tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, lazer toz yatağı füzyon prosesi ile üretilen Schoen Gyroid, Schwarz Diamond, Schwarz Primitive, Schoen FRD ve Neovius topolojilerinden oluşan çoklu morfoloji kafes yapılarının boyutsal sapmasının termomekanik simülasyonlar yoluyla niteliksel olarak tahmin edilmesine odaklanmıştır. Karşılaştırmalar sayısal çalışma sonuçlarına göre yapıldığından sadece niteliksel değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmada incelenen çoklu morfoloji kafes yapılar arasında, merkezde Schoen FRD topolojisi ve dış bölgede Schwarz Primitive topolojisi olan yapı en düşük sapmaları gösterirken, merkezde Schoen FRD topolojisi ve dış bölgede Schwarz Diamond topolojisi olan yapı en yüksek sapmaları göstermiştir. Ayrıca dış bölgeye Schoen FRD veya Schwarz Primitive topolojilerinin eklenmesinin azami sapmaları azalttığı, Schoen Gyroid veya Schwarz Diamond topolojilerinin eklenmesinin ise azami sapmaları arttırdığı gösterilmiştir.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 12.01.2024

Submission Date : 12.01.2024

Kabul Tarihi : 14.08.2024

Accepted Date : 14.08.2024

1. Introduction

Triply periodic minimal surface (TPMS) lattice structures are one of a kind structures which can be modelled by mathematical expressions and contain unit cells with periodic and regular arrangements (Yin, Zhang, Zhu, Meng, Liu and Wen, 2023). Due to their high energy absorption, specific strength, acoustic and thermal behaviors, these structures are nowadays used in different industrial applications (Ataollahi, 2023). Schoen Gyroid, Schwarz Diamond, Schwarz Primitive, Schoen FRD and Neovius topologies (Figure 1) are types of TPMS structures which show different mechanical behaviors under axial loading conditions. Schwarz Primitive structures show stretch-dominated, and Schoen Gyroid and Schwarz Diamond structures show bending-dominated behavior under axial loadings (Gülcan, Simsek, Cokgunlu, Özdemir, Şendur and Yapici, 2022). Therefore, based on the need for related industrial applications, one of these geometries can be used. However, in applications where multiple loading conditions are effective, a combination of these lattices, called multi morphology lattices, needs to be used (Ma, Song, Lan and Ma, 2020). Due to the improved techniques in computer aided design software, different combinations of lattices can be modelled (Yang, Tian and Zhang, 2015). The manufacturing of these multi morphology lattices can be costly and time consuming or sometimes impossible, but due to the advancements in different additive manufacturing (AM) modalities, it is now easier to produce these parts from different material alternatives (Maconachie, Leary, Lozanovski, Zhang, Qian, Faruque and Brandt, 2019).

In scientific literature, different TPMS based multi morphology lattices were used in terms of enhancing the mechanical properties of the related application. Al-Ketan, Lee, Rowshan and Abu Al-Rub's (2020) experimental and numerical study revealed that multi-morphology lattices have different deformation mechanisms under compressive loading than conventional TPMS lattices. Xu, Mendola, Razavi and Bagherifard. (2023) investigated the mechanical properties of multi morphology lattices from Schoen Gyroid and Schwarz Primitive structures in different directions and stated that the arrangement of lattices has considerable effect on the final mechanical properties. Xi, Zhou, Zhang, Huang and Xiao (2023) designed multi morphology lattices from Schoen Gyroid, Schwarz Primitive and Neovius structures and based on experimental and numerical results, they stated that multi morphology lattices have multi-level energy absorption and multi-stage yield behavior when compared with conventional TPMS lattices. Novak, Al-Ketan, Borovinšek, Krstulović-Opara, Rowshan, Vesenjajk and Ren (2021) investigated the mechanical properties of multi morphology lattices composed of Schoen Gyroid and Schwarz Diamond lattices in longitudinal and radial directions. They stated that under compressive loading, progressive characteristics can be obtained for longitudinally arranged lattices and constant character-

ristic can be obtained for radially arranged lattices in plateau region. Ozdemir, Simsek, Kiziltas, Gayir, Celik and Sendur's (2023) experimental study revealed that multi morphology lattices have higher stiffness than Schwarz Diamond or Schwarz Primitive single lattice morphologies.

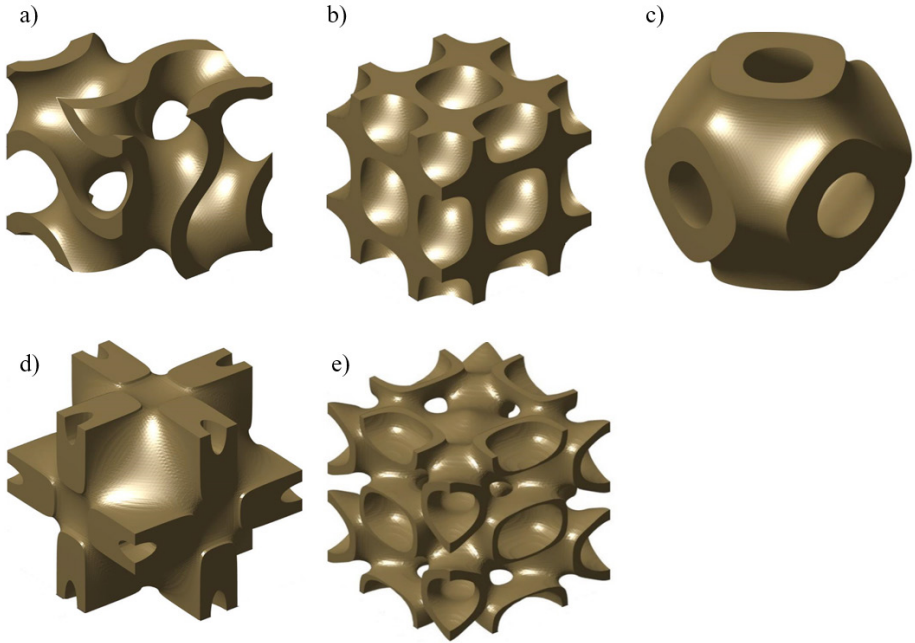


Figure 1. a) Schoen Gyroid, b) Schwarz Diamond, c) Schwarz Primitive, d) Neovius, e) Schoen FRD

Laser powder bed fusion (LPBF) is one of the AM processes where metal powders are deposited on a build platform layer by layer and selectively melted by using laser energy. When one layer is melted according to CAD geometry, build platform is lowered with an amount of layer thickness, then new metal powder layer is deposited onto the previous one and this process continues until the part is fully built (Sefene, 2022). LPBF method enables the manufacturing of multi morphology lattices however it has some drawbacks one of which is the high dimensional deviation during manufacturing due to differences in the powder particle size and the heat transfer from the melt pool to the surrounding powder (Bartolomeu, Dourado, Pereira, Alves, Miranda and Silva, 2020), adhesion of the powder to the surface due to the heat transfer between the powder and the solid part (Bartolomeu, Fonseca, Peixinho, Alves, Gasik, Silva and Miranda, 2019; Ran, Yang, Hu, Shen, Yu, Xiang and Cai, 2018; Sing, Miao, Wiria and Yeong, 2016; Wang,

Wu, Bai, Li, Yang and Song 2017), stair step effect (Maconachie et al., 2019), conversion from CAD file to stl file (Calignano, 2018).

As can be seen from the existing literature, most of the studies related with AM or specifically LPBF manufactured multi morphology lattices focuses on their mechanical properties, not their dimensional deviations. To address this issue, in the present study, the main focus is dimensional deviation prediction of these type of lattices before LPBF built while obtaining the optimum mechanical properties based on the application needs. LPBF manufacturing and testing of multi morphology lattice structures is a costly and time-consuming process. To eliminate this, thermal and mechanical simulation based finite element modelling, or thermomechanical modelling (Denlinger, Gouge, Irwin and Michaleris, 2017) is used in the present study.

The rest of the paper is organized as follows. Lattice geometries, design of experiment, thermomechanical simulation details are explained in Section 2. The findings are presented in Section 3 and detailed discussions were also given by comparing the multi morphology lattices with conventional TPMS lattices. The summary and main conclusions were presented in the Conclusion section.

2. Materials and Methods

In this section, specimen geometry, design of experiment and thermomechanical simulation details are given. Research and publication ethics were complied in the present study.

2.1 Specimen geometry and design of experiment preparation

TPMS lattice geometries were modelled with our in-house developed software. The general 2D view of multi morphology lattices is shown in Figure 2. In region 1 and region 2, different types of TPMS lattices were used. All lattices have 6 mm unit cell size, 25 % volume fraction. The outer dimensions of region 1 and region 2 are 18 mm and 36 mm, respectively. Therefore, 3 and 6 unit cells were used in region 1 and region 2, respectively. By selecting these parameters, the min. wall thickness came out to be 0.5 mm. Schoen Gyroid, Schwarz Diamond, Schwarz Primitive, Schoen FRD and Neovius lattices were used in region 1 and region 2. Therefore, a total of 25 different specimens were designed. Section view of some of the multi morphology lattices are shown in Figure 3. The design of experiment is shown in Table 1.

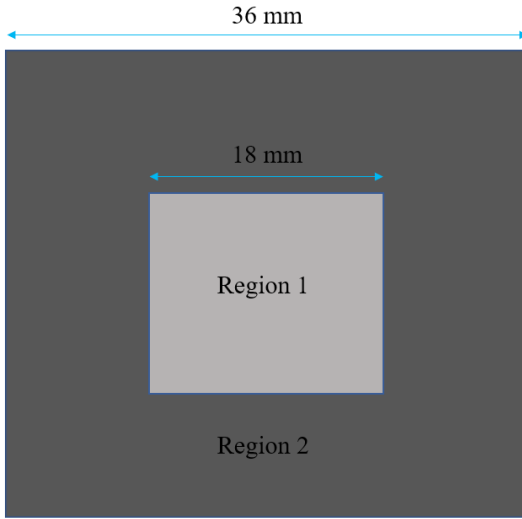


Figure 2. The Specimen Geometry and General Dimensions

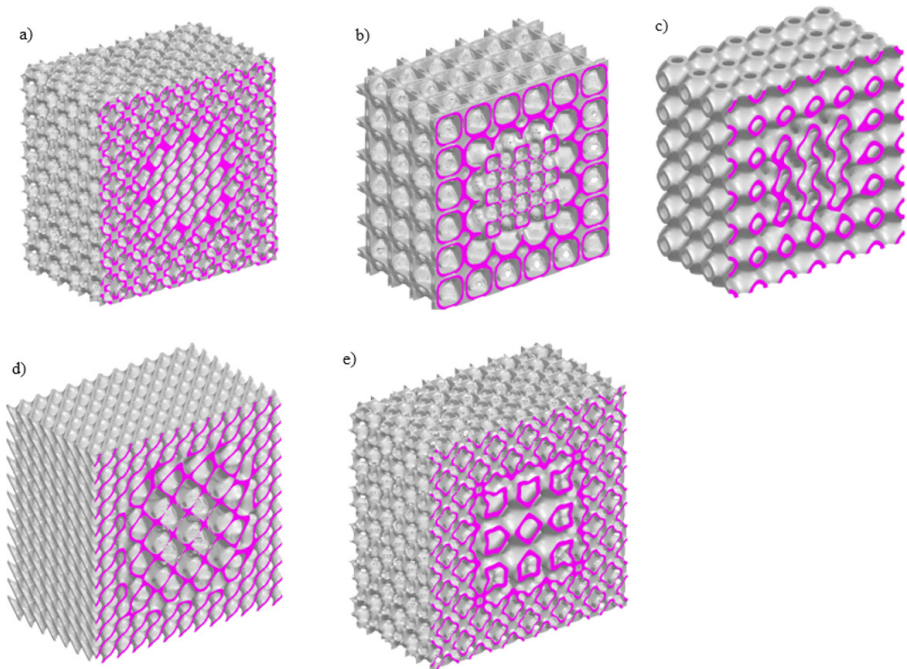


Figure 3. Multi Morphology Lattices with a) Schwarz Diamond - Schoen FRD, b) Schoen FRD - Neovius, c) Schoen Gyroid - Schwarz Primitive, d) Neovius - Schwarz Diamond, e) Schwarz Primitive - Schoen FRD

2.2 Thermomechanical simulation and mesh convergence study

Due to the high energy input from the laser to the powder bed, a very rapid and high heating is observed during melting phase. If a new powder layer is spread onto the previous one, then rapid cooling and solidification are observed. This rapid heating and cooling cycle results in residual stress formation in the part. These residual stresses may cause part distortion or cracks in the final geometry (Fergani, Berto, Welo and Liang, 2017). Trial and error printing can be used to mitigate these issues. However, these experimental approaches are time consuming and expensive. Therefore, thermomechanical simulations can be used to predict these residual stresses and final distortion and/or cracks before print which can mitigate the cost and time spent for iterative manufacturing processes (Denlinger, 2015).

In the present study, Simufact Additive 4.1 commercial software was used for thermomechanical numerical analysis of the LPBF process. Simufact Material library and CoCrMo alloy powder was used during simulation. CoCrMo material was selected in this study because it has outstanding toughness, corrosion resistance, high strength and wear resistance characteristics and used in different industrial applications (Gülcan et al., 2022).

In thermomechanical simulations, it is important that meshes need to capture fine geometrical details in the part. Meshes with very small size are good at prediction with high accuracy. However, in this case, computational time would be higher. Therefore, a mesh convergence study was performed by considering prediction accuracy and computational time. Specimen 1 and 5 different mesh sizes (0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3 and 0.2 mm) were evaluated. Dimensional deviation vs mesh size is shown in Figure 4. It is clear that after 0.3 mm mesh size, the displacement value converges to a constant value. Therefore, rest of the simulations were performed by selecting 0.3 mm mesh size. Each simulation took 15 hours to complete. Meshes for one of the specimens (specimen 3) are shown in Figure 5.

Table 1. Design of Experiment Used in the Present Study

Specimen no	Geometry used in region 1	Geometry used in region 2
1	Schoen Gyroid	Schoen Gyroid
2	Schoen Gyroid	Schwarz Diamond
3	Schoen Gyroid	Schwarz Primitive
4	Schoen Gyroid	Neovius
5	Schoen Gyroid	Schoen FRD
6	Schwarz Diamond	Schwarz Diamond

7	Schwarz Diamond	Schoen Gyroid
8	Schwarz Diamond	Schwarz Primitive
9	Schwarz Diamond	Neovius
10	Schwarz Diamond	Schoen FRD
11	Schwarz Primitive	Schwarz Primitive
12	Schwarz Primitive	Schoen Gyroid
13	Schwarz Primitive	Schwarz Diamond
14	Schwarz Primitive	Neovius
15	Schwarz Primitive	Schoen FRD
16	Neovius	Neovius
17	Neovius	Schoen Gyroid
18	Neovius	Schwarz Diamond
19	Neovius	Schwarz Primitive
20	Neovius	Schoen FRD
21	Schoen FRD	Schoen FRD
22	Schoen FRD	Schoen Gyroid
23	Schoen FRD	Schwarz Diamond
24	Schoen FRD	Schwarz Primitive
25	Schoen FRD	Neovius

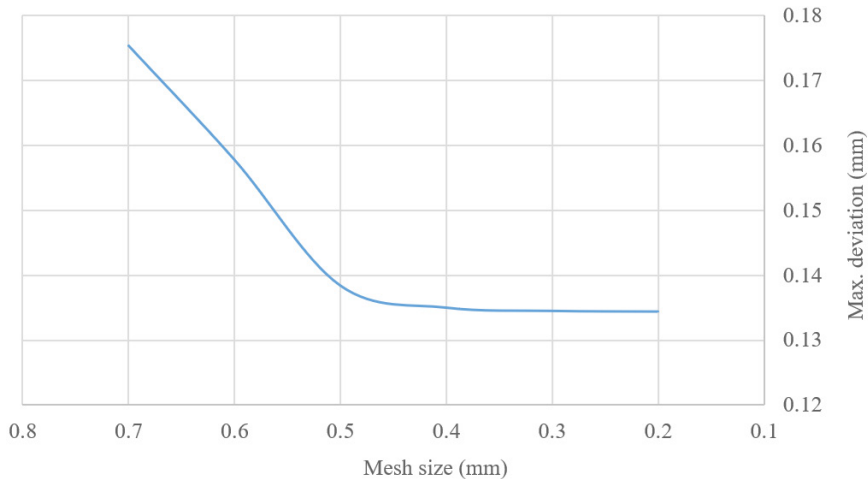


Figure 4. Mesh Convergence Study

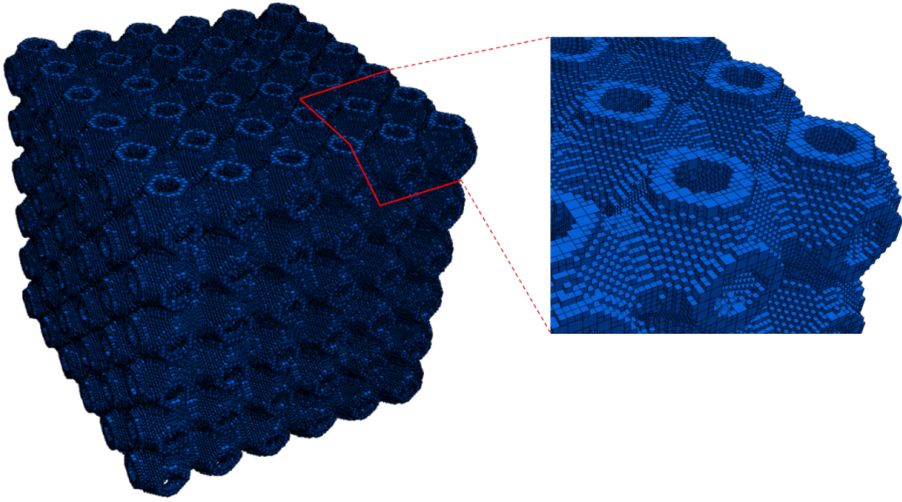


Figure 5. Meshes Applied to Specimen 3.

3. Results and Discussions

3.1 Single TPMS lattices morphologies

The max. deviations for different single TPMS lattices morphologies are shown in Figure 6. It is clear that Schoen FRD geometry showed the lowest (0.138 mm) and Schwarz Diamond showed the highest (0.281 mm) max. deviations. The different dimensional deviation results can be attributed to the different cross sectional areas of these lattices. Different cross sectional areas result in different energy input to these areas to melt the related cross section via laser energy which, at the end, causes different thermal deviations between successive layers and finally different dimensional deviations (Gülcan, Simsek, Özdemir, Günaydın and Tekoğlu 2024).

3.2 Multi morphology TPMS lattices with Schoen Gyroid at the center

Max. deviations for multi morphology TPMS lattices with Schoen Gyroid at the center are shown in Figure 7. For this combination (Schoen Gyroid at the center), the highest (0.251 mm) and the lowest (0.156 mm) max. dimensional deviations were observed when outer geometry is Schwarz Diamond and Schoen FRD, respectively. It is clear that when compared with single Schoen Gyroid specimens, multi morphology lattices with Schoen Gyroid at the center have higher max. deviations when Schwarz Diamond or Neovius topologies are added to the outer surfaces and have lower max. deviations when Schoen FRD or Schwarz Primitive topologies are added to the outer surfaces.

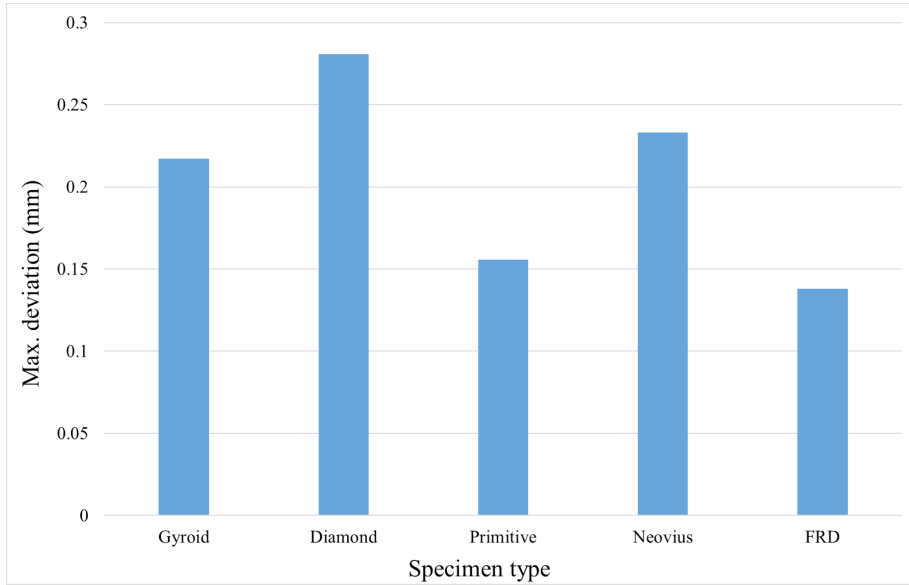


Figure 6. Max. Deviations for Different Single TPMS Lattices Morphologies

3.3 Multi morphology TPMS lattices with Schwarz Diamond at the center

Max. deviations for multi morphology TPMS lattices with Schwarz Diamond at the center are shown in Figure 8. It is clear that multi morphology lattice with Schwarz Primitive at the outer region and Schwarz Diamond at the center showed the lowest max. deviation (0.167 mm). On the other hand, single morphology lattice with Schwarz Diamond both at the center and at the outer region showed the highest max. deviation (0.281 mm). It can be concluded that in a multi morphology lattice with Schwarz Diamond at the center, all the TPMS topologies other than Schwarz Diamond at the outer region will reduce the max. deviation. Therefore, to obtain higher quality multi morphology parts with less deviation from the original geometry in LPBF process, Schwarz Diamond both at the center and at the outer region should not be preferred along with consideration of mechanical properties of printed parts for the related application.

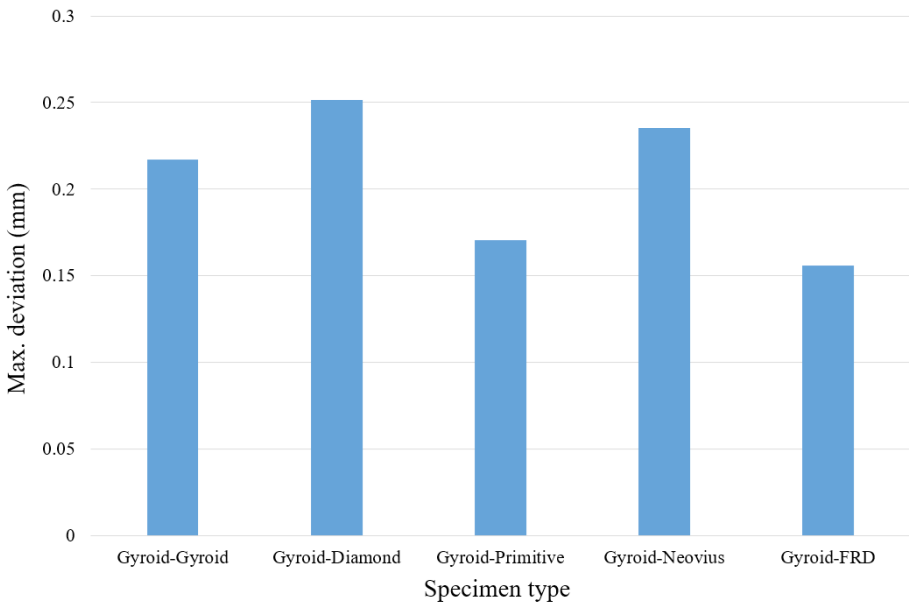


Figure 7. Max. Deviations for Multi Morphology TPMS Lattices with Schoen Gyroid at the Center

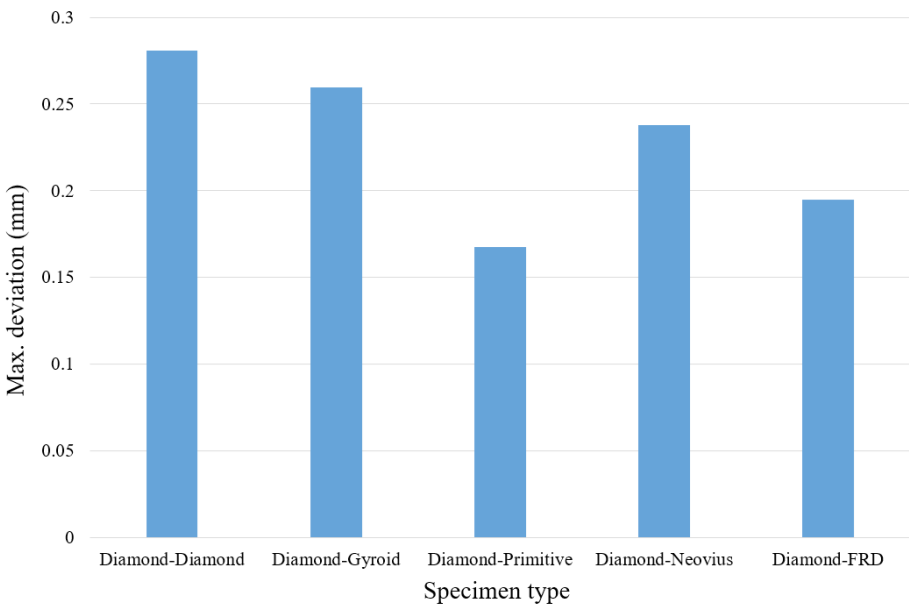


Figure 8. Max. Deviations for Multi Morphology TPMS Lattices with Schwarz Diamond at the Center

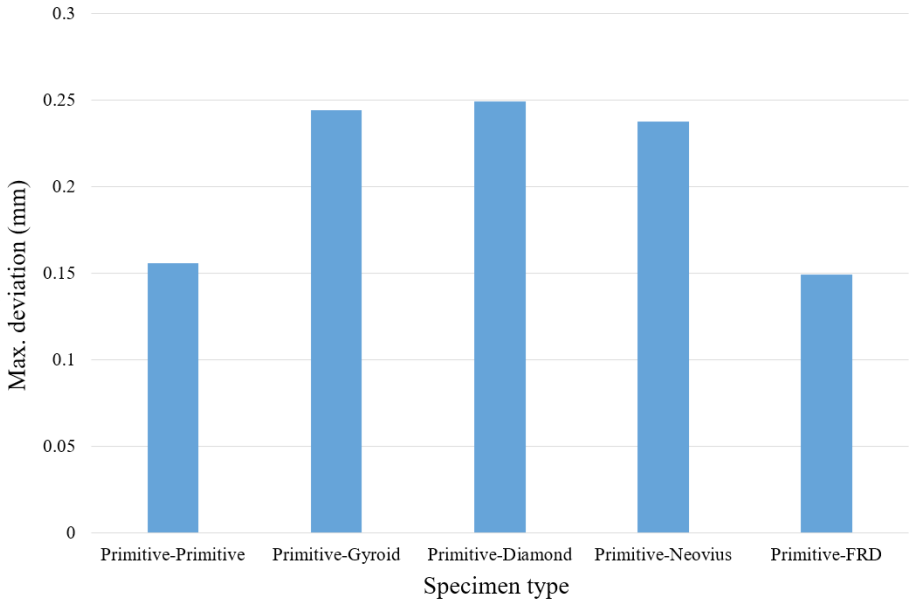


Figure 9. Max. Deviations for Multi Morphology TPMS Lattices with Schwarz Primitive at the Center

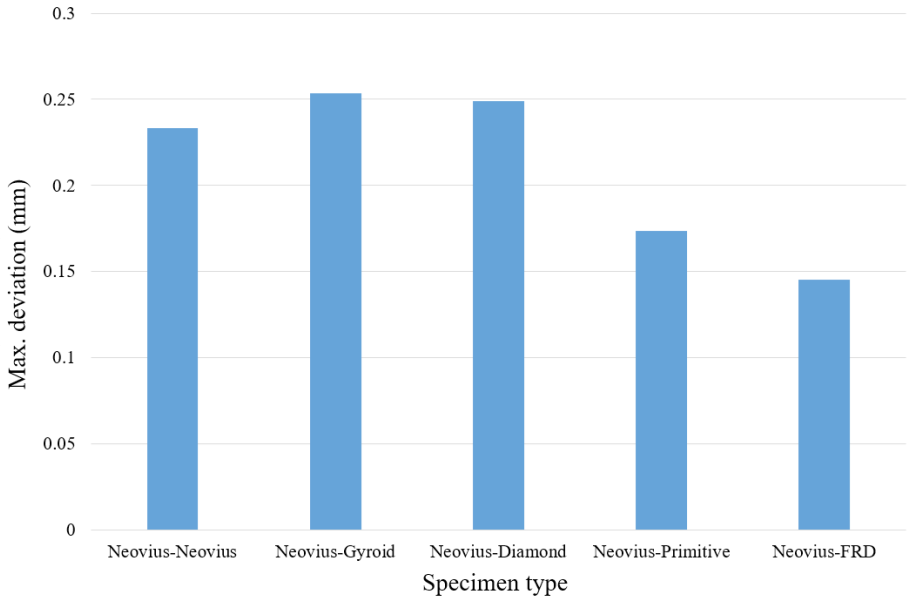


Figure 10. Max. Deviations for Multi Morphology TPMS Lattices with Neovius at the Center

3.6 Multi morphology TPMS lattices with Schoen FRD at the center

Max. deviations for multi morphology TPMS lattices with Schoen FRD at the center are shown in Figure 11. For this combination (Schoen FRD at the center), the highest (0.290 mm) and the lowest (0.138 mm) max. dimensional deviations were observed when outer geometry is Schwarz Diamond and Schoen FRD, respectively. It is clear that when compared with single Schoen FRD specimens, multi morphology lattices with Schoen FRD at the center have higher max. deviations when all the other TPMS topologies are added to the outer surfaces. Therefore, it can be concluded that Schoen FRD topology should be preferred both at the center and at the outer region as much as possible to obtain the lowest amount of deviations considering the related application needs.

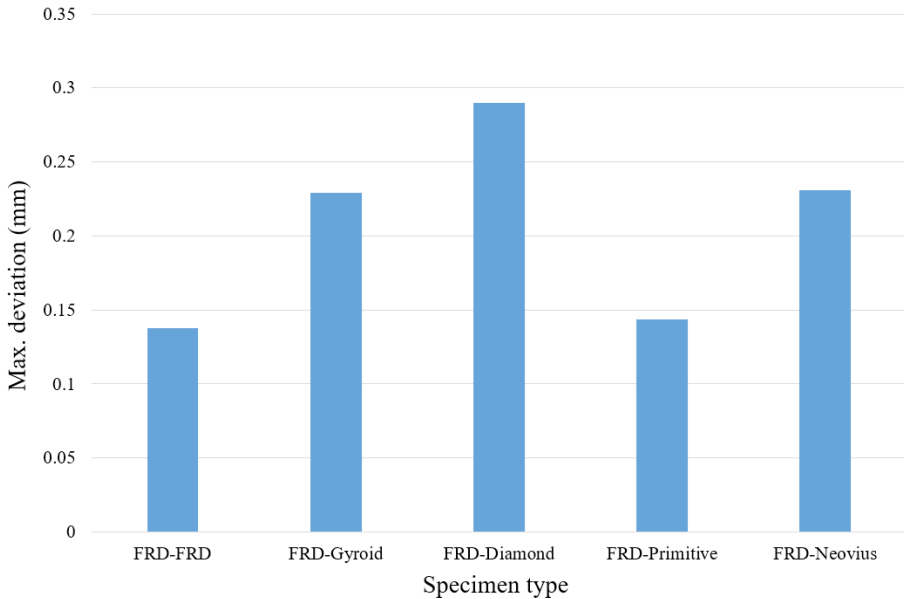


Figure 11. Max. Deviations for Multi Morphology TPMS Lattices with Schoen FRD at the Center

4. Conclusions

In the present study, dimensional deviation of multi morphology lattices produced by LPBF method were investigated by using thermomechanical simulations. A total of 25 different multi morphology lattices with two regions were designed and dimensional deviation of these lattices after LPBF process were evaluated and compared. Since the comparisons were made based on numerical study

results, only qualitative assessments were performed. The quantitative assessments based on experimental data are left to a future work. Based on the numerical findings, the below main conclusions can be drawn:

In terms of single morphology lattices, Schoen FRD geometry outperformed by showing the lowest deviation (0.138 mm). On the other hand, Schwarz Diamond showed the worst deviation performance (0.281).

Among multi morphology lattices with different lattice topologies at the two regions, Schoen FRD topology at the center and Schwarz Primitive topology at the outer region showed the lowest deviations (0.143 mm). On the other hand, Schoen FRD topology at the center and Schwarz Diamond topology at the outer region showed the highest deviations (0.290 mm).

In general, it was observed that whatever the TPMS topology is at the center, adding Schoen FRD or Schwarz Primitive topologies at the outer region reduces the max. deviations.

In general, it was observed that whatever the TPMS topology is at the center, adding Schoen Gyroid or Schwarz Diamond topologies at the outer region increases the max. deviations.

This study considered only the dimensional deviation of multi morphology lattices. This is an important issue for these types of lattices during industrial applications. However, the mechanical behavior of these lattices is also very important. Therefore, future studies will focus on compression testing and mechanical behavior characterization of multi morphology lattices.

References

- Al-Ketan, O., Lee, D., Rowshan, R., & Abu Al-Rub, R. K. (2020). Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 102, 103520. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103520>.
- Ataollahi, S. (2023). A review on additive manufacturing of lattice structures in tissue engineering. *Bioprinting*, 35, e00304. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00304>.
- Bartolomeu, F., Dourado, N., Pereira, F., Alves, N., Miranda, G., & Silva, F. S. (2020). Additive manufactured porous biomaterials targeting orthopedic implants: A suitable combination of mechanical, physical and topological properties. *Materials Science and Engineering: C*, 107, 110342. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110342>.
- Bartolomeu, F., Fonseca, J., Peixinho, N., Alves, N., Gasik, M., Silva, F. S., & Miranda,

- G. (2019). Predicting the output dimensions, porosity and elastic modulus of additive manufactured biomaterial structures targeting orthopedic implants. *Journal of Mechanical Behaviors of Biomedical Materials*, 99, 104-117. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.07.023>.
- Calignano, F. (2018). Investigation of the accuracy and roughness in the laser powder bed fusion process. *Virtual and Physical Prototyping*, 13 (2), 97-104. Doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1426368>.
- Denlinger, E. R. (2015). *Thermo-mechanical model development and experimental validation for metallic parts in additive manufacturing*. (Doctoral Thesis). The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA.
- Denlinger, E. R., Gouge, M., Irwin, J., & Michaleris, P. (2017). Thermomechanical model development and in situ experimental validation of the Laser Powder-Bed Fusion process. *Additive Manufacturing*, 16, 73-80. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.001>.
- Fergani, O., Berto, F., Welo, T., & Liang, S. Y. (2017). Analytical modelling of residual stress in additive manufacturing. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 40 (6), 971-978. Doi: <https://doi.org/10.1111/ffe.12560>.
- Gülcan, O., Simsek, U., Cokgunlu, O., Özdemir, M., Şendur, P., & Yapici, G. G. (2022). Effect of build parameters on the compressive behavior of additive manufactured CoCrMo lattice parts based on experimental design. *Metals*, 12, 1104. Doi: <https://doi.org/10.3390/met12071104>.
- Gülcan, O., Simsek, U., Özdemir, M., Günaydın, K., & Tekoğlu, E. (2024). *The effect of build parameters on distortion, dimensional deviation and surface roughness of laser powder bed fusion built lattice structures*. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 39 (1), 101-112. Doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1168768>.
- Ma, S., Song, K., Lan, J., & Ma, L. (2020). Biological and mechanical property analysis for designed heterogeneous porous scaffolds based on the refined TPMS. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 107, 103727. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103727>.
- Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., & Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 183, 108137. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>.
- Novak, N., Al-Ketan, O., Borovinšek, M., Krstulović-Opara, L., Rowshan, R., Vesenjak, M., & Ren, Z. (2021). Development of novel hybrid TPMS cellular lattices and their mechanical characterisation. *Journal of Materials Re-*

- search and Technology*, 15, 1318-1329. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.092>.
- Ozdemir, M., Simsek, U., Kiziltas, G., Gayir, C. E., Celik, A., & Sendur, P. (2023). A novel design framework for generating functionally graded multi-morphology lattices via hybrid optimization and blending methods. *Additive Manufacturing*, 70, 103560. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103560>.
- Ran, Q., Yang, W., Hu, Y., Shen, X., Yu, Y., Xiang, Y., & Cai, K. (2018). Osteogenesis of 3D printed porous Ti6Al4V implants with different pore sizes. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 84, 1-11. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.04.010>.
- Sefene, E. M. (2022). State-of-the-art selective laser melting process: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 250-274. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.002>.
- Sing, S. L., Miao, Y., Wiria, F. E., & Yeong, W. Y. (2016). Manufacturability and mechanical testing considerations of metallic scaffolds fabricated using selective laser melting: a review. *Biomedical Science and Engineering*, 2 (11), 18-24. Doi: <https://doi.org/10.4081/bse.2016.11>.
- Wang, D., Wu, S., Bai, Y., Lin, H., Yang, Y., & Song, C. (2017). Characteristics of typical geometrical features shaped by selective laser melting. *Journal of Laser Applications*, 29, 022007. Doi: <https://doi.org/10.2351/1.4980164>.
- Xi, H., Zhou, Z., Zhang, H., Huang, S., & Xiao, H. (2023). Multi-morphology TPMS structures with multi-stage yield stress platform and multi-level energy absorption: Design, manufacturing, and mechanical properties. *Engineering Structures*, 294, 116733. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116733>.
- Xu, Z., Mendola, I. L., Razavi, N., & Bagherifard, S. (2023). Additive manufactured Triply Periodical Minimal Surface lattice structures with modulated hybrid topology. *Engineering Structures*, 289, 116249. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116249>.
- Yang, N., Tian, Y., & Zhang, D. (2015). Novel real function based method to construct heterogeneous porous scaffolds and additive manufacturing for use in medical engineering. *Medical Engineering & Physics*, 37 (11), 1037-1046. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.08.006>.
- Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., & Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304 (1), 116397. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116397>.



DÜZCE İLİ HAVA ŞARTLARINDA BİR HANEDE FOTOVOLTAİK PİL KULLANIMININ ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ VE EKSERJİ ANALİZİ

İrem DÜZDAR^{*1}, İlay Özge ERYILMAZ²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Düzce,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-7642-8121>

² Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Düzce,
ORCID No : <http://orcid.org/0009-0000-9743-2237>

Anahtar Kelimeler

Öz

Güneş enerjisi, enerji verimliliği, güneş paneli, fotovoltaik pil, hanede verimlilik, ekserji analizi

Nüfusun ve sanayileşmenin artması günümüzde enerji ihtiyacına olan önemi arttırmaktadır. Enerji, günümüzde vazgeçilmez bir zorunluluk olduğu için enerji verimliliği ve enerji tasarrufunu da zorunluluk olarak ifade edilebilir. Güneş enerjisi, sürdürülebilir ve çevre dostu olması açısından hayatımızda bulunmaktadır. Güneş panellerinin montajı ile evlerin çatıları enerji santrallerine dönüşmektedir. Kurulan bu enerji sistemi ile Güneş'ten enerji sağlanırken aynı zamanda elektrik üretimi ile şebekeden alınacak elektrik enerjisinden tasarruf edilecektir. Böylece ihtiyaç fazlası elektriği şebeke şirketlerine satarak kazanç elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, Düzce ili hava şartlarında bir hanede hangi sınıfta ve güçte güneş paneli kullanılmalı, kullanıldığı takdirde enerji verimliliği ne durumda olur sorularına cevap bulmak için enerji ve ekserji analiziyle iki farklı senaryo incelenerek sonuçlar verilmiştir. Evin bulunduğu alan herhangi bir grid dağıtım bölgesinde ise on-grid sistemi, grid dağılımı dışındaki alan kullanılıyorsa off-grid sistemi kullanılır. Bu çalışmada şebekeye bağlı sistem ve şebekeden bağımsız sistem olmak üzere iki farklı senaryo incelenecektir. Birinci senaryo sonucunda sistemdeki kullanılabilirlik olarak elektriksel ekserji değeri 505,347 W, ikinci senaryoda ise sistemdeki kullanılabilirlik olarak elektriksel ekserji değeri 479,02 W olmaktadır.

* iremduzdar@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1423815

EFFECT OF PHOTOVOLTAIC BATTERY USE ON ENERGY EFFICIENCY AND EXERGY ANALYSIS IN A HOUSE IN DÜZCE PROVINCE WEATHER CONDITIONS

Keywords

Solar energy, energy efficiency, solar panel, photovoltaic battery, household efficiency, exergy analysis

Abstract

The increase in population and industrialization increases the importance of energy needs today. Since energy is an indispensable necessity today, energy efficiency and energy saving can also be expressed as a necessity. Solar energy is present in our lives because it is sustainable and environmentally friendly. With the installation of solar panels, the roofs of houses turn into power plants. With this installed energy system, while providing energy from the Sun, it is also possible to save the electrical energy to be taken from the grid through electricity production and to earn profits by selling excess electricity to network companies. In this study, what class and power of solar panel should be used in a household under the weather conditions of Duzce province, and what the energy efficiency will be if used, will be examined through energy and exergy analysis. In this study, two different scenarios were examined with energy and exergy analysis to find answers to the questions of which class and power solar panel should be used in a household under the weather conditions of Düzce province and what the energy efficiency would be if used, and the results were given. If the area where the house is located is in any grid distribution region, the on-grid system is used, and if the area outside the grid distribution is used, the off-grid system is used. In this study, two different scenarios will be examined: a grid-connected system and an off-grid system. As a result of the first scenario, the electrical exergy value as availability in the system is 505.347 W, and in the second scenario, the electrical exergy value as availability in the system is 479.02 W.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 14.02.2024

Kabul Tarihi : 02.10.2024

Research Article

Submission Date : 14.02.2024

Accepted Date : 02.10.2024

Extended Abstract

Introduction/ Background

Renewable energy is obtained from natural resources that are constantly renewed and cannot be exhausted. It is called Renewable Energy because it can be constantly replenished by nature. For example, the sun, a renewable energy source, continues to shine and radiate warmth whether the weather is good or bad. Renewable energy; It is not possible for it to be completed completely due to large production centres such as factories or humanitarian reasons. Since the resources used in energy production are energy resources that can renew themselves in a very rapid time, depletion cannot be mentioned. Solar energy is the radiant energy generated during the fusion phase, which occurs when hydrogen gas is converted into helium gas. Continuous energy can be obtained from sunlight, which is the reflection of this radiant energy onto the earth. Energy obtained from the sun does not cause greenhouse gas emissions, therefore it is a clean energy source. Even a small fraction of the world's solar energy is more than humanity's current use. Solar energy used for home is a system that converts sunlight into electrical energy through solar panels installed on the roof.

Objectives/ Research Purpose

To install a solar panel at home, firstly it must be decided for what purpose it will be installed. It may be requested to reduce carbon emissions, save on electricity bills, or not only save money but also earn financial income. For home panel installation, daily, monthly or annual energy consumption must be determined. At the same time, the area on the roof suitable for placement of the panel should be determined. Radiation data in the area where the house is located should be examined and the data should be kept ready to determine the number of solar panels.

Methods/ Methodology

In this study, which class and power of solar panel should be used in a household under the weather conditions of Düzce province, and what the energy efficiency will be if solar panels are used, will be examined through energy and exergy analysis.

Results/ Findings

For this situation, two different scenarios were examined and the results were given. If the area where the house is located is in any grid distribution region, the on-grid system is used, and if the area outside the grid distribution is used, the off-grid system is used. In this study, two different scenarios, on-grid system and off-grid system, will be examined.

Discussion and Conclusions

As a result of the first scenario, the electrical exergy value as usability in the system is 505,347 W, while in the second scenario, the electrical exergy value as usability in the system is 479,02 W.

1. Giriş

Güneş panellerin kurulumu ile evlerin çatıları enerji üretim merkezlerine dönüştürülmektedir. Bu enerji üretim merkezleri ile güneşten gerekli elektrik enerjisi elde edilmekte, güneş enerjisinden elektrik üretimi ile şebeke hattından temin edilecek elektrik enerjisinden tasarruf edilebilmekte ve ihtiyaç fazlası elektriği şebeke şirketlerine satarak ekstra kazanç elde edilebilmektedir. Yurt dışından ithal edilen enerjiden kaynaklı ülke enerjisinde dışa bağımlılığımız da bu sayede azaltılabilir.

Eve güneş paneli kurulumu yapmak için öncelikle hangi amaç için kurulacağına karar verilmesi gerekmektedir. Karbon salınımını azaltmak, elektrik faturasından tasarruf etmek ya da sadece tasarrufla yetinmeyip maddi gelir elde etmek istenebilir. Eve panel kurulumu için günlük, aylık ya da yıllık enerji tüketimi belirlenmelidir. Aynı zamanda çatıda panel için yerleşime uygun alan belirlenmelidir. Evin bulunduğu bölgede ışınlam verileri incelenerek veriler güneş panel sayısının saptanması için elde hazır tutulmalıdır.

Bu çalışmada düzce ili hava şartlarında bir hanede hangi sınıfta ve hangi güçte güneş paneli kullanılmalı, güneş paneli kullanıldığı takdirde enerji verimliliği ne durumda olur, enerji ve ekserji analiziyle incelenmiştir. Bu durum için farklı 2 senaryo incelenmiş ve sonuçları verilmiştir. Evin bulunduğu bölge herhangi bir şebeke dağıtım bölgesinde ise on-grid sistem, şebeke dağıtım dışında ise off-grid sistem kullanılır. Bu çalışmada on-grid sistem ve off-grid sistem olarak kurulan 2 farklı senaryo incelenecektir.

1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, sürekli yenilenen ve tükenmesi mümkün olmayan doğal kaynaklardan elde edilir. Doğa tarafından sürekli olarak takviye edilebildiği için Yenilenebilir Enerji denilmektedir. Örnek olarak yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş, hava durumu iyi de olsa kötü de olsa parlamaya ve sıcaklık yaymaya devam eder. Yenilenebilir enerjinin; fabrika gibi büyük üretim merkezleri ya da insani sebeplerle tamamen bitmesinin imkânı yoktur. Enerji üretiminde kullanılan kaynaklar kendini çok hızlı bir sürede yenileyebilen enerji kaynakları olduğu için tükenme durumundan bahsedilemez (Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Derneği, 2023).

Güneş enerjisi, hidrojen gazının helyum gazına çevrilmesiyle ortaya çıkan füzyon aşamasında oluşan ışıma enerjisidir. Bu ışıma enerjisinin dünya üzerine aksetmesi olan güneş ışığından devamlılığı olan enerji elde edilebilir. Güneşten elde edilen enerji sera gazı emisyonuna neden olmaz, bu sebeple temiz bir enerji kaynağıdır. Dünyadaki güneş enerjisinin ufak bir bölümü bile insanlığın mevcut kullanımından fazladır. Isıl güneş ve fotovoltaik güneş teknolojileri olarak iki ayrı

teknoloji ile güneş enerjisi elde edilebilir. Isıl güneş teknolojisi ile çalışanlar güneş enerjisinden ısı üretebilir. Oluşan bu ısı suları ısıtmak için kullanılabilceği gibi elektrik üretmek için de kullanılır. Fotovoltaik güneş paneli sistemi ise yarı iletken malzemeyle güneş ışığını elektriğe çevirir (Güngül, Bayraç, Güllü, 2018).

Enerji sorunu, dünyamızın en büyük sorunlarından biri ve sürekli büyümeye devam etmektedir. Artan nüfus ve teknolojinin geldiği son nokta, sürekli daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. İnsanlık, ihtiyacı olan enerjiyi farklı doğal kaynakları çevirerek karşılamaktadır. Şimdilerde enerji ile elde edilebilen kaynaklar içerisinde sürdürülebilir enerji kaynakları varken, aynı zamanda yenilenemez enerji kaynakları da bulunmaktadır (Hayat Burada, 2023).

Yenilenebilir enerji, doğadan elde edilme fırsatı olan kaynaklardan temin edilir. Sanayileşmenin boyutu, zaman geçtikçe daha çok enerji ihtiyacına sebep olmaktadır. Çok tercih edilen kömür, linyit ya da benzin gibi yakıtlar, yenilikçi seçenekler tercih edilmezse çevreye "kirlilik ve zarar" şeklinde tesir etmektedir. Böyle anlarda, alternatif enerji üretimi meydana gelmekte ve canlılar için ciddi bir önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ekonomik açıdan sunduğu pozitif faktörler ve sonsuz kullanım fırsatı sağlaması nedeni ile kurtarıcı görevi görmektedir. Çevre dostu olan bu kaynaklar, bitmeyen kaynaklar olarak bilinir (Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Derneği, 2023).

Yenilenebilir enerji kaynaklarını tercih etmek, dünyamız ve içindeki canlılar için önem arz etmektedir. Oldukça ekonomik yollarla elde edilebilen güneş enerjisi, çevreye zararı dokunmayan yenilenebilir enerji kaynaklarının önünde gelir. Yerleşim yerlerine yakın, tarım için kullanılmayan ve güneşlenme fırsatı çok olan alanlarda kurulan güneş panelleri ile elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Evlerin ısınma ve sıcak su gereksinimleri de çatılara kurulan güneş panelleri ile sağlanır. Yakın zamanda fosil yakıt kullanılan taşıtların yerini de günümüzde popüler olan güneş enerjisi veya benzeri yöntemler ile elektrik enerjisiyle çalışan araçların alması beklenmektedir. Bu durumlar dünyamızdaki kirliliğinin azalmasını büyük oranda etkileyebilecek durumlardır (Timur, 2017).

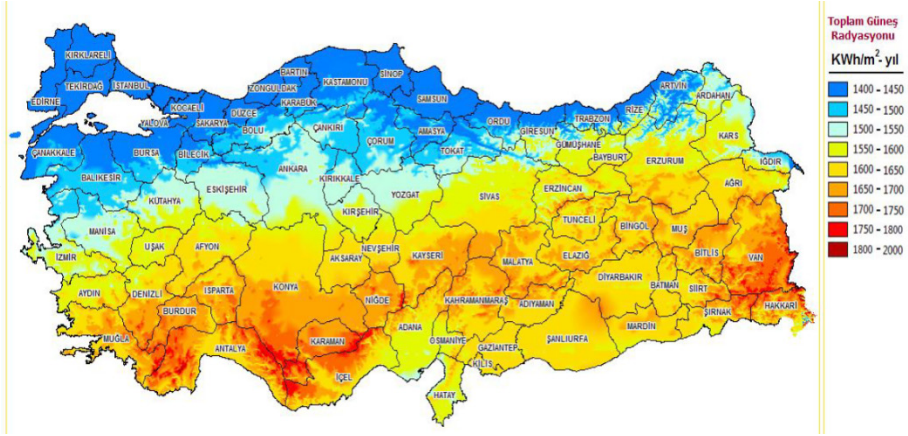
1.2 Güneş Enerjisi ve Fotovoltaik Sistemler

1.2.1 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye coğrafi konumu sebebiyle güneş enerjisi sistemlerine çok elverişlidir. Dünyada ve ülkemizde güneş enerjisinden elektrik üretimi her geçen gün artış göstermektedir. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında kurulumu kolay ve kurulabilecek alan çok olduğundan hızla yayılmaktadır (Öztürk ve Dener, 2022).

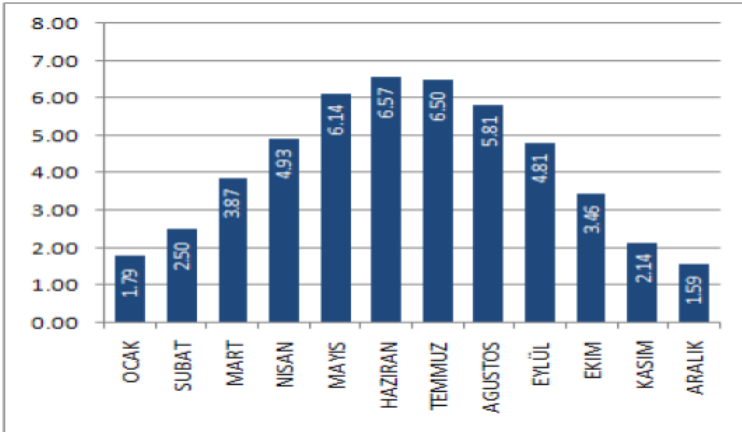
2010 yılında Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası hazırlanmıştır. Bu atlasla göre, Türkiye'nin yaklaşık 56.000 MW gücün-

de potansiyele sahip olduğu ve yıllık ortalama 380 milyar kWh enerji üretilbileceği hesaplanmıştır (Yılmaz, 2012).



Şekil 1. Güneş enerjisi global radyasyon değerleri (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

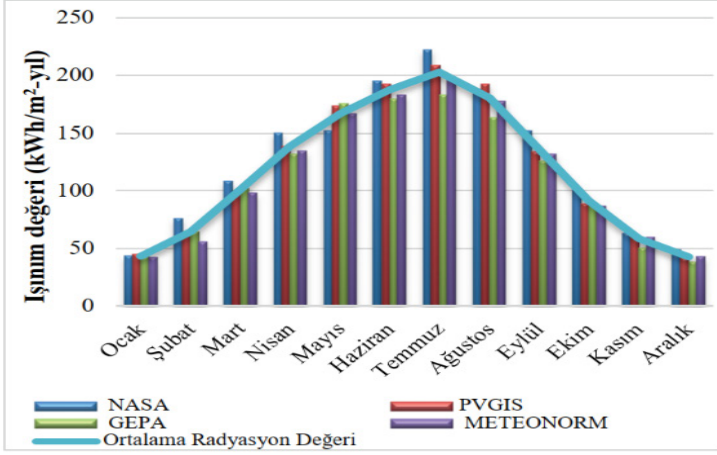
Ülkemizin aylık ortalama günlük global radyasyon değerleri, aylık bazda Şekil 2'de gösterilmiştir. göstermektedir. Haziran ayında global radyasyon değeri en fazladır. Ülkemizde aylık ortalama günlük ısınım şiddetinin 4,18 kWh/m²-gün, yıllık ortalama toplam global radyasyon değerinin ise 1524,18 kWh/m²-yıl olduğu görülmektedir (Öztürk ve Dener, 2022).



Şekil 2. Aylık ortalama günlük global radyasyon - Türkiye (Öztürk ve Dener, 2022).

1.2.2 Düzce İli Güneş Enerji Potansiyeli

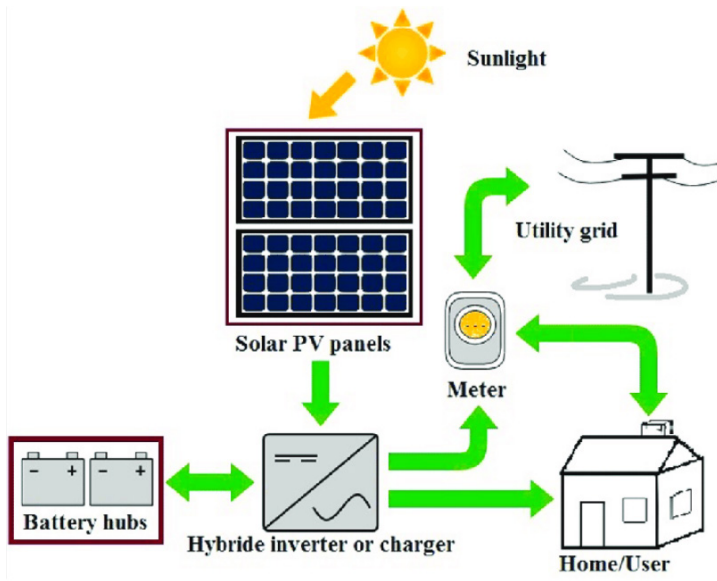
Düzce ilinin ışınım değerleri 1350-1500 kWh/m²-yıl aralığındadır ve Türkiye ortalamasının altında olduğu görülmektedir. Buna rağmen Şekil 3'de verildiği şekilde, değerlendirilen dört veri tabanının ışınım ortalaması 1415,685 kWh/m²-yıl'dır (Yıldız ve Yıldırım, 2020).



Şekil 3. Düzce ilinin ışınım değerleri (Yıldız ve Yıldırım, 2020).

1.2.3 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler, güneşin ışığındaki enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Fotovoltaik sistemler, off-grid sistemler ve on-grid olmak üzere ikiye ayrılır. Off-grid sistemler şebekeden bağımsız, on-grid sistemler şebekeye bağlı sistemlerdir. Günün farklı zamanlarında ve mevsimsel şartlara göre güneş ışınımı farklılık gösterdiğinden panellerden elde edilen güç de farklı olmaktadır. Bu sebeple panellerden üretilen enerji bazen yetersiz bazen de fazla olabilir. Üretilen enerjinin istenilen miktardan fazla olması durumunda fazla enerji akülerde depolanabilir. Üretim yetersiz olduğunda ise akülerde depolanmış enerji kullanılarak sistem devamlı olarak beslenebilir. Mevcut güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için güneş paneli kullanılır. Kurulum başarıyla tamamlandıktan sonra sistem gerekli elektriği üretebilir ve kolaylıkla temin edebilir. Güneş paneli çalışma sisteminin temel şeması Şekil 4'de gösterilmiştir (Al-Mamun vd., 2021). Şekilde görüldüğü gibi bir güneş paneli çalışma sistemi; güneş paneli, şarj kontrol cihazı, batarya, invertör ve amacına uygun yüklerden oluşur (Öztürk ve Dener, 2022).



Şekil 4. Güneş paneli çalışma sistemi şeması (Behura, Kumar, Rajak, Pruncu, Lamberti, 2021).

1.2.4 Fotovoltaik Hücrelerin Çalışma Prensipleri

Güneş ışığındaki enerji fotonlar tarafından taşınır. Fotonlar, panel yüzeyine çarptığında bir kısmı panel tarafından soğurularak enerji elde edilir. Fotovoltaik hücre, güneş ışınlarını emen ve elektrik akımı oluşturan yarı iletken malzemelerden yapılıdır. Hücrenin üst katmanındaki elektronlar güneş enerjisi yardımıyla alt katmana geçer. İki katman arasındaki elektron hareketliliği, elektrik akımının oluşmasını sağlar (Öztürk ve Dener, 2022).

1.2.5 Fotovoltaik Sistemlerin Verimliliğini Etkileyen Faktörler

Panel verimine etki eden birçok faktör vardır. Bu faktörlerin bir kısmı panelin kendisine bağlıken bazı faktörler dış etkenlere bağlıdır. Panelin kendisine bağlı olan faktörler; kullanılan hücrenin tipi ve malzemelerin özellikleri olarak sayılabilir. Üretimden kaynaklı sebepler arasında da oksitlenme, kılcal kırıklar, hücre üzerindeki tellerin temassızlığı gibi durumlar modül verimini etkileyen faktörler arasında yer alır. Sıcaklık, radyasyon miktarı, gölgeleme, ışığın geliş açısı gibi faktörler ise doğrudan panele bağlı olmayan dış faktörlerdir. En önemli dış faktörlerden biri de kirlenmedir. Dış ortamlarda bulunan panellerin yüzeyleri kirlendiği için daha az ışık soğurmakta ve böylece verimleri düşmektedir. Güneş enerjisi sistemlerinin performansını ve verimliliğini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında gölgeleme etkisi, sıcaklık etkisi, kirlenme etkisi, güneş ışınlarının yansımaya etkisi ve güneş ışınımı önemli bir rol oynamaktadır (Öztürk ve Dener, 2022).

Optimum ve sürdürülebilir bir tasarıma ulaşmada termodinamik iyileştirmelerin finansal ve çevresel maliyetlerinin çok önemli olduğu düşünülerek PV kaynaklı enerji sistemlerinin maliyet ve karmaşıklıklarına göre optimum enerji ve ekserji verimliliklerini oluşturmak amacı ile çalışmalar yapılmaktadır (Ogbonaya, Turan, Abeykoon, 2019). Ekserji analizi, termodinamiğin İkinci Yasasına ve tersinmez entropi üretimi kavramına dayanan bir yöntemdir. Ekserjinin kurucuları 1824'te Carnot ve 1865'te ekserji yönteminin temelini atan Clausius'tur (Koroneos ve Tsarouhis, 2012). Enerji analizinde, güneş ışınımının yoğunluğu, güneş pillerinin çalışma parametreleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu, radyasyon yoğunluğunun artmasının panel gücünün artmasına neden olduğu sonuçları görülmüştür (Kuczynski ve Chliszcz, 2023).

1.3 Haneye Güneş Paneli Kurulumu

1.3.1 Hanede Güneş Enerjisi Nedir, Kurulum İzni Gerekir Mi?

Ev için kullanılan güneş enerjisi, çatı üstüne kurulan güneş panelleri ile gelen güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Ev için kurulacak sistemlerde kullanılması gereken parçalar güneş paneli, invertör (çevirici), akü, konstrüksiyon, konnektörler (Global Solar, 2023).

Güneş enerji santrallerinde 10 kWh üstü yönetmeliği daha çok iş yerlerine uygun olduğu için 10 kWh altı yönetmeliğine uygun olarak başvurulması gereken yer kurulum yapılacak evin bağlı olduğu elektrik idaresidir. Şebekeye bağlı panel sistemleri için gerekli yasal işlemler; bulunulan bölgenin şebeke şirketine teknik belgelerin ve proje onayı için çeşitli belgelerin ulaştırılması aynı zamanda dağıtım şirketi ile bağlantı anlaşması imzalanması gibi süreçler içerir. Kurulum yapılacak ev şebeke ve hizmet dışı kalıyorsa herhangi bir izne ihtiyaç yoktur (Şahin, Dinçer, Yılmaz, 2022).

1.3.2 Güneş Enerji Sistemini Kullanmanın Avantajları

Güneş enerjisi kullanılmaya başlandıktan itibaren elektrik faturalarında düşüş gözlenir. Çevre dostu olmasının yanı sıra çalışma sistemi de oldukça sessizdir. Zorlu hava şartlarına dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Çalıştırmak için yakıt kullanımı gerekmez, dışa bağımlılığı bulunmamaktadır (Şahin vd., 2022).

1.3.3 Güneş Enerji Sistemi Kurulumunda Maliyeti Etkileyen Faktörler

Ev için güneş enerjisi sistemi fiyatları, enerji ihtiyacına göre gerekli güneş paneli sayısına, kullanılacak parçaların markası ve kalitesine, akü türüne, invertör tercihine, solar kontrol cihazı ve solar kablo maliyeti düşük olsa da fiyatları etkileyen faktörlerine göre değişir (Şahin vd., 2022).

2. Yöntem

Eve güneş paneli kurulumu yapmak için öncelikle hangi amaç için kurulacağı-

na karar verilmesi gerekmektedir. Elektriğe para ödememek, karbon salınımını azaltmak, elektrik faturasından tasarruf etmek ya da sadece tasarrufla yetinmeyip maddi gelir elde etmek istenebilir. Eve panel kurulumu için günlük, aylık ya da yıllık enerji tüketimi belirlenmelidir. Aynı zamanda çatıda panel için yerleşime uygun alan belirlenmelidir. Evin bulunduğu bölgede ışınım verileri incelenmeli ve veriler güneş panel sayısı hesabı için elde hazır tutulmalıdır. Sonrasında depolama ihtiyacının belirlenmesi, dönüştürücü kapasitesinin seçilmesi gerekmektedir.

Güneş paneli sayısını hesaplamak için;

$$\text{Güneş paneli sayısı} = \frac{\text{Günlük yük (kWh)}}{\text{Gün ışığı süresi (saat)} \times \text{Panelin watt gücü (w)}} \quad (1)$$

Günlük elektrik tüketimi için elektrik faturasından veri alınabileceği gibi aşağıdaki formülle de hesaplanabilir;

$$\text{Günlük yük} = \frac{\text{Kullanılan cihazların toplam watt değeri (amper x volt) x Cihaz çalışma süreleri}}{\quad} \quad (2)$$

Evin bulunduğu bölge herhangi bir şebeke dağıtım bölgesinde ise on-grid sistem, şebeke dağıtım dışında ise off-grid sistem kullanılır. Bu çalışmada on-grid sistem ve off-grid sistem olarak kurulan 2 farklı senaryo incelenecektir.

2.1 Senaryo I

Kurulum yapılacak ev bir dağıtım şebekesi bölgesindedir. Güneş enerji sisteminin kurulum amacı elektrik faturasına para ödememek olarak belirlenmiştir. Kurulacak panelin gücü yetmediği takdirde şebekeden destek sağlanabileceği için hesaplamalar bir ay üzerinden gerçekleştirilmiştir. Evin aylık elektrik tüketimi son faturaya 119,685 kWh olarak yansımıştır. Çatıda panel için 150 m² alan vardır. Ev Düzce ilindedir ve ışınım değeri 1350-1500 kWh/m²-yıl civarındadır. Ortalama güneşlenme süresi 5,8 saattir.

$$\text{Günlük yük: } 119,685 \text{ kWh} / 30 \text{ gün} = 3,989 \text{ kWh}$$

$$\text{Güneş panel sayısı: } 3,989 \text{ kWh} / 5,8 \text{ h} \times 500 \text{ W} = 1,375 = 2 \text{ panel olarak hesaplanabilir, 2 panele tamamlayabiliriz.}$$

$$[\text{panel gücü} \times \text{panel adedi} \times \text{güneşlenme saati} \times 30 \text{ gün}(1 \text{ ay})] = \text{aylık üretim miktarı}$$

$$500 \text{ W} \times 2 \times 5,8 \text{ h} \times 30 \text{ Gün} = 174 \text{ kWh} / \text{Ay}$$

$$174 \text{ kWh} - 119,685 \text{ kWh} = 54,315 \text{ kWh aylık fazla üretim mevcut}$$

54,315 kWh x 0,32 TL = 17,38 TL kazanç elde edilip faturadan düşüm sağlanabilir (Devlet Destekli, 2023).

500 W Panel Boyutu: 2100mm x 1140mm = 2,394 m² bir panel için alan ihtiyacı
2,394 x 2 = 4,788 m² iki panel için gerekli alan ihtiyacı

Tavsiye edilen invertör büyüklüğü:

Panel 1: 500 W Panel 2: 500 W

(500 W + 500 W) + (0,5 x 1000 W) = 1500 W gerekli invertör gücü

1500 W / 24 V invertör fiyatları ortalama 2000-6000 TL arası (2023 fiyatları)

Depolama için gerekli Jel Akü fiyatları ortalama 5000 – 15.000 TL arası (2023 fiyatları)

500 W Güneş Paneli İçin Ekserji Analizi (Exergy Analysis for 500 W Solar Panel)

Ekserji analizi 500 W güneş paneli için yapıldığında:

$$\dot{E}_{xelek} = \dot{E}_{nelek} - I' = VocI_{sc} - (VocI_{sc} - V_{max}I_{max})$$

Burada, $VocI_{sc}$ elektrik enerjisini temsil etmektedir, $(VocI_{sc} - V_{max}I_{max})$ ise elektriksel ekserji yıkımını simgelemektedir. Bu iki ifadenin özeti elektriksel ekserjiyi şu şekilde vermektedir;

$$\dot{E}_{xelek} = V_{max}I_{max}$$

500 W 'lık güneş paneli için elektriksel ekserji aşağıdaki gibidir:

$$\dot{E}_{xelek} = 38,585 V \times 13,097 A = 505,347 W$$

2.2 Senaryo II

Kurulum yapılacak evin dağıtım şebekesi bölgesinin dışında olduğu varsayılmıştır. Güneş enerji sisteminin kurulum amacı evde yeterli elektrik kullanım imkanını sağlamak olarak belirlenmiştir. Kurulacak panelin gücü yetmediği takdirde şebekeden destek alınamayacağı ve evin ortalama elektrik ihtiyacının üzerinde elektrik üretmesi hedeflendiği için son dokuz ayın ortalaması alınmıştır. Evin aylık elektrik ihtiyacı önceki evin son 9 aylık kullanımını baz alınarak ortalama 123,783 kWh olarak belirlenmiştir. Çatıda panel için 150 m² alan vardır. Ev Düzce ilindedir ve ışınım değeri 1350-1500 kWh/m²-yıl civarındadır. Ortalama güneşlenme süresi 5.8 saattir.

Son 9 ay aylık kullanım Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Son Dokuz Aylık Kullanım

YIL	AY	KULLANIM
2022	TEMMUZ	94,865 kWh
2022	AĞUSTOS	105,162 kWh
2022	EYLÜL	151,822 kWh
2022	EKİM	120,155 kWh
2022	KASIM	120,155 kWh
2022	ARALIK	131,985 kWh
2023	OCAK	153,373 kWh
2023	ŞUBAT	115,420 kWh
2023	MART	121,588 kWh
2023	NİSAN	119,685 kWh
	9 AY TOPLAM	1.114,055 kWh

Aylık ortalama $1.114,055 / 9 = 123,783$ kWh

Günlük yük $123,783$ kWh / 30 gün = $4,126$ kWh

Güneş panel sayısı $4,126$ kWh / $5,8$ h x 400 W = $1,778 = 2$ adet panel olarak kabul edebiliriz.

400 W x $2 = 0,8$ kWh saatlik üretim miktarı

$5,8$ h x $0,8 = 4,64$ kWh günlük üretim miktarı

$4,64$ kWh x $30 = 139,2$ kWh aylık üretim miktarı

$123,784$ kWh - $139,200$ kWh = $15,416$ kWh fazla üretim şebeke bağlantısı olmadığı için sadece depolanabilir olması, satılmaması daha uygun olabilir.

400 W Panel Boyutu 1006 mm x 1986 mm = $1,997$ m² bir panel için alan ihtiyacı

$1,997$ m² x $2 = 3,994$ m² iki panel için gerekli alan ihtiyacı

Tavsiye edilen invertör büyüklüğü:

Panel 1: 400 W Panel 2: 400 W

$(400W + 400W) + (0,5 \times 800 W) = 1200$ W gerekli invertör gücü

1200 W / 12 V invertör fiyatları ortalama 500 - 4000 TL arası (2023 fiyatları)

Depolama için gerekli Jel Akü fiyatları ortalama 5000 - 15.000 TL arası (2023 fiyatları)

400 W Güneş Paneli İçin Ekserji Analizi (Exergy Analysis For 400 W Solar Panel)

Ekserji analizi 400 W güneş paneli için yapıldığında:

$$\dot{E}_{xelek} = \dot{E}_{nelek} - I' = VocIsc - (VocIsc - VmaxImax)$$

Burada, $VocIsc$ elektrik enerjisini temsil etmektedir. $(VocIsc - VmaxImax)$ ise elektriksel ekserji yıkımını simgelemektedir. Bu iki ifadenin özeti elektriksel ekserjiyi şu şekilde vermektedir;

$$\dot{E}_{xelek} = VmaxImax$$

400 W 'lık güneş paneli için elektriksel ekserji aşağıdaki gibidir:

$$\dot{E}_{xelek} = 47,95 \text{ V} \times 9,99 \text{ A} = 479,02 \text{ W}$$

3. Sonuç ve Tartışma

Tablo 2. Ekserji Analizi Senaryo Sonuçları

	SENARYO I	SENARYO II
Gerekli elektrik ihtiyacı	119,685 kWh	123,784 kWh
Kullanılan panel	500 W x 2	400 W x 2
Üretilen elektrik miktarı	174 kWh	139.2 kWh
Fazla üretilen elektrik miktarı	54,315 kWh	15,416 kWh
Fazla üretilen elektrikten kazanç	17,38 TL	-
İnvertör	1500 W	1200 W
Ortalama kurulum maliyeti	25.000-30.000 TL	20.000-25.000 TL
Elektriksel ekserji değeri	505,347 W	479,02 W

Senaryo I' de 500 W'lık 2 panel kullanıldığı takdirde 1 ayda 174 kWh elektrik üretiliyor. Evin aylık ortalama elektrik ihtiyacı 119,685 kWh olduğu için üretilen 54,315 kWh elektrik şebekeye aktarılıyor. Aktarılan enerjiden 17,38 TL kazanç sağlanabiliyor. 1500 W gücünde invertör gerektiği görülmüştür. Ortalama kurulum maliyeti 25.000-30.000 TL arasındadır. Bir sistemin verilen bir halde yapabileceği en çok yararlı iş ekserji (kullanılabilirlik) olarak tanımlanır. Dolayısıyla sistemde kullanılabilirlik olarak elektriksel ekserji değeri 505,347 W'tır.

Senaryo II' de 400 W'lık 2 panel kullanıldığı takdirde 1 ayda 139,2 kWh elektrik üretiliyor. Evin aylık ortalama elektrik ihtiyacı 123,784 kWh olduğu için 15,416 kWh fazla üretim yapılıyor ve şebeke bağlantısı olmadığı için enerji akülerde sonra kullanılmak üzere depolanıyor. Hesaplamalara göre 1200 W gücünde invertör gereklidir. Ortalama kurulum maliyeti 20.000-25.000 TL arasındadır.

Sistemde kullanılabilirlik olarak elektriksel ekserji değeri 479,02 W'tır. Bu sonuçlar doğrultusunda hane bütçesine uygun olan senaryo işleme alınabilecektir.

Sonuç olarak, birinci senaryoda elde edilen 505,347 W ekserji değeri, güneş enerjisi sistemlerinin performansını en üst düzeye çıkarmak için çevresel faktörlerin dikkatlice yönetilmesi gerektiğini vurgular. İkinci senaryodaki 479,02 W ekserji değeri ise, bu faktörlerin etkilerinin ne kadar belirgin olabileceğini göstermektedir. Benzer bulgular, literatürde de tartışılmış olup, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak ve daha sürdürülebilir enerji üretimi sağlamak için çeşitli politikaların önerildiğini doğrulamaktadır (Sangeetha, Manjunatha, Thirusenthil Kumaran, Sheela, Yamuna, Sivakumar, 2024).

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Yazar1, bilimsel yayın araştırması, modelin kurulması, makalenin oluşturulması, makalenin sonuçların analizi ve yorumlanması; Yazar2, verilerin toplanması, analizin uygulanması, bilgisayara ortamına aktarılması, makalenin sonuçlarının analizinin hazırlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Teşekkür

Çalışma boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Elektrik Müh. Erhan Gebeş' e teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynakça

Al-Mamun, A., Sundaraj, K., Ahmed, N., Ahamed, N. U., Rahman, S. A. M. M., Ahmad, R. B., & Kabir, M. H. (2013, December). Design and development of a low cost solar energy system for the rural area. In *2013 IEEE Conference on Systems, Process & Control (ICSPC)* (pp. 31-35). IEEE. . Doi: <https://doi.org/10.1109/SPC.2013.6735098>

Behura, A. K., Kumar, A., Rajak, D. K., Pruncu, C. I., & Lamberti, L. (2021). Towards better performances for a novel rooftop solar PV system. *Solar Energy*, *216*, 518-529. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.045>

Devletdestekli.Com, Devlete Elektrik Satmak Alım Fiyatı, Erişim Adresi: <https://www.Devletdestekli.Com/Devlete-Elektrik-Satmak-Alim-Fiyati/>(Erişim Tarihi: Nisan 2023)

- Global Solar, Erişim Adresi: <https://www.globalenerjimarketim.com/blog/icerik/ev-icin-gunes-enerjisi-avantajlari-ve-maliyeti-nelerdir> (Erişim tarihi: Nisan 2023)
- Güngül, M., Bayraç, H. N., & Güllü, M. (2018). Türkiye’de Konutlarda Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminin TOPSIS Yöntemiyle Analizi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(3), 133-144.
- Hayat Burada, Dünyamızın Geleceği Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi, <https://www.hepsiburada.com/hayatburada/dunyamizin-gelecegi-yenilenebilir-enerji-kaynaklarinin-onemi/> (Erişim tarihi: Nisan 2023)
- Koroneos, C., & Tsarouhis, M. (2012). Exergy analysis and life cycle assessment of solar heating and cooling systems in the building environment. *Journal of Cleaner Production*, 32, 52-60. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.012>
- Kuczynski, W., & Chliszcz, K. (2023). Energy and exergy analysis of photovoltaic panels in northern Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113138.
- Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113138>
- Ogbonnaya, C., Turan, A., & Abeykoon, C. (2019). Energy and exergy efficiencies enhancement analysis of integrated photovoltaic-based energy systems. *Journal of Energy Storage*, 26, 101029. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101029>
- Öztürk, D., & Dener, A. (2022). Power generation variation analysis of solar panels coated with TiO₂. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 11(1), 108-115. Doi: <https://doi.org/10.46810/tdfd.1026437>
- Sangeetha, B., Manjunatha, K., Thirusenthil Kumaran, P., Sheela, A., Yamuna, K. S., & Sivakumar, S. (2024). Performance Optimization in Photovoltaic Systems: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(3), 1507-1518. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-10023-0>
- Şahin, Z. R., Dinçer, F., & Yılmaz, A. S. (2022). 4 Kişilik Bir Ailenin Elektrik Enerjisi İhtiyacı İçin Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santrali Tasarımı ve Simülasyonu. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25 (Özel Sayı), 46-56. Doi: <https://doi.org/10.17780/ksujes.1163049>
- T.C. Enerji ve Tabii Bakanlığı, Güneş Enerjisi, Erişim Adresi: <https://Enerji.Gov.Tr/Bilgi-Merkezi-Enerji-Gunes> (Erişim tarihi: Nisan 2023)
- Timur, A. G. M. C. (2017, March). Enerji Arz Güvenliğinin Sağlanmasında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi. *In International Congress of Energy, Economy and Security Proceedings ENSCON'17* (p. 8).

Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Derneği, Yenilenebilir Enerji Nedir?, Erişim Adresi : https://Yenader.Org/Tr_Tr/Blog/Service/Yenilenebilir-Enerji-Nedir/ (Erişim tarihi: Nisan 2023)

Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54. Doi: https://doi.org/10.1501/Csaum_00000000064

Yıldız, A., & Yıldırım, E. (2020). Düzce Çevresinde Su Temin Uygulaması İçin Şebeke Bağlantılı 15 kWp Güçteki PV Sistemin Fayda-Maliyet Analizi. *EMO Bilimsel Dergi*, 9 (2), 33-41.



OTOMOTİV SEKTÖRÜ AYDINLATMA ÜRÜNLERİ PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA KULLANILAN DIN 1.2343 ÇELİĞİNİN DALMA EROZYON YÖNTEMİ İŞLEME PARAMETLERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERİNE ETKİSİNİN İNCELENEMESİ

Mert ÇELİK^{1*}, İbeyi KILAVUZ²

¹ Farba Otomotiv A.Ş., Tosb Otomotiv Osb, 2. Cd., 41420 TOSB-TAYSAD Organize Sanayi Bölgesi/Gebze/Kocaeli

ORCID No : <http://orcid.org/0009-0001-6817-8548>

² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Kocaeli

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-2050-7533>

Anahtar Kelimeler

Öz

Dalma erozyon işlemi, plastik enjeksiyon kalıp çelikleri, taguchi, anova analizi, yüzey pürüzlülük değeri

Bu çalışmada otomotiv sektörü aydınlatma ürünleri plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan 181x131x37 mm boyutlarındaki DIN 1.2343(X37CrMoV5-1) sıcak iş takım çeliğinin dalma erozyon yöntemi ile işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerine olan etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma OSCARMAX S430S PNC (60A) marka dalma erozyon tezgahında ve COOLMATIC EDM PLUS erozyon sıvısı ile uygulanmıştır. Deneylerde Ø16 mm çap 25 mm boy ölçüsüne sahip elektrot (CuBe2, CuAl10Ni5Fe4, CuCrZr), akım (4 A, 8 A, 16 A), vuruş süresi (30 µs, 60 µs, 120 µs) ve vuruş bekleme süresi (45 µs, 90 µs, 180 µs) parametreleri kullanılmıştır. Bu 4 faktör ve 3 seviye için Minitab21 programı yardımıyla L27 ortogonal dizilim oluşturulmuş ve deneyler uygulanmıştır. Deneyler sonrasında yüzey pürüzlülük değeri Mitutoyo SJ-410 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Bu değerler doğrultusunda yine Minitab21 programı yardımıyla Taguchi(En Küçük En İyi) deney analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda optimum parametreler CuAl10Ni5Fe4 elektrot, 4 A akım değeri, 30 µs vuruş süresi ve 180 µs vuruş bekleme süresi olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile yapılan doğrulama deneyinde yüzey pürüzlülük değeri 2,16 µm elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen en küçük yüzey pürüzlülük değeri 2,16 µm olduğu için proses parametrelerinin optimum seçildiği görülmektedir. Deneysel çalışmanın son aşamasında Minitab21 programı yardımıyla yapılan ANOVA analizi ile yüzey pürüzlülük değeri için parametrelerin önem sırası sırasıyla vuruş süresi (%39,53), akım (%31,02), vuruş bekleme süresi (%10,21) ve elektrot tipi (%2,2) olduğu görülmüştür.

* mertt.celikk.29@gmail.com

doi : 10.46399/muhendismakina.1505414

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PLUNGE EROSION MACHINING PARAMETERS ON THE SURFACE ROUGHNESS VALUE OF DIN 1.2343 STEEL USED IN PLASTIC INJECTION MOLDS FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY LIGHTING PRODUCTS

Keywords

Plunge erosion, plastic injection mold steels, taguchi, anova analysis, surface roughness value

Abstract

In this study, the effect of machining parameters on the surface roughness value of DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1) hot work tool steel with dimensions of 181x131x37 mm used in plastic injection molds of automotive sector lighting products by plunge erosion method was investigated. The experimental work was carried out on an OSCARMAX S430S PNC (60A) plunge erosion machine with COOLMATIC EDM PLUS erosion fluid. Electrode (CuBe2, CuAl10Ni5Fe4, CuCrZr) with Ø16 mm diameter and 25 mm length, current (4 A, 8 A, 16 A), on time (30 µs, 60 µs, 120 µs) and off time (45 µs, 90 µs, 180 µs) parameters are used in the experiments. With the help of Minitab21 program, L27 orthogonal array was created and experiments were applied. After the experiments, the surface roughness value was measured with Mitutoyo SJ-410 surface roughness measuring device. In line with these values, Taguchi (Least Best) experiment analysis was performed with the help of Minitab21 program. As a result of the analysis, the optimum parameters were determined as CuAl10Ni5Fe4 electrode, 4 A current value, 30 µs on time and 180 µs off time. In the verification experiment performed with these parameters, a surface roughness value of 2.16 µm was obtained. As the smallest surface roughness value obtained as a result of the experiments was 2.16 µm, it is seen that the process parameters were selected optimally. In the last stage of the experimental study, ANOVA analysis performed with the help of Minitab21 program showed that the importance of the parameters for the surface roughness value were on time (39.53%), current (31.02%), off time (10.21%) and electrode type (2.2%), respectively.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 26.06.2024

Kabul Tarihi : 02.10.2024

Research Article

Submission Date : 26.06.2024

Accepted Date : 02.10.2024

Extended Abstract

Introduction

Polymeric materials are used in automobiles due to the main demands of the automotive industry, such as low-cost manufacturing, lower vehicle fuel consumption, customer-acceptable styling and weight reduction. This demand for polymeric materials has led both automobile manufacturers and auto parts suppliers to specialize in the plastic injection molding process. The surface of the plastic injection mold directly affects the quality of the plastic product. Especially even the slightest scratch on the mirror surface molds of visual parts such as car headlights can be easily noticed in the product. Molds, which are critical for product quality, are machined on highly sensitive machines. In this manufacturing process, methods such as milling, turning, plunge erosion, wire erosion and grinding are frequently used. In cases where traditional machining methods are insufficient in the mold manufacturing process, the plunge erosion method, one of the electro erosion machining methods, is used. Plastic injection molds operate under challenging conditions (such as high pressure, high temperature, corrosion risks due to the process conditions. Along with these challenging conditions, the constantly developing plastic injection industry demands plastic injection mold steels with high efficiency and quality. For this reason, there is a need to produce mold steels with superior properties. In order to meet this expectation, properties such as yield strength, toughness, tensile strength, abrasion resistance, corrosion resistance, thermal conductivity, thermal expansion, machinability, polishability, patternability, weldability, heat treatability, coating and cost should be examined. Pre-hardened steels, case hardening steels, core hardening steels, corrosion resistant steels and nitriding steels are frequently used in plastic injection molds. Steels that harden to the core are often preferred for cavity steels, core steels, pressure plates and ejector pins. DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1), also known as H11, is a core hardening hot work tool steel. As hot work tool steels, it is frequently preferred in automotive industry lighting product plastic injection molds due to its ability to maintain its mechanical properties and abrasion resistance at high temperature, high thermal conductivity, machinability, coating and polishability. DIN 1.2343 steel is produced by the ESR method called ESR under slag spinning.

Objectives

In this study, the effect of processing parameters on the surface roughness value of DIN 1.2343 steel used in plastic injection molds of automotive lighting products by plunge erosion method was investigated. As a result of the research, the surface roughness value of DIN 1.2343 steel after erosion was optimized by analyzing the process parameters. With this optimization, both time and cost savings were achieved in plastic injection mold manufacturing.

Methods

The experimental works are carried out with OSCARMAX S430S PNC (60A) plunge erosion machine. COOLMATIC EDM PLUS erosion fluid is used for the plunge erosi-

on process. DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1) hot work tool steel used in plastic injection mold cores and cavity with dimensions of 181x131x37 mm is used as the workpiece in plunge erosion machining experiments. The steel was first subjected to CNC milling and then precision grinding. Electrode (CuBe2, CuAl10Ni5Fe4, CuCrZr), current (4 A, 8 A, 16 A), on time (30 μ s, 60 μ s, 120 μ s) and off time (45 μ s, 90 μ s, 180 μ s) parameters were used in the experiments. The L27 orthogonal array, which is determined with a total of 4 factors and 3 levels for each factor, is created with the Minitab21 program. Mitutoyo SJ-410 model surface roughness measuring device is used for workpiece surface roughness measurement after plunge erosion process.

Results

As a result of the experiments, the lowest Ra value of 4.199 μ m is obtained with CuAl10Ni5Fe4 electrode, 4 A current value, 30 μ s on time and 90 μ s off time. Based on the experimental results, L27 orthogonal array is analyzed with Minitab21 program and Signal/Noise ratios are calculated. In Taguchi Experiment Analysis methods, "Least Best" option is selected for Ra value. According to the results obtained, it is seen that the most important factors for the surface roughness value are on time, current, off time and electrode type, respectively. Based on ANOVA analysis, the percentage effects of the parameters on surface roughness are 39.53% for on time, 31.02% for current, 10.21% for off time and 2.2% for electrode type.

According to these results, the most optimum parameters for surface roughness value are CuAl10Ni5Fe4 electrode, 4 A current value, 30 μ s on time and 180 μ s off time. As a result of the verification experiment, a surface roughness value of 2.16 μ m is obtained with the optimum parameters of CuAl10Ni5Fe4 electrode, 4 A current value, 30 μ s on time and 180 μ s off time.

Discussion and Conclusions

As seen in the experimental studies, the on time is the most important parameter affecting the surface roughness after the plunge erosion process. The increase in the on time increases the surface roughness value. For lower surface roughness values, the on time can be decreased; however, this will lead to an extension of the plunge erosion process time and longer exposure of the workpiece to heat. Another critical value for the surface roughness value is the current value. At higher currents, the plunge erosion process will take a shorter time, but with this increase, the surface roughness value and electrode wear rate will also increase. It is seen that the off time and electrode type do not have as much effect on the surface roughness of the workpiece as the on time and current as a result of the plunge erosion process. Although the off time and electrode type are less effective than the other parameters for the surface roughness value, these two parameters are critical for the plunge erosion process due to their effects on the duration of the plunge erosion process, the cleaning of the dielectric fluid, the material removal rate and the electrode wear rate.

1. Giriş

Polimer malzemeler, otomotiv sektörünün düşük maliyet ile imalat, araç yakıt tüketimini düşürme, müşteri tarafından kabul gören bir stil oluşturma ve ağırlık azaltma gibi başlıca talepleri sebebiyle otomobillerde kullanılmaktadır. Polimer malzemelere olan bu talep hem otomobil üreticilerinin hem de otomobil parçası üreten tedarikçilerinin plastik enjeksiyon prosesinde uzmanlaşmasına yol açmıştır. Plastik enjeksiyon kalıbının yüzeyi, plastik ürünün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Özellikle otomobil farı gibi görsel parçaların ayna yüzey kalıplarındaki en ufak bir çizik üründe kolayca fark edilebilmektedir. Ürün kalitesi için kritik öneme sahip olan kalıplar, oldukça hassas tezgahlarda işlenmektedir. Bu imalat sürecinde sıklıkla frezeleme, tornalama, dalma erozyon, tel erozyon ve taşlama gibi yöntemler kullanılmaktadır. Kalıp imalat sürecinde geleneksel işleme yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda elektro erozyon işleme yöntemlerinden biri olan dalma erozyon yöntemi kullanılmaktadır.

Rachman, Purnomo, Fajardini ve Umami (2019) çalışmalarında plastik enjeksiyon kalıplarında sıklıkla tercih edilen DIN 1.2738 cinsi çeliğin Ariztech ZNC LS 550 dalma erozyon tezgahı ile işlenmesinde elektrot tipi, vuruş süresi, vuruş bekleme süresi ve gerilim parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Elektrot malzemesi olarak bakır ve grafit elektrot malzemesi tercih edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü ise Surfest Mitutoyo SJ-310 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma için 4 adet faktör için 3 adet seviye belirlenerek L18 ortogonal dizisine dayalı deney tasarımı Taguchi yöntemi ile analiz edilmiştir. Varyans analizi sonucunda en önemli faktörün vuruş süresi olduğu görülmüştür. Araştırma sonucunda optimum yüzey pürüzlülük değeri grafit elektrot, 40 V gerilim, 250 µs vuruş süresi ve 20 µs vuruş bekleme süresi ile elde edilmiştir.

Nas, Argun ve Zurnacı (2018) çalışmalarında yine plastik enjeksiyon kalıplarında sıklıkla tercih edilen DIN 1.2738 cinsi çeliğin King ZNC K-3200 dalma erozyon tezgahı ve grafit elektrot ile işlenmesinde vuruş süresi (100, 200 ve 300 µs), vuruş bekleme süresi (10, 20 ve 30 µs) ve boşalım akımı (10, 20 ve 30 A) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Araştırmada Taguchi yöntemi veya yapay sinir ağları gibi deneysel yöntemler tercih edilmediğinden 27 adet deney yapılmıştır. 27 adet deneyin sonucunda; en düşük yüzey pürüzlülük değeri 100 µs vuruş süresi, 10 µs vuruş bekleme süresi ve 20 A akımda 4,35 µm olarak ölçülmüştür.

Malo (2023) çalışmasında plastik enjeksiyon kalıplarının sabit ve hareketli çekirdeklerinde kullanılan DIN 1.2344 cinsi çeliğin ZNC Best-3000S dalma erozyon tezgahı ve bakır elektrot ile işlenmesinde görev çevrimi (0.3-0.6 η), boşalım akımı (4,8 ve 12 A) ve vuruş süresi (300-500-700 µs) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, elektrot aşınma oranı ve talaş kaldırma oranları araştırılmıştır. Yüzey

pürüzlülük değeri için Mitutoyo SJ-310S, elektrot aşınma oranı için hassas terazi kullanılmıştır. Çalışma için 3 adet faktör için toplamda 8 adet seviye belirlenerek L18 ortogonal dizisine dayalı deney tasarımı Taguchi yöntemi ile analiz edilmiştir. Varyans analizi sonucunda yüzey pürüzlülüğü, elektrot aşınma oranı ve talaş kaldırma oranı için en önemli faktörün boşalım akım değeri olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü için en ideal seviyeler, görev çevriminin 1. seviyesi olan 0.3 η , boşalım akımının 1. seviyesi olan 4 A ve vuruş süresinin 3. seviyesi olan 700 μ s; talaş kaldırma oranı için en ideal seviyeler, görev çevriminin 2. seviyesi olan 0.6 η , boşalım akım değeri 3. seviyesi olan 12 A ve vuruş süresinin 1. seviyesi olan 300 μ s olarak; elektrot aşınma oranı için en ideal seviyeler, görev çevriminin 1. seviyesi olan 0.3 η , boşalım akımının 1. seviyesi olan 4 A ve vuruş süresinin 3. seviyesi olan 700 μ s olarak bulunmuştur.

Erman (2021), çalışmasında plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan MIRRAX cinsi çeliğin FURKAN EDM M25 A dalma erozyon tezgahı ile işlenmesinde elektrot (CuCoNiBe, CuNi2SiCr ve CuCrZr), boşalım akımı (6,12 ve 25 A), vuruş süresi (50,100 ve 200 μ s) ve vuruş bekleme süresi (200, 400 ve 800 μ s) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, elektrot aşınma oranı ve iş parçası işleme hızı araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülük değeri için Mitutoyo SJ-210, elektrot aşınma oranı için hassas terazi kullanılmıştır. Çalışma için 4 adet faktör için toplamda 12 adet seviye belirlenerek L27 ortogonal dizisine dayalı deney tasarımı Taguchi yöntemi ile analiz edilmiştir. Varyans analizi sonucunda yüzey pürüzlülüğü, elektrot aşınma oranı ve iş parçası işleme hızı için en önemli faktörün boşalım akımının olduğu görülmüştür. En yüksek iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülük değerleri CuNi2SiCr elektrot kullanılarak, 25 A boşalım akımı, 200 μ s vuruş süresi ve 400 μ s vuruş bekleme süresi değerlerinde görülmüştür. En düşük iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülük CuCrZr elektrotun kullanıldığı, 6 A boşalım akımı, 50 μ s vuruş süresi ve 200 μ s vuruş bekleme süresi değerinde görülmüştür.

Plastik enjeksiyon kalıpları yüksek ısı iletkenliği gerektiren (çelik malzemelerin karşılamayacağı durumlar) ve hareketli parçaların yağlanamadığı (medikal ürünler, otomotivde görsel ürünler gibi) durumlar haricinde çelik malzemeden imal edilir. Ayrıca prototip kalıplarında maliyet göz önünde bulundurularak alüminyum malzeme seçilebilir (Catoen ve Rees, 2022). Plastik enjeksiyon kalıplarında sıklıkla ön sertleştirilmiş çelikler, yüzeysel sertleşen çelikler, çekirdeğine kadar sertleşen çelikler, korozyona dayanıklı çelikler ve nitrasyon çelikleri kullanılmaktadır. Çekirdeğine kadar sertleşen çelikler, içerisinde bulunan alaşımlar nedeniyle 46-62 HRC sertliğine kadar sertleşebilir. Bu sertlik düzeyi östenit fazı sonrası ani soğutma sonucu oluşan martenzit fazıyla elde edilir. Bu tür çeliklere DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1), DIN 1.2767 (45NiCrMo16), DIN 1.2842 (90MnCrV8)), ve DIN 1.2379 (X153CrMoV12) çeliği örnek verilebilir (Mennig ve

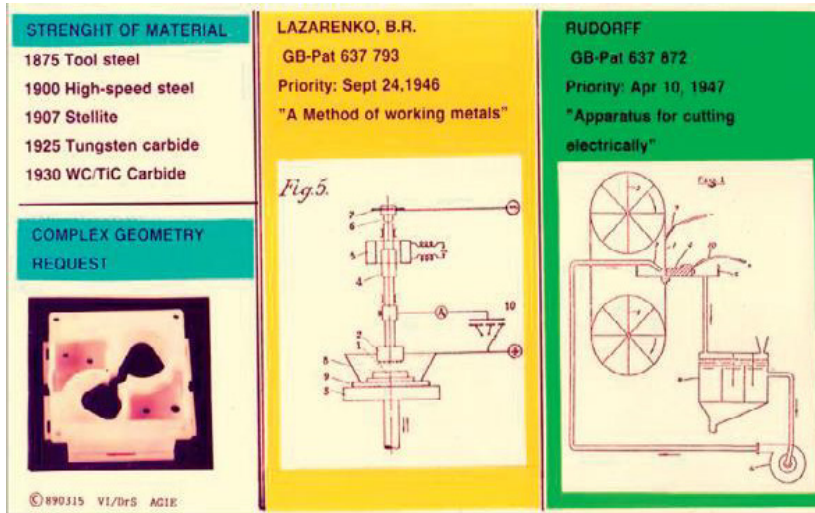
Stoekherth, 2013). Bu tür çelikler sabit-hareketli çeliklerde, baskı plakalarında ve itici pimlerde sıklıkla tercih edilir. DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1) bir diğer adıyla H11 çekirdeğine kadar sertleşen sıcak iş takım çeliğidir. Sıcak iş takım çelikleri olarak yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini ve aşınma dayanımlarını koruyabilmeleri, ısı iletkenliğinin yüksekliği, işlenebilirlik, kaplanabilirlik ve parlatılma kabiliyetlerinin yeterli olması sebebiyle otomotiv sektörü aydınlatma ürün plastik enjeksiyon kalıplarında sıklıkla tercih edilir. 1.2343 çeliği ESR denilen cüruf altı eğritme metodu ile üretilmektedir.

Tablo 1. DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1) Çeliği Kimyasal İçeriği (Koçak,2019)

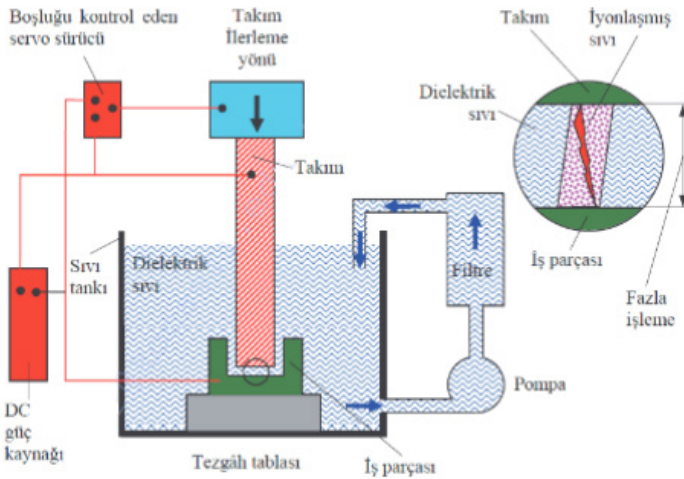
Karbon [C]	Silisyum [Si]	Mangan [Mn]	Fosfor [P]	Kükürt [S]	Krom [Cr]	Molibden [Mo]	Vanad- yum [V]
0,33- 0,41	0,8,-1,2	0,25- 0,5	max 0,03	max 0,02	4,8- 5,5	1,1-1,5	0,3-0,5

Elektro erozyon ile işleme yönteminin kökeni İngiliz bilim insanı Joseph Priestly'in elektrik akımının aşındırıcı etkisini keşfettiği 1770 yılına kadar dayanmaktadır. Fakat bu uygulama sadece deneysel olarak kalmıştır. 2. Dünya Savaşı sırasında Moskova Üniversitesinde çalışan Rus fizikçi çift Boris Lazarenko ve Natalya Lazarenko, elektrik güç kontaklarındaki aşınmayı en aza indirmek ve değerli malzemelerin yerini alacak alternatifler için çalışmalarını sürdürürken; elektrik güç kontaklarındaki aşınma etkisini terse çevirerek, işleme tezini ortaya çıkarmıştır. Bu fikrin pratik uygulaması için Lazarenko çifti hemen bir aparat geliştirdi ve patentini aldı. Sovyetler Birliği'nin "Paris Patent Sözleşmesi'ne üye olmaması nedeniyle patent, batılı ülkelerde savaştan sonra korunamadı. Fakat İngiltere, Paris Patent Sözleşmesi'nin dışında kaldığı için İngiltere'de patent alındı. Şekil 1'de (sağ tarafta), Dagobert W. Rudorff tarafından icat edilen bir işleme aparatı gösterilmektedir. Bu patent, iş parçasının elektro erozyon ile kesilmesi için tel elektrotların kullanıldığı ilk telifdir (Schumachera, Karmpitzb ve Kurthc, 2013).

Dalma erozyonla işlemede, kapasitörde depolanan elektrik yükü takım (Katot) ve iş parçası (Anot) arasındaki küçük boşlukta deşarj edilerek oluşan kıvılcımla talaş kaldırılır. Bu boşlukta saniyede binlerce kıvılcım oluşur ve bu kıvılcımların her biri boşluktan atlarken iş parçasından ve elektrottan çok küçük bir parçacığı ergitip buharlaştırarak parça üzerinde çok küçük krater oluşturur ve takım şekli (iş parçasının negatifi) iş parçasına işlenmiş olur. Dalma erozyon ile işlemede her bir kıvılcım belirli miktarda kontrol edilebilen enerjiye sahiptir. Bu sebeple; talaş kaldırma oranı ve yüzey kalitesi de kontrol edilebilir (Aydın, Gavas, Yaşar ve Altunpak, 2022).



Şekil 1. Lazarenko Çifti ve W. Rudorff'un Patenti (Schumachera ve diğ, 2013)



Şekil 2. Elektro Erozyon İşleminin Şematik Gösterimi (Aydın M. ve diğ, 2022)

Elektrot yapımı için bakır, pirinç ve bakır-tungsten gibi malzemeler kullanılmasına rağmen; karbonun siyah ve yumuşak bir şekli olan grafit; erozyon anında gösterdiği aşınma direnci, elektrik iletkenliği ve ucuz olması sebebiyle en çok tercih edilen elektrot malzemesidir (Aydın M. ve diğ, 2022). Dielektrik sıvı, dalma erozyon prosesinde takım ve iş parçası arasındaki yalıtımı sağlamak, temizleyici olarak davranmak, takım-iş parçası arasında kopan parçacıkları uzaklaştırmak ve soğutma ortamı sağlamak gibi görevleri görmektedir. En yaygın dielektrik sıvısı

mineral yağlardır, ancak gazyağı ve damıtılmış deiyonize su da özel uygulamalarda kullanılmaktadır. (Kalpakjian ve Schmid, 2022). İşleme aralığında (elektrot ile iş parçasının arasında akımın başladığı mesafe) gerilimin ilk uygulanma anı ile boşalmanın bitiş anı arasındaki toplam süreye vuruş süresi denmektedir, μs cinsinden ifade edilmektedir (Dursun, 2007). Dalma erozyon işlemi boyunca yapılan tüm malzeme kaldırma işlemi vuruş boyunca gerçekleştiği için vuruş süresi parametresi kritik öneme sahiptir. Talaş kaldırma, vuruş süresi boyunca uygulanan enerji ile doğru orantılıdır (Singh ve Bhardwaj, 2011). Art arda oluşan iki boşalmanın arasında kalan süre de vuruş bekleme süresidir. Bu sürede mikro saniye cinsinde belirtilir. Boşalım süresince işleme aralığından geçen akıma boşalım akımı denir, bu parametre Amper cinsinden belirtilmektedir (Erman, 2021). Kaba işleme ve geniş yüzey alanlarına sahip boşluklarda veya detaylarda, ince ve hassas yüzeylere göre daha yüksek amper kullanılır. Daha yüksek akımlar malzeme kaldırma hızını iyileştirir, ancak yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınma hızını ciddi derece artırır (Ho ve Newman, 2003). Elektrot boşluğu dalma erozyon işlemi esnasında vuruş ve vuruş bekleme süresi boyunca iş parçası ile elektrot arasındaki mesafedir. Dalma erozyon tezgahlarında bulunan servo mekanizma; çalışma boşluğunu ayarlanan değere duyarlı bir şekilde kontrol etmektedir. Çoğunlukla elektro-mekanik (DC veya step motorlar) ve elektrohidrolik sistemler kullanılır (Crookall ve Heuvelman, 1971) (Bayramoğlu ve Duffill, 1995).

1950'lerde geliştirilen istatistiksel bir yaklaşım olan Taguchi yöntemi, en uygun tasarım değişkenlerini belirlemek için sistematik ve etkili bir yaklaşımdır. Taguchi yöntemi; az sayıda deney ile tüm deneysel bölgenin incelenebilmesi için ortogonal dizilerden elde edilen kesirli tasarımları kullanmaktadır. Bu yöntem, deneylerin zaman ve maliyetlerini düşürmenin yanında, gerçekleştirilecek bazı ek işlemlerle en uygun koşulların belirlenmesini de sağlar. Ayrıca, Taguchi yönteminden çıkarılan sonuçlar, deneysel bölgenin tamamında geçerlidir. Taguchi yönteminde, bilinen deney tasarımlarından farklı olarak hem ortalama hem de değişkenlik eş zamanlı modellenmektedir (Ünverdi ve Küçük, 2019).

S/N, ortalamasının standart sapmaya oranıdır. S/N üç kategoride incelenebilir: Denklem 1'de daha küçük daha iyi formülasyonu gösterilmektedir (Kaya, 2022).

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_i^n y^2 \right) \quad (1)$$

Denklem 2'de daha büyük daha iyi formülasyonu gösterilmektedir (Kaya, 2022).

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_i^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (2)$$

Denklem 3'te nominal değer en iyi olduğu formülasyonu gösterilmektedir (Kaya, 2022).

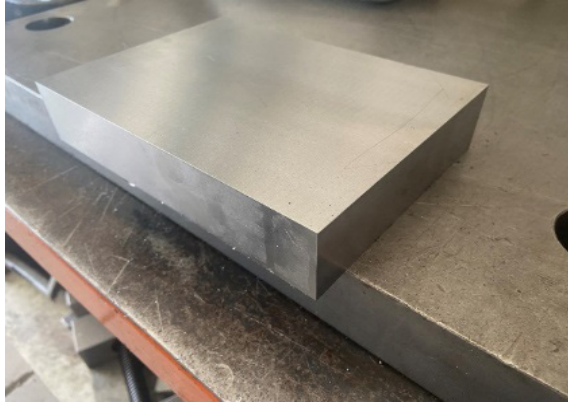
$$S/N = 10 \log \frac{\bar{y}}{s_y^2} \quad (3)$$

ANOVA olarak da bilinen varyans analizi, bir veya daha fazla bağımsız değişkenin (gruplar veya muameleler) bağımlı değişken (ortalama) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gözlemlenip gözlemlenmediğini belirlemektir. ANOVA Sir Ronald A. Fisher tarafından geliştirilmiştir (Adam, Jeffrey, Steven ve Brett, 2023).

Bu çalışmada, makalenin literatür kısmında bulunan diğer kalıp çeliklerinden farklı olarak, otomotiv sektörü aydınlatma ürünlerinin (far lens, arka lamba lens vb.) plastik enjeksiyon kalıplarında, ayna yüzeye kadar kolayca parlatılabilme ve zorlayıcı çalışma koşullarında (100-120°C kalıp sıcaklığı, 290- 320°C hammadde sıcaklığı, aşındırıcı hammadde(PC) vb.) sağladığı üstün mukavemet özellikleri sebebiyle kullanılan DIN 1.2343(X37CrMoV5-1) sıcak iş takım çeliğinin dalma erozyon yöntemi ile işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerine olan etkisi Taguchi deneysel analiz yöntemi kullanılarak araştırılması amaçlanmıştır.

2.Yöntem

Dalma erozyon ile işleme deneylerinde iş parçası olarak 181x131x37 mm boyutlarında plastik enjeksiyon kalıp çekirdeklerinde kullanılan DIN 1.2343(X37CrMoV5-1) sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Testere yardımıyla kesilen iş parçası CNC freze yardımıyla istenilen ölçülere yakın ölçülere getirildikten sonra, taşlama yöntemiyle hassas ölçülere getirilmiştir.



Şekil 3. İstenilen Ölçülere Getirilmiş Dalma Erozyona Hazır DIN 1.2343 İş Parçası

Deney çalışmaları OSCARMAX S430S PNC (60A) marka dalma erozyon tezgahı ile uygulanmıştır. Şekil 4'te deneylerde kullanılan OSCARMAX S430S PNC dalma erozyon tezgahı, Tablo 2'de OSCARMAX S430S PNC tezgahına ait teknik bilgiler gösterilmiştir.



Şekil 4. OSCARMAX S430S PNC Dalma Erozyon Tezgahı

Tablo 2. OSCARMAX S430S PNC 60A Dalma Erozyon Tezgahı Teknik Özellikleri

TANIM	ÖZELLİK	BİRİM
Tank Ölçüleri (LxExH)	990 x 565 x 380	mm
Tabla Ölçüleri (LxE)	650 x 350	mm
Tabla Hareketi(X)	400	mm
Tabla Hareketi(Y)	300	mm
Servo Hareketi(Z)	180	mm
Servo Hareketi(Z2)	250	mm
Maksimum Elektrot Ağırlığı	120	kg
Maksimum İş Parçası Ağırlığı	550	kg
Tezgah Ölçüleri	3100x2500x2350	mm
Tezgah Ağırlığı	1200	kg
GÜÇ ÜNİTESİ		
Maksimum Güç	4,5	kVA
Maksimum İşleme Hızı	430	mm ³ /min
Minimum Elektrot Aşındırma Oranı	0,1	%
DİELEKTRİK SIVI		
Dielektrik sıvı kapasitesi	357	l

Dalma erozyon ile işleme deneylerinde farklı çaplardaki elektrotlar işlenerek $\varnothing 16\text{mm}$ çap, 25 mm boy ölçüsüne getirilmiştir. Deneylerde CuBe₂ (Cupro B2), CuAl₁₀Ni₅Fe₄ (Cupral 4M) ve CuCrZr (CuproMax) cinsi elektrot malzemeler kullanılmıştır. Elektrotlara ait görseller Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. CuBe₂, CuAl₁₀Ni₅Fe₄ ve CuCrZr Cinsi $\varnothing 16\text{mm}$ Çapında, 25 mm Boyunda Elektrotlar

Tablo 3. CuBe₂, CuAl₁₀Ni₅Fe₄ ve CuCrZr Cinsi Elektrotların Teknik Özellikleri (Koçak H, 2019)

Özellik	Elektrot			
	Malzemesi	CuBe ₂	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	CuCrZr
Elektrik İletkenliği (MS/m)		15	5	45
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)		1100-1300	650-800	400-500
Akma Mukavemeti (N/mm ²)		900-110	270-400	320-410
Sertlik (HB)		340-390	170-220	135-170
Isıl Genleşme Katsayısı (273-573 K)(10 ⁻⁶ /K)		17,5	16	17
Isıl İletkenlik (20°C)(W/m.K)		106	42	320
Yoğunluk (g/cm ³)		8,3	7,45	8,9

Dalma erozyon işlemi için Türekim firmasından temin edilen COOLMATIC EDM PLUS erozyon sıvısı kullanılmıştır. COOLMATIC EDM PLUS yüksek alevlenme noktasına sahip, düşük viskoziteli, oksidasyona dayanıklı, üstün vasıflı kokusuz bir yağdır. Kolaylıkla filtre edilebilen ve yüksek korozyon korumasına sahip olan COOLMATIC EDM PLUS elektro erozyon tezgahları için özel olarak geliştirilen bir dielektrik sıvıdır.

Tablo 4. COOLMATIC EDM PLUS Sıvısına Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler (URL-1, 10.06.2024)

ANALİZLER	TEST METHODU	DEĞERLER
Görünüş	Görsel	Berrak Sıvı
Koku		Karakteristik
Viskozite 40°C, cst	ASTM D445	2-2,7
Parlama Noktası °C	ASTM D92	95
Yoğunluk (15°C), kg/lt	ASTM D1298	0,765-0,785
Akma Noktası °C	ASTM D97	-3

DIN 1.2343 plastik enjeksiyon kalıp çeliğinin dalma erozyon deneyleri için elektrot tipi, akım, vuruş süresi ve vuruş bekleme süresi olmak üzere 4 adet faktör belirlenmiştir. Belirlenen 4 adet faktör için belirlenen seviyeler Tablo 5'te detaylı olarak gösterilmektedir.

Tablo 5. Deneylere Ait Faktör ve Seviyeler

Sembol	Parametre	Birim	Seviye-1	Seviye-2	Seviye-3
E	Elektrot Tipi		CuBe ₂	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	CuCrZr
A	Akım	Amper	4	8	16
TON	Vuruş Süresi	µs	30	60	120
TOF	Vuruş Bekleme Süresi	µs	45	90	180

3. Sonuç

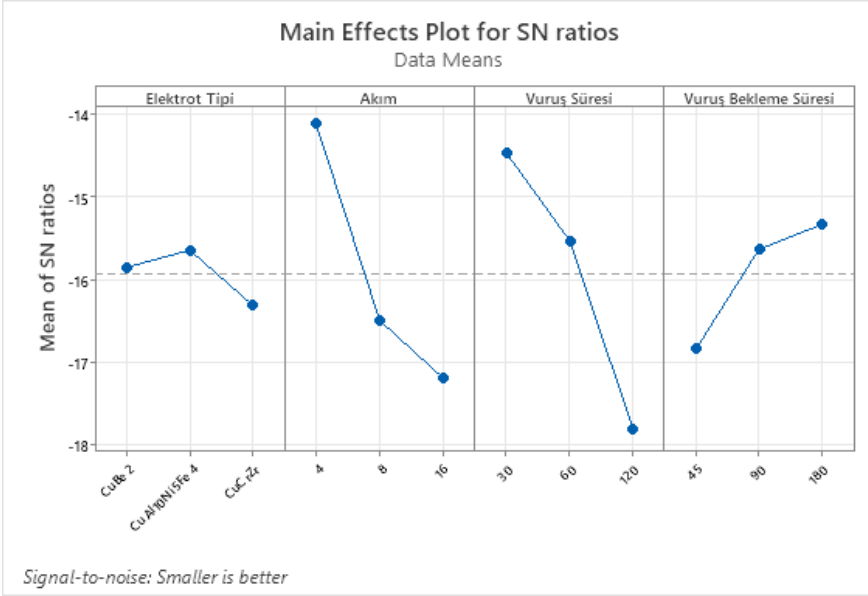
Toplamda 4 adet faktör ve her bir faktör için 3 adet seviye ile belirlenen L27 ortogonal dizilimi Minitab21 programı ile oluşturulmuştur. L27 ortogonal dizilimi Tablo 6'da gösterilmektedir. Dalma erozyon işlemi sonrası iş parçası yüzey

pürüzlülük ölçümü için Mitutoyo SJ-410 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Tablo 6. 1.2343 Çeliği Dalma Erozyon Deneyleri Sonrası Elde Edilen Sonuçlar

No	Elektrot Tipi	Akım	Vuruş Süresi	Vuruş Bekleme Süresi	Ra
1	CuBe ₂	4 A	30 µs	45 µs	4,254 µm
2	CuBe ₂	4 A	60 µs	90 µs	4,973 µm
3	CuBe ₂	4 A	120 µs	180 µs	5,901 µm
4	CuBe ₂	8 A	30 µs	90 µs	5,021 µm
5	CuBe ₂	8 A	60 µs	180 µs	6,551 µm
6	CuBe ₂	8 A	120 µs	45 µs	8,257 µm
7	CuBe ₂	16 A	30 µs	180 µs	5,707 µm
8	CuBe ₂	16 A	60 µs	45 µs	7,972 µm
9	CuBe ₂	16 A	120 µs	90 µs	8,806 µm
10	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	4 A	30 µs	90 µs	4,199 µm
11	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	4 A	60 µs	180 µs	4,430 µm
12	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	4 A	120 µs	45 µs	6,992 µm
13	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	8 A	30 µs	180 µs	5,460 µm
14	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	8 A	60 µs	45 µs	6,656 µm
15	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	8 A	120 µs	90 µs	8,575 µm
16	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	16 A	30 µs	45 µs	7,380 µm
17	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	16 A	60 µs	90 µs	5,595 µm
18	CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	16 A	120 µs	180 µs	6,521 µm
19	CuCrZr	4 A	30 µs	180 µs	4,232 µm
20	CuCrZr	4 A	60 µs	45 µs	5,429 µm
21	CuCrZr	4 A	120 µs	90 µs	6,050 µm
22	CuCrZr	8 A	30 µs	45 µs	5,922 µm
23	CuCrZr	8 A	60 µs	90 µs	6,396 µm
24	CuCrZr	8 A	120 µs	180 µs	8,222 µm
25	CuCrZr	16 A	30 µs	90 µs	6,302 µm
26	CuCrZr	16 A	60 µs	180 µs	6,545 µm
27	CuCrZr	16	120	45	12,193 µm

Deneyler sonucunda en düşük Ra değeri 4,199 μm olarak 10 numaralı deney CuAl10Ni5Fe4 elektrot, 4 A akım değeri, 30 μs vuruş süresi ve 90 μs vuruş bekleme süresi ile elde edilmiştir. Deney sonuçlarına istinaden L27 ortogonal dizilimi Minitab21 programı ile analiz edilip S/N oranları hesaplanmıştır. Taguchi Deney Analiz yöntemlerinde Ra değeri için “En Küçük En İyi” seçeneği seçilmiştir. Minitab21 programı Taguchi analizleri sonucunda yüzey pürüzlülük değeri için elde edilen S/N oranı grafiği Şekil 6’da ve rank değerlerini belirten çıktılar Şekil 7’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülük değeri için en önemli faktörlerin sırasıyla vuruş süresi, akım, vuruş bekleme süresi ve elektrot tipi olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Yüzey Pürüzlülük Değeri için S/N Oranı

Smaller is better

Level	Elektrot		Vuruş Bekleme	
	Tipi	Akım	Vuruş Süresi	Süresi
1	-15,85	-14,12	-14,47	-16,84
2	-15,64	-16,49	-15,53	-15,63
3	-16,31	-17,19	-17,79	-15,33
Delta	0,67	3,07	3,32	1,51
Rank	4	2	1	3

Şekil 7. Çıktılar

Doğrulama deneyi sonucunda CuAl10Ni5Fe4 elektrot, 4 A akım değeri, 30 μ s vuruş süresi ve 180 μ s vuruş bekleme süresi optimum parametreleri ile 2,16 μ m yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir.

ANOVA analizine istinaden yüzey pürüzlülük değerine işlem parametrelerinin yüzdesel etkileri; vuruş süresi için %39,53, akım için %31,02, vuruş bekleme süresi için %10,21 ve elektrot tipi için ise %2,2'dir.

Neden sonuç ilişkisinin olduğu tahmin edilen değişkenler arasındaki ilişkinin belirlenmesinde regresyon modeli kullanılmaktadır (Nas ve diğ., 2018). Yapılan deneysel çalışmalar ve analizler sonucunda birinci derece lineer regresyon modelleri, yüzey pürüzlülük değeri için Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7. 1.2343 Çeliği Dalma Erozyon Deneyleri Sonrası Elde Edilen Sonuçlar

Elektrot Tipi	
CuBe ₂	Ra=3,622+ 0,1750 Akım+ 0,02887 Vuruş Süresi- 0,00852 Vuruş Bekleme Süresi
CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄	Ra=3,441+ 0,1750 Akım+ 0,02887 Vuruş Süresi- 0,00852 Vuruş Bekleme Süresi
CuCrZr	Ra=4,050+ 0,1750 Akım+ 0,02887 Vuruş Süresi- 0,00852 Vuruş Bekleme Süresi

4.Tartışma

Bu sonuçlara göre yüzey pürüzlülük değeri için en optimum parametreler; Cu-Al10Ni5Fe4 elektrot, 4 A akım değeri, 30 μ s vuruş süresi ve 180 μ s vuruş bekleme süresi parametrelerdir. Deneysel çalışmalarda görüldüğü üzere vuruş süresi dalma erozyon prosesi sonrası yüzey pürüzlülüğü etkileyen en önemli parametredir. Vuruş süresinin dalma erozyon işlemini etkileyen en önemli parametre olması sonucu, çelik tipleri farklı olsa dahi Rachman, Purnomo, Fajardini ve Umami (2019) DIN 1.2738 cinsi çeliğe uygulanan deneysel çalışma ile benzer fakat Malo (2023) yine sıcak iş takım çeliği olan DIN 1.2344 çeliğine uygulanan deneyin aksine çıkmıştır. Malo (2023) çalışmasında akım değeri dalma erozyon işlemi için en önemli parametre çıkmıştır. Buradan anlaşılmaktadır ki vuruş süresi ve akım değeri dalma erozyon için yaklaşık olarak aynı öneme sahip iki kritik parametredir. Vuruş süresindeki artış yüzey pürüzlülük değerini artırmıştır. Daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri için vuruş süresi düşürülebilir; fakat bu da dalma erozyon işlem süresinin uzamasına ve iş parçasının daha uzun süre ısıya maruz kalmasına sebep olacaktır. Yüzey pürüzlülük değeri için kritik bir diğer değer ise akım değeridir. Daha yüksek akımlarda dalma erozyon prosesi daha kısa süre-

cektir fakat; bu artışla beraber yüzey pürüzlülük değeri ve elektrot aşınma hızı da artacaktır. Vuruş bekleme süresi ve elektrot tipinin dalma erozyon işlemi sonucu iş parçasında oluşturduğu yüzey pürüzlülüğüne vuruş süresi ve akım kadar etkisin olmadığı görülmüştür. Rachman, Purnomo, Fajardini ve Umami (2019) DIN 1.2738 cinsi çeliğine, Malo (2023) DIN 1.2344 çeliğine ve Erman (2021) MIRRAX çeliğine uyguladığı deneysel çalışma sonuçlarına paralel olarak vuruş bekleme süresi ve elektrot tipi yüzey pürüzlülük değeri için diğer parametrelere göre daha az etkili olmuştur. Vuruş bekleme süresi ve elektrot tipi yüzey pürüzlülük değeri için diğer parametrelere göre daha az etkili olsa da bu iki parametre dalma erozyon işleminin süresine, dielektrik sıvının temizlenmesine, malzeme kaldırma hızına ve elektrot aşınma oranına etkileri sebebiyle dalma erozyon işlemi için kritik öneme sahiptir. CuAl10Ni5Fe4 elektrotun diğer elektrotlara göre daha düşük elektrik iletkenlik özelliği bu sonuca sebep olmuştur. Taguchi yöntemi ile 81 adet deney ile yapılacak çalışma 27 adet deney ile yapılmıştır. Deney sayısı azaltılarak zaman ve maliyetten tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca yapılan ANOVA çalışması ile yüzey pürüzlülük değerine parametrelerinin yüzdesel etkileri; vuruş süresi için %39,53, akım için %31,02, vuruş bekleme süresi için %10,21 ve elektrot tipi için ise %2,2 tespit edilmiştir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Teşekkür

Deneylerin gerçekleştirilmesi için tüm imkanlarını paylaşan Neta Kalıp firmasına ve sabrından dolayı değerli eşime teşekkür ederim.

Kısaltma ve Semboller

- Al : Alüminyum
- ASTM : Amerikan Malzeme ve Testler Derneği
- Be : Berilyum
- C : Karbon
- CNC : Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
- Cr : Krom
- DC : Doğru Akım
- DIN : Alman Standardizasyon Enstitüsü
- E : En, mm

H	: Yükseklik, mm
L	: Boy, mm
log	: logaritma
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
PNC	: Pozitif Negatif Kontrol
Ra	: Yüzey Pürüzlülüğü, μm
S	: Kükürt
S/N	: Sinyal/Gürültü
Si	: Silisyum
V	: Vanadyum
Zr	: Zirkonyum

Kaynakça

- Aydın M., Gavas M., Yaşar M. Altunpak Y. (2022). *Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri Talaşsız İmalat – Talaşlı İmalat – Eklemeli İmalat*. (5.Baskı). İstanbul:Seçkin Yayıncılık ISBN:9789750274459
- Bakal J.A., Defroda, S.F., Eltorai, A.E.M., Owens, B.D. (2023). *Translational Sports Medicine* (1st ed.). USA:Academic Press.Doi: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-04032-6>
- Bayramoğlu, M., Duffill, A. W. (1995). Manufacturing linear and circular contours using CNC EDM and frame type tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35,1125–1136. Doi: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)90407-D](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)90407-D)
- Catoen, B., Rees, H. (2022). *Injection Mold Design Handbook* (1st ed.). Münih:Hanser. Doi: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01637-3>
- Crookall, J.R., Heuvelman, C.J., (1971). Electro-discharge machining the state of the art, *Annals of the CIRP*, 20(1), 113–120.
- Dursun, K. (2007). *Elektro Erozyon ile İşlemede Tel Demeti Elektrodun Performansının Deneysel ve Teorik İncelenmesi* (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erman, B. (2021). *Mirrax Kalıp Çeliğinin Elektro Erozyon Yöntemi ile İşlenebilirliğinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

- Ho, K.H., Newman, S.T. (2003). State of the art electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43,1287-1300. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7)
- Kalpakistan S., Schmid S.R., Bakkal M. (2022) *Mühendislik Malzemeleri İçin İmalat Yöntemleri 6. Basımdan Çeviri*, (1.Baskı). İstanbul:Literatür Yayıncılık. ISBN:9789750409226
- Kaya, E. (2022). *PEM Yakıt Pili Performansının Taguchi Metodu ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa.
- Koçak H. (2019). *Takım Çelikleri*. (10. Baskı). Kocaeli:Bolokur Teknik Yayıncılık. ISBN:9786056404849
- Malo, Y. (2023). *DIN 1.2344 Çeliğinin Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.
- Mennig, G., Stoeckert, K. (2013). *Mold-Making Handbook* (3rd ed.). Münih:Hanser. Doi: <https://doi.org/10.3139/9781569905500>
- Nas E., Argun K., Zurnacı E. (2018). AISI 1.2738 Çeliğinin Elektro-Erozyon Tezgahında Grafit Elektrot ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 574-581. Doi: <https://doi.org/10.29130/dubited.413185>
- Rachman F., Purnomo D. A., Fajardini A. R. Umami R. R. (2019). Optimization of Surface Roughness of AISI P20 on Electrical Discharge Machining Sinking Process using Taguchi Method, *JTAM*, 5(1), 50-59.Do: <https://doi.org/10.31764/jtam.v5i1.3291>
- Schumachera B.M., Krampitzb R., Kruthc J.P., (2013). Historical phases of EDM development driven by the dual influence of "Market Pull" and "Science Push. *Procedia CIRP* 6(1), 5-12, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.001>
- Singh, S., Bhardwaj, A., (2011) Review to EDM by using water and powder-mixed dielectric fluid, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10(2), 199-230, Doi: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.102014>
- Ünverdi M., Küçük H., (2019). Taguchi Yöntemi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak Tasarlanan Levhalı Isı Değiştiricilerin Performanslarının Karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 25(4),373-386, Doi: <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.35493>
- URL-1: <https://turekim.com/urun/metal-islem> (Erişim Tarihi: 10.06.2024)



HAVACILIK ALANINDA ÜRÜN YAŞAM DÖNGÜSÜ YÖNETİMİ VE DİJİTAL İKİZ BAĞLANTISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İsmail DEMİRCAN*

TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayi (Fethiye Mahallesi, Havacılık Bulvarı No:17 06980
Kahramankazan Ankara)

ORCID No : <https://orcid.org/0009-0008-4905-927X>

Anahtar Kelimeler

Öz

Dijital ikiz, ürün yaşam döngüsü (PLM), tasarım dijital ikizi, üretim dijital ikizi, performans dijital ikizi

Günümüzde, endüstride dijital dönüşüm giderek daha önemli hale gelmektedir, ürünlerin daha kompleks hale gelmesi, ürün geliştirme süreçlerinin hızlandırılıp maliyetlerin azaltılmaya çalışılması, Dijital İkiz'ler ve simülasyonların önemini arttırmaktadır. Dijital İkiz'in artan değeri, havacılık endüstrisindeki kuruluşları araştırma ve geliştirme çalışmalarında Dijital İkiz'i aktif olarak kullanmaya teşvik etmektedir. Ancak birçok firma, Dijital İkiz oluşturma sürecinde kullanılan teknolojilerin avantajları ve dezavantajları konusunda hemfikir olamadıklarından nereden başlanacağı konusu henüz netlik kazanmamıştır. Bu makale okuyucularına havacılık alanında bir inceleme sunarak mevcut durum hakkında genel bir bakış sağlamaktadır. Makalede öncelikle Dijital İkiz kavramı, bu kavramın gelişim süreci ve yapılan çalışmalar incelenmiş, havacılık alanında faaliyet gösteren şirketler için Dijital İkiz oluşturulmasının ürün geliştirme sürecine etkisine değinilmiştir. Çalışmanın son bölümünde Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (Product Lifecycle Management veya kısaca PLM) sistemlerinin Dijital İkiz oluşturma sürecine katkısı ve ürün geliştirme süreçlerinde şirketlere sağladığı avantajlar değerlendirilmiştir.

* idemircan@tai.com.tr

doi : 10.46399/muhendismakina.1464112

EVALUATION OF PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT AND DIGITAL TWIN INTEGRATION IN AVIATION FIELD

Keywords

Digital twin, product lifecycle management (PLM), design digital twin, manufacturing digital twin, performance digital twin

Abstract

In today's world, digital transformation is becoming increasingly crucial in industry. The Digital Twins and simulations become much more important with growing complexity of products, the need to accelerate product development processes while reducing costs. The increasing value of Digital Twins is prompting organizations in the aviation industry to actively utilize them in research and development efforts. However, due to the idea of difficulties of using Digital Twins in the industries, product developers don't have a clear idea where to begin. This article provides readers with a general overview of the current situation by offering an examination of the aviation sector. Initially, the concept of Digital Twin, its evolution, and relevant studies are explored, followed by an examination of the impact of creating Digital Twins for companies operating in aviation on the product development process. The final section of the study evaluates the contribution of Product Lifecycle Management (PLM) systems to the process of creating Digital Twins and the advantages they provide to companies in product development processes.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 03.04.2024

Kabul Tarihi : 10.10.2024

Research Article

Submission Date : 03.04.2024

Accepted Date : 10.10.2024

Extended Abstract

Introduction

The aircraft design process typically requires a multidisciplinary approach, integrating the disciplines of engineering, technology, and industrial design. This process is continually evolving, facilitating the emergence of more efficient and innovative aircraft through the integration of new technologies and methods. Presently, the tracking and connections of these processes are being attempted through the use of Product Lifecycle Management (PLM) software. Through this connection, the scope of any problem at any location can be determined, and which points need improvement can be identified retroactively. Due to increased competitive conditions, there is a desire within the aviation industry to rapidly bring products to market and create cost advantages. Therefore, alongside PLM systems, the concept of the Digital Twin is also emphasized.

Objectives

This work is prepared to explain the concepts of Digital Twin and PLM, their uses, and benefits in the aviation industry. A Digital Twin is a digital replica of a physical object or process in the real world. It is used to predict the exact specifications, behaviors, and performance of an object or process. Digital Twins facilitate cost reduction functions through simulations. Nowadays, many tests can be conducted through digital models, allowing numerous tests in the aviation field to be performed without the need for a physical model. Through these tests, design optimization can be swiftly achieved, leading to the production of the most mature design. Similarly, simulating production processes with Digital Twins increases efficiency, while real-time data analysis accelerates error detection and correction. After product delivery, maintenance and repair processes can be optimized using Digital Twins. Lastly, Digital Twins contribute to in-house efficiency through training.

The increasing power of simulation technologies and the use of High-Performance Computing (HPC) systems have elevated the importance of creating Digital Twins by yielding results very close to those obtained from real models in many tests. These tests have shortened design period and production processes and significantly reduced costs.

Digital Twins evolve alongside real systems throughout their entire lifecycle and integrate existing information. They not only describe behavior but also derive solutions for real systems, optimizing their behavior throughout operation and service. For a Digital Twin to function at the desired level of efficiency, the entire process needs to be within a network or Digital Thread. This enables access to the source of problems and facilitates which needs adjustments. Structures providing this Digital Thread are also facilitated by PLM systems.

Product Lifecycle Management (PLM) manages processes from product design to the end of its lifecycle. PLM plays a significant role in product design and development,

aiding in the digitalization of the entire process and increasing efficiency. In product design, PLM enables collaboration among designers and engineers by providing a solution and sharing design data. It facilitates connections between processes, allowing all stakeholders to access the same data and accelerating decision-making processes. Thus, design changes, production updates, or service requests can be swiftly communicated to other processes for proper management.

In PLM processes, substantial benefits are derived from digital data. The digital replica of the product enables the simulation of processes in a digital environment, pre-determining problems in processes and providing access to the source of the problem through the Digital Thread. Digital Twins are utilized at every stage of PLM process, but it wouldn't be accurate to express the Digital Twin throughout the entire process under a single concept. To better understand the concept of Digital Twins, all structures reflecting the behavior of the physical product in every process need to be evaluated as Digital Twins.

The 3D models used from the ideation stage to production represent the Design Digital Twin, digital factory simulations simulating production processes represent the Production Digital Twin, and data simulating maintenance activities and operational processes after product delivery constitute the Performance Digital Twin. Although PLM and Digital Twin individually provide numerous benefits, their combined management creates a much more efficient product management system.

Conclusion

This study emphasizes the importance of Digital Twins in the aviation industry and their critical role in Product Lifecycle Management (PLM) systems. The fact that scattered data can reduce traceability underscores the importance of structuring the entire Digital Twin framework within the PLM platform and consolidating data in a common system. The integration of PLM systems with Digital Twins enables companies to access faster and more reliable information throughout the lifecycle of their products, make quicker decisions, and manage their processes more effectively. As a result, this integration has the potential to enhance companies' competitive advantages by improving product quality and customer satisfaction.

1. Giriş

Hava aracı tasarım süreci genellikle beş adımda gerçekleşir. Öncelikle ihtiyaç anlaşıldıktan sonra gereksinimler teknik kısıtlamalar belirlenir bu aşamada kavramsal tasarımlar yapılır Daha sonra belirlenen gereksinimler doğrultusunda da bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımları kullanılarak, hava aracının üç boyutlu (3B) modelleri oluşturulur ve çeşitli senaryolarda simülasyonları yapılır. Tasarım onaylandıktan sonra, bir prototip üretimi yapılır. Bu prototip, tasarımın gerçek dünya koşullarında performansını test etmek için kullanılır. Prototip testleri genellikle aerodinamik testler, yapısal dayanıklılık testleri, motor performans testleri ve uçuş testleri gibi çeşitli alanlarda gerçekleştirilir. Bu testler, tasarımın hedeflenen performansı sağlayıp sağlamadığını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Prototip testlerinin başarılı olması durumunda, hava aracı sertifikasyon sürecine geçer. Sertifikasyon süreci, ilgili otoriteler tarafından hava aracının güvenliğini ve uygunluğunu doğrulamak için yapılan kapsamlı testler içerir. Sertifikasyon sürecinin tamamlanmasının ardından, seri üretime geçilir ve hava aracı piyasaya sunulur. Hava aracı tasarım süreci, üretimin ve teslimatın ardından da devam eder. Hava aracının kullanımı sırasında bakımı ve destek hizmetleri sürekli olarak sağlanmalıdır. Bakım ve destek hizmetleri sürekli olarak sağlanmalıdır; bu, hava aracının güvenliğini, verimliliğini ve görev performansını korumak için önemlidir. Belirtilen süreç, Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Hava Aracı Proje Süreci

Hava aracı tasarım süreci genellikle multidisipliner bir yaklaşım gerektirir ve mühendislik, teknoloji ve endüstriyel tasarım disiplinlerini bir araya getirir. Bu süreç, sürekli olarak geliştirilmekte ve yeni teknolojilerin ve yöntemlerin entegrasyonu ile daha verimli ve yenilikçi hava araçlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Günümüzde PLM yazılımları kullanılarak bu süreçlerin takibi ve bağlantıları yapılmaya çalışılmaktadır. PLM sistemleri, süreçlerdeki problemin etki alanını belirlemekte ve geriye dönük olarak iyileştirme noktalarını tespit etmeye yardımcı olmaktadır. Artan rekabetçi koşullar nedeniyle havacılık endüstrisinde ürünlerin hızlı bir şekilde pazara sunulmak istenmesi ve maliyet avantajının oluşturulması için PLM sistemleri ile birlikte Dijital İkiz kavramı da ön plana çıkmaktadır.

2. PLM ve Dijital İkiz Nedir?

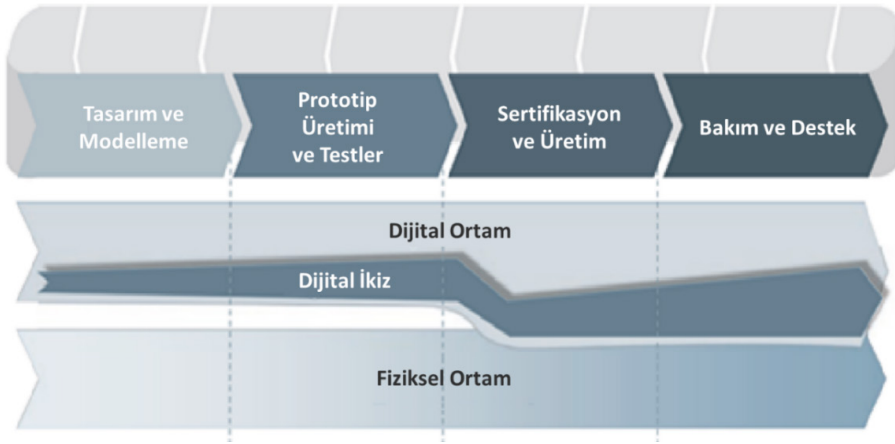
Bu makale hazırlanırken PLM ve Dijital İkiz kavramları hakkında yazılmış maka-

leler araştırılmış, konunun daha iyi açıklanabilmesi için bu makalelerden alıntılar yapılmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.1 Dijital İkiz

Dijital İkiz, gerçek dünyadaki bir nesnenin veya sürecin dijital bir kopyasıdır. Dijital İkiz kavramı, fiziksel bir varlığın dijital temsili ve hatta daha fazlası olarak tanımlanmaktadır (Mercimek ve Geçkil, 2021). Bir Dijital İkiz, nesnenin veya sürecin tam özelliklerini, davranışlarını ve performansını öngörmek için kullanılır. Bu teknoloji, özellikle üretim sektöründe yaygın olarak kullanılmakta olup, üretim süreçlerinde gerçek zamanlı üretim çizelgeleme gibi alanlarda etkin bir şekilde uygulanmaktadır (Bal, Gevrek ve Demir 2022). Dijital İkiz'ler, gerçek dünyadaki nesnelerin veya süreçlerin daha iyi anlaşılmasına, optimize edilmesine ve gelecekteki sonuçların simülasyonuna yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır (Mete, 2023). Dijital İkiz, sanal süreç tanımını da içermeli ve en önemlisi uçtan uca, ürünün yaşam döngüsü boyunca karşılaşılabilecek tüm fiziksel koşulları sanal olarak oluşturmalıdır. Bu hedefe ulaşıldığında, Dijital İkiz, şirketlere yeni gelir kaynakları ve iş fırsatları sağlayan yeni iş modelleri oluşturabilir. Şekil 2 de belirtildiği gibi Dijital İkiz, fikir aşamasında itibaren ortaya çıkar ve ürün yaşamı boyunca ürün ile birlikte gelişir ve yaşamını sürdürür.



Şekil 2. Dijital İkiz, Süreç ve Fiziksel Ortam İlişkisi (Li, Aslam, Wilwan ve Perinpanayagam, 2021)

Dijital İkiz'lerin birçok avantajı vardır.

Performans İzleme ve Analiz: Dijital ikizler, hava araçlarının performansını gerçek zamanlı olarak izlemeye olanak tanır. Bu, uçakların motor performansından

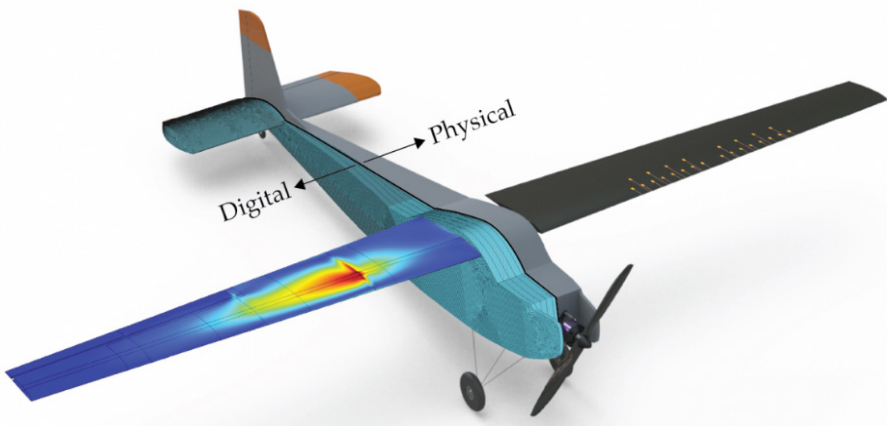
aerodinamik özelliklerine kadar geniş bir yelpazede veri toplama ve analiz yapmayı mümkün kılar. Örneğin, dijital ikizler aracılığıyla motor aşınması ve yakıt verimliliği gibi kritik performans göstergeleri izlenebilir ve optimize edilebilir.

Bakım ve Arıza Tahminleri: Dijital ikizler, bakım süreçlerini optimize etmek ve arıza tahminleri yapmak için kullanılır. Bu, uçakların arıza olasılıklarını öngörerek planlı bakım işlemlerinin zamanını belirlemede yardımcı olur. Özellikle, uçak bileşenlerinin kullanım ömürleri ve arızalar üzerindeki etkileri dijital ikizler aracılığıyla daha doğru bir şekilde tahmin edilebilir.

Tasarım ve Simülasyon: Dijital ikizler, tasarım aşamasında hava araçlarının performansını simüle etmek için kullanılır. Bu, mühendislerin yeni tasarımları fiziksel prototipler oluşturmadan önce sanal ortamda test etmelerini sağlar. Ayrıca, tasarım değişikliklerinin performans üzerindeki etkilerini değerlendirmeye olanak tanır, böylece daha iyi tasarım kararları alınabilir.

Operasyonel Verimlilik: Uçuş operasyonları sırasında dijital ikizler, uçakların performansını ve yakıt tüketimini izleyerek operasyonel verimliliği artırabilir. Bu, uçuş planlamasını ve gerçek zamanlı operasyonel kararları optimize etmede önemli bir rol oynar. Dijital ikizler, uçuş sırasında toplanan verileri analiz ederek, uçuş koşullarına göre en iyi performansı sağlamak için gerekli ayarlamaları yapabilir (Li ve diğ., 2021).

Eğitim ve Simülasyon: Dijital ikizler, pilot eğitimleri ve simülasyonları için de kullanılabilir. Uçuş simülatörlerinde kullanılan dijital ikizler, gerçek uçuş koşullarını ve senaryoları taklit ederek, pilotlara gerçek uçuş deneyimlerine benzer eğitim fırsatları sunar. Bu, eğitim süreçlerini daha etkili hale getirir ve pilotların kriz durumlarına hazırlıklı olmalarını sağlar.

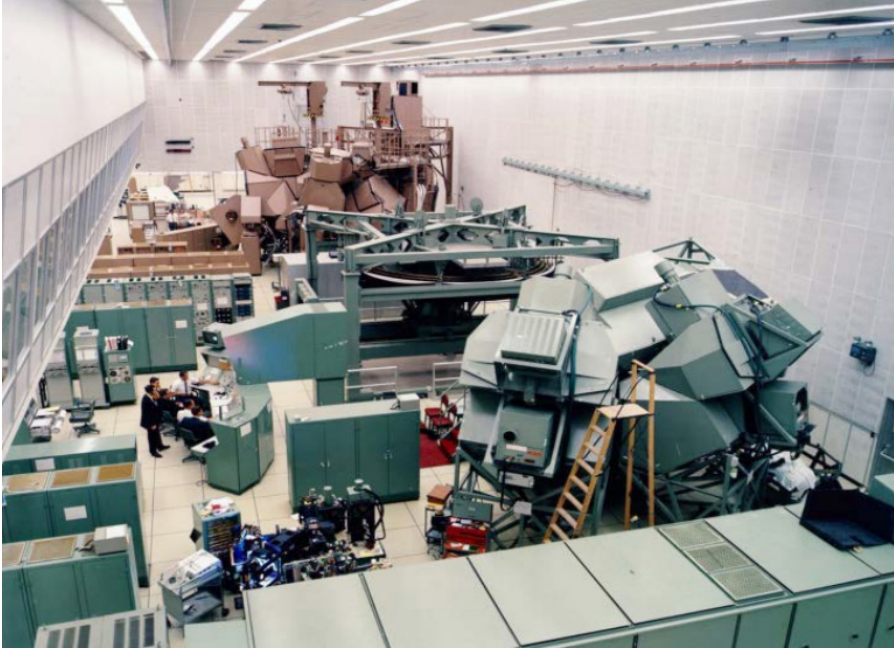


Şekil 3. Dijital İkiz ve Fiziksel Model (Advanced Technique for Developing Digital Twins Makes Tech Universally Applicable, 2021)

2.1 Havacılık Alanında Dijital İkiz

Havacılıkta Dijital İkiz'ler, uzay bilimi, güvenlik ve savunma, ticari uçaklar ve havacılık üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır; tasarımdan ürün teslimine kadar faaliyetleri kapsar (Li ve diğ., 2021). Bu dijital kopyalar, uçak yapılarının ömrünü tahmin etmek, yapısal bütünlüğü sağlamak ve uçağın operasyonel ömrü boyunca aşınma ve yorgunluğu analiz etmek için önemlidir (Tuegel, Ingrassia, Eason ve Spottswood, 2011). Ayrıca, Dijital İkiz'ler özellikle jet motorları gibi yüksek değerli ekipmanların analizinde kullanılarak önemli ölçüde maliyet tasarrufu ve güvenilirlik iyileştirmeleri sağlamaktadır (Khajavi, Motlagh, Jaribion, Werner ve Holmström, 2019).

İkiz kavramı ilk olarak NASA'nın Apollo 13 programı esnasında ortaya çıkmıştır. NASA bu program için en az iki uzay aracı oluşturarak dünyada farklı koşullarda bu aracı test etti ve ismini ikiz olarak tanımladı (Li ve diğ., 2022).



Şekil 4. Apollo 13 İkizi, Yeşil Bölüm Ana Modül, Kahverengi Bölüm Komuta Modülü, (Apollo Mission Simulators, 2024)

Diğer iyi bilinen donanım ikiz örneği de "Demir Kuş" (Iron Bird) denilen havacılık alanında uçağın hayati sistemlerini test ve optimize etmek için kullanılan araçlardır (Shafto ve diğ., 2010). Demir Kuş uçağın operasyon koşullarında karşılaşılabilecek yüklerin benzerlerini oluşturularak laboratuvar ortamında test edilmesini

sağlayan test düzeneğidir. Bu düzenek sayesinde birçok test yine fiziksel modeller üzerinde yapılmakta ve son ürünün şekillenmesi için avantaj sağlamaktadır.

İlk kez 2002 yılında Mihigan Üniversitesi'nden Profesör Michael Grives, sunumunda akıllı üretim ve geleceğin fabrikaları için idealize edilmiş bir yaşam döngüsü yönetimi yaklaşımı önerdi ve bunu Dijital İkiz olarak adlandırdı. Ancak bu kavramdan 2002 ile 2010 yılları arasında yapılan çalışmalarda çok nadir olarak bahsedildi. (Tao, Zhang, Liu ve Nee, 2019)

2010'ların başında, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Büyük Veri teknolojilerinin olgunlaşması ve endüstrileşmesi ile birlikte Dijital İkiz kullanımının pratikte hazır hale geldiği görüldü. Bu dönemde Nasa ve ABD Hava Kuvvetleri, havacılık alanında Dijital İkiz'lerin Ar-Ge'sine önemli katkılarda bulundular. (Li ve diğ., 2022).

Günümüzde simülasyon teknolojilerinin artan gücü ve Yüksek Başarımlı Hesaplama (High Performance Computing, HPC) sistemlerinin kullanımı ile birçok test, gerçek model üzerinde alınan sonuçlara çok yakın sonuçlar vererek Dijital İkiz oluşturmamın önemini arttırmıştır. Bu testler ile tasarım ve üretim süreçleri kısalması; maliyetlerin de ciddi oranlarda azalmasını sağlamıştır.

Dijital dönüşüm sürecinde havacılık alanında her bir süreçte dijital modellerden farklı şekillerde faydalanmak mümkün hale gelmiştir. Ürünün fikir aşamasından tasarım üretim ve bakım sürecinde de farklı dijital modeller kullanılmaktadır bu modellerin her birini Dijital İkiz olarak nitelendirmemiz mümkündür. Bu nedenle Dijital İkiz kavramını tek bir model üzerinden anlatmak doğru bir yaklaşım olmayacaktır.

Bu çalışmada Dijital İkiz kavramı 3 başlık altında detaylandırılarak açıklanacaktır.

2.1.1 Tasarım Dijital İkizi:

Havacılık alanında Tasarım Dijital İkizi, konsept tasarım aşamasından üretim sürecine kadar olan süreçte farklı dijital modellerin entegrasyonunu ifade eder. Tasarım dijital ikizi, fiziksel bir hava aracının dijital bir temsili olarak işlev görür ve bu süreç boyunca çeşitli dijital modellerin bir araya gelmesini sağlar (Tao ve diğ., 2019). Bu kavram, hava aracının dış kabuk geometrisinin şekillendirilmesinden başlayarak, yapısal tasarımı ve sistem entegrasyonuna kadar geniş bir yelpazeyi kapsar.

İlk aşamada, hava aracının operasyonel gereksinimlerine göre dış kabuk geometrisi belirlenir. Bu süreçte, farklı görev koşullarına uygun olarak aerodinamik analizler gerçekleştirilir ve dış kabuk geometrisi optimize edilir. Bu analizler, hava aracının performansını ve verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Aerodinamik performansı simüle etmek için kullanılan dijital modeller, hava akışını ve aerodinamik kuvvetleri değerlendirmede önemli bir rol oynar.

Dış kabuk geometrisinin yanı sıra, yapısal bütünlüğü sağlamak amacıyla üretilebilir yapısal tasarımlar oluşturulur. Bu aşamada, hava aracının üç boyutlu modelleri detaylı bir şekilde tasarlanır ve analiz edilir. Bu yapıların dijital temsilleri, fiziksel üretim öncesi testler ve değerlendirmeler için kullanılır (Jin ve diğ., 2020). Bu yapılar, dijital ikizin yapısal bileşenlerini oluşturur ve fiziksel prototiplerin gereksinimlerini azaltır.

Tasarım dijital ikizi, hava aracının tüm bileşenlerini içerecek şekilde genişletilebilir. Bu kapsamda, hava aracının sistemleri, kontrol mekanizmaları ve diğer fonksiyonel bileşenleri de dijital olarak modellenir. Sistem davranışlarını analiz etmek için kullanılan yazılımlar, bu modellerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için önemli bir araçtır. Böylece, tüm sistemler bir bütün olarak ele alınabilir ve sistem entegrasyonunda yaşanabilecek problemler önceden tespit edilebilir (Bollini, Rogers ve Tsuji, 2021).

Sonuç olarak, tasarım dijital ikizi kavramı, havacılık endüstrisinde fiziksel ve dijital sistemlerin entegrasyonunu sağlayarak, tasarım süreçlerini daha verimli ve güvenilir hale getirir.

2.1.2 Üretim Dijital İkizi:

Üretim dijital ikizi, ürünün üç boyutlu modelinden farklı olarak, üretim sürecini analiz etmek ve verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan simülasyonlar ve dijital modellerden oluşur (Tao ve diğ., 2019). Üretim dijital ikizi, üretim hattının dijital bir kopyasını oluşturma yeteneği sunarak, üretim süreçlerinin optimize edilmesine ve verimliliğin artırılmasına olanak tanır. Bu kavram, üretim sürecinin dijital temsili üzerinden simülasyonlar yaparak, olası darboğazları ve verimlilik sorunlarını önceden tespit etme imkanı sağlar.

Üretim dijital ikizi ile üretim hatlarının dijital kopyaları oluşturulabilir. Bu dijital modeller, üretim süreçlerinin sanal ortamda simüle edilmesini sağlar ve böylece üretim hattında meydana gelebilecek sorunlar, darboğazlar ve verimsizlikler önceden belirlenebilir. Simülasyonlar, üretim hattının tüm aşamalarını analiz ederek, sürecin optimize edilmesine ve kaynak kullanımının verimli hale getirilmesine katkıda bulunur. Bu, üretim sürecinde gerçek zamanlı veri akışının ve performans analizlerinin entegrasyonunu içerir.

Günümüzde, üretim tezgahlarında kullanılan sensörler ve bu sensörlerden toplanan verilerin anlamlandırılması, dijital ve fiziksel verilerin entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Sensörler tarafından sağlanan gerçek zamanlı veriler, dijital ikizlerle birleştirilerek üretim sürecinin daha doğru bir şekilde izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlar. Bu veri entegrasyonu, üretim sürecindeki anormalliklerin ve verimlilik düşüşlerinin hızlı bir şekilde tespit edilmesini ve düzeltilmesini sağlar (Lee, Bagheri ve Kao, 2022).

Dijital ikizler, üretim süreçlerinin sürekli olarak izlenmesine ve optimize edilmesine olanak tanır. Bu süreç, üretim sürecinin her aşamasını dijital olarak temsil ederek, üretim hatlarını ve süreçlerini daha verimli hale getirir. Ayrıca, üretim dijital ikizleri, bakım ve onarım süreçlerinin yönetilmesine, üretim hattının performansının artırılmasına ve genel üretim verimliliğinin yükseltilmesine önemli katkılarda bulunur (Brettel, Friederichsen, Keller ve Rosenberg, 2014).

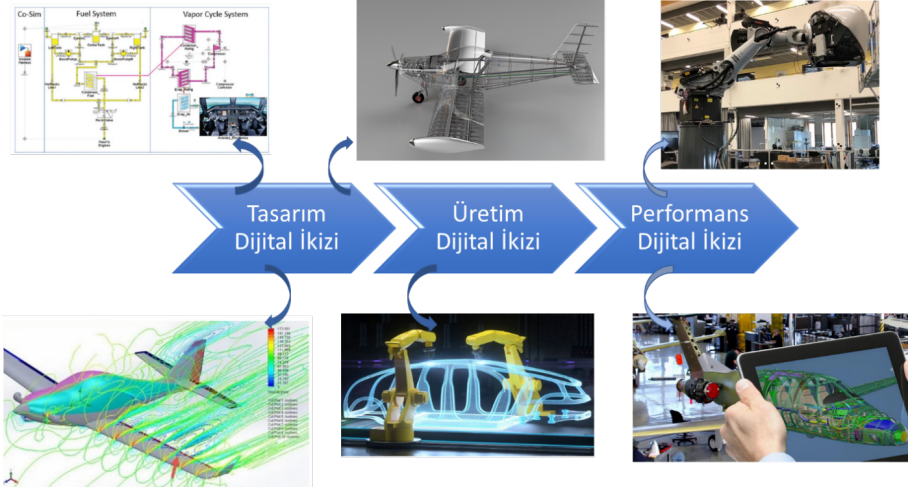
2.1.3 Performans Dijital İkizi:

Havacılık endüstrisinde, ürünlerin teslim edilmesinden sonra bakım, eğitim ve performans yönetimi gibi süreçler devam eder. Performans dijital ikizi, bu süreçlerde kritik bir rol oynar ve uçakların operasyonel performansını izleyerek bakım ve eğitim süreçlerini optimize etmek için kullanılır (Tao ve diğ., 2019).

Uçuş eğitimleri, genellikle simülatörler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu simülatörler, gerçek uçuş koşullarını taklit ederek pilotlara çeşitli senaryoları deneyimleme fırsatı sunar. Simülatörler, dijital ikiz teknolojisi ile desteklenerek daha gerçekçi ve etkili eğitimler sağlanabilir. Performans dijital ikizi, simülatörlerin doğruluğunu ve pilot eğitimlerinin etkinliğini artırarak, pilotların acil durumlar ve çeşitli uçuş koşulları ile başa çıkabilme yeteneklerini geliştirir (Bollini ve diğ., 2021).

Bakım süreçlerinde ise, artırılmış gerçeklik (AR) ve dijital ikiz teknolojileri birlikte kullanılarak bakım işlemleri daha verimli hale getirilir. AR modelleri, bakım personeline gerçek zamanlı olarak gerekli bilgileri ve talimatları sağlayarak hataların önüne geçilmesine yardımcı olur. Performans dijital ikizi, bu modelleri destekleyerek bakım süreçlerinin doğru ve etkili bir şekilde yürütülmesini sağlar. Hava aracının kullanım esnasında da çeşitli sensörler ile elde edilen veriler anlamlandırılarak bakım süreçleri önceden belirlenebilir. Boeing firması 2 motorlu 737 uçağının motoru üzerine yerleştirdiği sensörler ile 6 saatlik uçuşta 300.000 parametre ile veri toplayarak her bir motor için saatte 20 terabayt veri elde etmiş ve bu veriyi anlamlandırarak bakım süreçlerini optimize etmeye çalışmıştır (Badea, Alin ve Boncea 2018). Bu tür bir veri analizi, performans dijital ikizinin bakım süreçlerinde proaktif bir yaklaşım benimsemesine ve bakım ihtiyaçlarının önceden tahmin edilmesine olanak tanır (Lee ve diğ., 2022).

Sonuç olarak, performans dijital ikizi, havacılık endüstrisinde bakım ve eğitim süreçlerinin optimize edilmesinde önemli bir araçtır. Eğitim simülatörleri ve AR modelleri ile entegre çalışarak, uçuş ve bakım süreçlerinde yüksek doğruluk ve verimlilik sağlar. Ayrıca, gerçek zamanlı veri analizi ile bakım süreçlerini daha etkin bir şekilde yönetmeye yardımcı olur.



Şekil 5. Farklı Dijital İkiz Modelleri (ASTRA Aerospace Design Engineering 2024; Digital Transformation Technology in Aerospace & Defense,2024; Using System Simulation to Manage Increasing Thermal Loads on Aircraft Fuel Systems, 2017)

Dijital İkiz, fiziksel bir varlığın dijital bir temsilidir ve bu temsil, fiziksel nesnenin yaşam döngüsü boyunca güncellenir ve entegre edilir. Dijital İkiz'in temel işlevi, ürün geliştirme sürecinde başlar ve ürünün işletim ve servis aşamalarında da devam eder. Yani, Dijital İkiz yalnızca ürünün davranışlarını tanımlamakla kalmaz, aynı zamanda bu davranışları optimize etmek ve performansını artırmak için kullanılabilir (Grieves, 2014). Dijital İkiz'in etkili bir şekilde çalışabilmesi için tüm sürecin entegre bir Dijital Örgü içerisinde bulunması gerekmektedir. Dijital Örgü, birden fazla dijital varlığın birbirleriyle ve fiziksel dünyayla etkileşim içinde olduğu bir yapı olarak tanımlanabilir. Bu yapı, ürün yaşam döngüsü boyunca verimliliği artırma ve performansı izleme konularında kritik öneme sahiptir (Tao ve diğ., 2019). Dijital İkiz'in tüm yaşam döngüsü boyunca verimli bir şekilde çalışması, bu entegrasyon sayesinde mümkün olur. Dijital Örgü'nün sağladığı bu bağlantı, sorunların kaynaklarını belirlemeyi ve gerekli düzenlemeleri yapmayı kolaylaştırır (Fuller, Fan, Day ve Barlow, 2020). Dijital Örgü'yü sağlamak için kullanılan yapılar arasında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) sistemleri önemli bir rol oynar. PLM sistemleri, ürün bilgilerini, süreçlerini ve verilerini merkezi bir yerde toplar ve yönetir, bu da Dijital İkiz'in etkinliğini artırır. PLM sistemleri, ürün tasarımından üretime, servise kadar tüm aşamalarda verimliliği artırmak ve veri bütünlüğünü sağlamak için kullanılır. Dijital İkiz'in bu sistemlerle entegrasyonu, ürün verilerinin gerçek zamanlı olarak güncellenmesini ve optimize edilmesini mümkün kılar.

2.2 Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM)

Havacılık endüstrisi, yüksek güvenlik standartları, karmaşık mühendislik süreçleri ve sürekli yenilik gerektiren bir sektördür. Bu bağlamda, ürün yaşam döngüsü yönetimi (PLM) sistemleri, havacılık şirketleri için kritik bir rol oynamaktadır. PLM, bir ürünün tasarımı aşamasından emekli edilmesine kadar olan tüm yaşam döngüsünü kapsamlı bir şekilde yönetmeyi sağlayan entegre bir yaklaşımdır. Havacılık sektöründe PLM'in önemi, şu başlıca nedenlerle öne çıkmaktadır:

Gelişmiş Tasarım ve Mühendislik Yönetimi: Havacılık sektörü, karmaşık mühendislik bilgisi gerektiren tasarımlar ile karakterizedir. PLM sistemleri, mühendislik verilerini merkezi bir platformda toplar ve yönetir, böylece mühendislerin tasarım değişikliklerini kolayca izlemelerini ve koordine etmelerini sağlar. Bu, hataların en aza indirilmesine ve tasarım süreçlerinin daha verimli bir şekilde yürütülmesine olanak tanır.

Regülasyon ve Uyumluluk: Havacılık endüstrisi, sıkı regülasyonlara ve standartlara tabidir. PLM sistemleri, ürünlerin bu regülasyonlara uyumlu olarak geliştirildiğinden emin olmak için gerekli belgeleri, onayları ve test sonuçlarını merkezi bir veri havuzunda saklar. Bu, denetim süreçlerini kolaylaştırır ve uyumluluğun sürekliliğini sağlar. Özellikle, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) ve Federal Havacılık İdaresi (FAA) gibi kuruluşlar tarafından belirlenen standartların takip edilmesi PLM sistemleri ile daha etkili bir şekilde sağlanabilir.

Gelişmiş İş Birliği ve İletişim: Havacılık projeleri genellikle uluslararası çapta birden fazla paydaş ve tedarikçi içerir. PLM sistemleri, bu paydaşların tümüyle etkili bir şekilde iletişim kurmasını ve iş birliği yapmasını sağlar. Bu, projelerin zamanında tamamlanmasını ve kalite standartlarına uygunluğunu garanti eder. Merkezi bir PLM platformu, tüm paydaşların gerçek zamanlı veri ve proje güncellemelerine erişimini sağlar, bu da iş birliği süreçlerini iyileştirir.

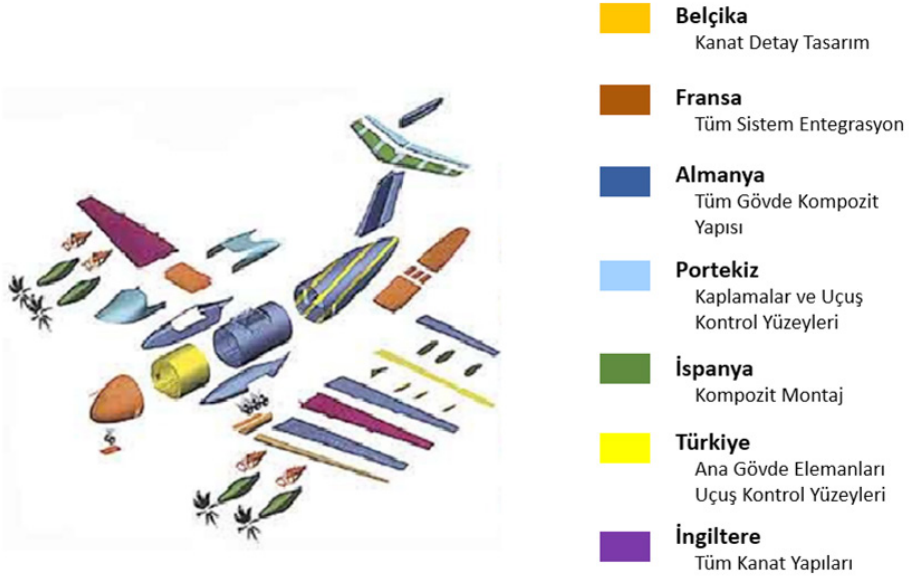
Veri Yönetimi ve İzlenebilirlik: Havacılık ürünleri genellikle uzun ömürlü ve karmaşık parçalardan oluşur. PLM sistemleri, ürün verilerini ayrıntılı bir şekilde takip ederek her bir parçanın geçmişini, bakım kayıtlarını ve değişiklikleri izlemeye olanak tanır. Bu, bakım süreçlerini ve parça değişimlerini optimize eder. Ayrıca, PLM sistemleri ürün izlenebilirliğini artırarak, herhangi bir sorun durumunda hızlı bir çözüm süreci sağlar.

Süreç Verimliliği ve İnovasyon: PLM, iş süreçlerini otomatikleştirir ve standartlaştırır, bu da zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca, yenilikçi tasarım fikirlerinin daha hızlı bir şekilde hayata geçirilmesini destekler. Havacılık şirketleri, bu verimlilik artışı sayesinde rekabet avantajı elde eder. PLM sistemlerinin entegrasyonu, üretim sürecindeki her aşamada iyileştirmeler sağlayarak, inovasyonu teşvik eder ve piyasaya hızlı bir şekilde yeni ürün sunma yeteneğini artırır.

Müşteri Memnuniyeti ve Güvenilirlik: PLM sistemleri, müşteri geri bildirimlerini ve performans verilerini toplar, böylece ürünlerin müşteri ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde sürekli olarak iyileştirilmesini sağlar. Bu, müşteri memnuniyetini artırır ve markanın güvenilirliğini pekiştirir. Müşteri geri bildirimleri ile ürün geliştirme süreçlerinin entegre edilmesi, müşteri beklentilerinin daha iyi karşılanmasını sağlar.

Havacılık sektöründe PLM sistemlerinin entegrasyonu, sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda sektördeki güvenlik ve kalite standartlarının karşılanmasına yardımcı olur. Bu nedenle, havacılık şirketleri için PLM sistemlerinin stratejik bir yatırım olduğu söylenebilir.

Ürün tasarımı ve geliştirme sürecinde PLM büyük bir rol oynamaktadır. PLM, tüm sürecin dijitalleştirilmesine ve verimliliğin artmasına yardımcı olur. Ürün tasarımında PLM, tasarımcılara ve mühendislere bir çözüm sunarak iş birliği yapmalarını ve tasarım verilerini paylaşmalarını sağlar. Şekil 6. da görüldüğü gibi Airbus A400M projesinde farklı yapıların farklı ülkelerde tasarlanması ve üretilmesi, tüm sürecin uyum içinde olması PLM sistemlerinin kullanımı sayesinde olmuştur. Ayrıca, PLM ile tasarımda yapılan değişiklikler tüm iş sürecine yansıtılır ve bu da hata oranını minimize eder.



Şekil 6. AirBus A400M Projesi için Çalışan Ülkeler (Mas, Menéndez, Oliva ve Ríos, 2013)

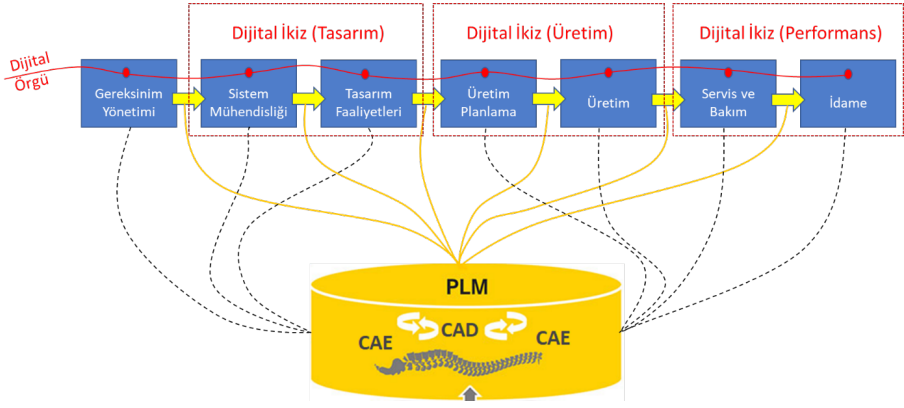
3. Tartışma

PLM, modern endüstrinin karmaşık ve dinamik doğasında ürün geliştirme süreçlerini yönetmek için kritik bir araçtır. Bu süreçler arasındaki bağlantıların önemi, ürün yaşam döngüsünün her aşamasında verimliliği, kaliteyi ve yenilikçiliği artırmak için hayati öneme sahiptir. PLM, süreçler arasındaki bağlantıları sağlayarak tüm paydaşların aynı veriye erişimini kolaylaştırır ve karar alma süreçlerini hızlandırır. Böylece, tasarım değişiklikleri, üretim güncellemeleri veya hizmet talepleri gibi herhangi bir değişiklik hızla diğer süreçlere iletilerek uygun şekilde yönetilebilir.

PLM süreçlerinde, modellerden ve dijital veriden oldukça fazla miktarda yararlanır. Ürünün dijital kopyası, süreçlerin dijital ortamda simüle edilmesini, süreçlerdeki problemlerin önceden belirlenmesini; PLM sistemlerinin sağladığı Dijital Örgü sayesinde de problemin kaynağına erişimi kolaylaştırmaktadır. Dijital İkiz, PLM süreçlerinin her aşamasında kullanılmaktadır ancak tüm süreç içerisindeki Dijital İkiz'i tek bir kavram üzerinden ifade etmek doğru olmayacaktır. Dijital İkiz kavramını daha iyi anlayabilmek için tüm süreçlerde fiziksel ürünün davranışlarını yansıtan yapıların hepsini Dijital İkiz olarak değerlendirmemiz gerekecektir.

Ürünün fikir aşamasından üretime kadar olan süreçte kullanılan 3B modeller Tasarım Dijital İkizi olarak, üretim süreçlerini simüle eden dijital fabrika simülasyonları Üretim Dijital İkiz'i Olarak, ürünün müşteriye tesliminden sonra bakım faaliyetlerini ve operasyon süreçlerini simüle eden veriler de ürünün Performans Dijital İkiz'ini oluşturur. Bu üç Dijital İkiz türü, PLM aracılığıyla birbirleriyle bağlantılı bir şekilde yönetilir ve Şekil 7'de gösterildiği gibi, tüm bu süreçlerin takibi ve entegrasyonu sağlanır. Bu entegrasyon, verilerin PLM ortamında tek bir noktada depolanmasını mümkün kılar, böylece bilgi akışı daha düzenli ve erişilebilir hale gelir

PLM ve Dijital İkiz ayrı ayrı da birçok fayda sağlasa da birlikte yönetildiğinde çok daha verimli bir ürün yönetimi oluşturmaktadır. Dijital İkizler, PLM sistemlerinin sunduğu veri ve süreç yönetimini destekleyerek, ürün yaşam döngüsü boyunca daha iyi kararlar alınmasını ve süreçlerin daha verimli bir şekilde yürütülmesini sağlar. Bu nedenle, PLM ve Dijital İkizlerin entegrasyonu, modern endüstriyel uygulamalarda ürün yönetimini optimize etmek için güçlü bir araçtır.



Şekil 7. PLM süreçleri ve Dijital İkiz Bağlantısı (The backbone of the digital twin, 2018)

4. Sonuç

Bu çalışma, havacılık endüstrisinde Dijital İkiz'lerin önemini ve bu Dijital İkiz'lerin Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) sistemleri üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Bu çalışma Dijital İkiz kavramına farklı bir bakış açısı getirerek tek bir Dijital İkiz kavramı yerine üç farklı alanda Tasarım, Üretim ve Ürün teslimi sonrası kullanılan dijital modeller üzerinden değerlendirmiştir. Ayrıca bu çalışma tüm bu Dijital İkiz modellerinde verilerin PLM platformunda oluşturulmasının ve verinin ortak bir sistemde toplanmasının önemini ortaya koymaktadır. PLM sistemlerinin Dijital İkiz'lerle bütünleşmesinin, şirketlerin ürünlerinin yaşam döngüsü boyunca daha hızlı ve güvenilir bilgilere erişmelerini, daha hızlı kararlar almalarını ve süreçlerini daha etkili bir şekilde yönetmelerini sağladığı konusunu vurgulamıştır. Bu entegrasyonun sonucunda, şirketlerin rekabet avantajlarını artırdığı ürün kalitesi ve müşteri memnuniyetini artırma potansiyeli bulunduğu ayrıca vurgulanmıştır.

Kaynakça

Advanced Technique for Developing Digital Twins Makes Tech Universally Applicable, (2021), <https://news.utexas.edu/2021/05/20/advanced-technique-for-developing-digital-twins-makes-tech-universally-applicable/>

Apollo Mission Simulators (2024), Erişim Adresi: https://apollo11space.com/apollo-mission-simulators-computer-control-companys-ddp-224/#Apollo_Mission_Simulators

Bal, A., Gevrek, H., & Demir, S. (2022). Kitlemel İmalat Sistemlerinde Dijital İkiz Kullanılarak Gerçek Zamanlı Üretim Çizelgeleme ve Tekstil Sektöründe Bir

- Uygulama. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(2), 328-336. Doi: <https://doi.org/10.7240/jeps.1068970>
- Badea, Victor & Alin, Zamfiroiu & Boncea, Radu. (2018). Big Data in the Aerospace Industry. *Informatica Economica*. 22. 17-24. Doi: <https://doi.org/10.12948/issn14531305/22.1.2018.02>.
- Bollini, P., Rogers, D., & Tsuji, N. (2021). Integration of Digital Twin and Advanced Simulation Techniques in Aerospace Systems. *Aerospace Science and Technology*, 109, 106460. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106460>
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). *How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective*. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(1), 37-44. Doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1336426>
- Digital Transformation Technology in Aerospace & Defense | Siemens Software, (2024), Erişim Adresi: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/webinar/digital-transformation-strategies/82533>
- Expertise | ASTRA Aerospace Design Engineering | South Africa, (2024), Erişim Adresi: <https://www.astraero.com/expertise>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research." *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 380-395. Erişim Adresi: <https://arxiv.org/pdf/1911.01276v3>
- Grieves, M. (2014). "Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication." *IMEchE*, 1-12. Erişim Adresi: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- Khajavi, S.H., Motlagh, N.H., Jaribion, A., Werner, L.C., & Holmström, J. (2019). Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings. *IEEE Access*, 7, 147406-147419. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2022). A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 28, 28-32. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Li, L., Aslam, S., Wileman, A., & Perinpanayagam, S. (2021). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction *IEEE Access : Practical Innovations, Open Solutions*, 10, 9543-9562. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136458>.
- Mercimek A. F. & Geçkil, T. (2021). Endüstri 4.0'ın lojistik sektörüne uygulanması:

- Lojistik 4.0, Five Zero, 1(1), 57-77. Doi: <https://doi.org/10.54486/fivezero.2021.5>.
- Mete, M. H. (2023). Dijital Oyunların Geleceğinde Metaverse Etkisi. *TRT Akademi*, 8(17), 294-317. Doi: <https://doi.org/10.37679/trta.1198870>
- Mas F, Menéndez J.L., Oliva M., Ríos J. (2013), Collaborative Engineering: An Airbus Case Study, *Procedia Engineering*, Volume 63, Pages 336-345, ISSN 1877-7058. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.180>.
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., & Wang, L. (2010). Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap. *Technology area*, 11, 1-32. Erişim Adresi: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap
- Tao, Fei & Zhang, He & Liu, Ang & Nee, Andrew. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, April 2019, Doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
- The backbone of the digital twin (2018 <https://www.harting.com/US/en/topics/backbone-digital-twin>).
- Tuegel, E.J., Ingrassia, A.R., Eason, T., & Spottswood, M. (2011). Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2011, 154798, Doi: <https://doi.org/10.1155/2011/154798>, 2011.
- Using System Simulation to Manage Increasing Thermal Loads on Aircraft Fuel Systems - *Mobility Engineering Technology*, (2017). Erişim Adresi: <https://www.mobilityengineeringtech.com/component/content/article/27377-using-system-simulation-to-manage-increasing-thermal-loads-on-aircraft-fuel-systems>



CMMI SERTİFİKALI BT ŞİRKETLERİNİN ENDÜSTRİ 4.0'A HAZIRLIK DURUMU: KOLAY ÖLÇÜM İÇİN BİR YÖNTEM ÖNERİSİ

Hakan YILDIRIM¹, Cihan ÜNAL^{2*}

¹ Beykent Üniversitesi, Mimarlık Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
İstanbul

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5959-2691>

² Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler MYO, Bilgisayar Programcılığı
Bölümü, Ankara

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5255-4078>

Anahtar Kelimeler

Öz

Endüstri 4.0, CMMI, süreç yönetimi, kalite güvencesi, dijital dönüşüm

Bu makale, CMMI (Capability Maturity Model Integration-Yetenek Olgunluk Modeli Entegrasyonu) sertifikalı BT (Bilgi Teknolojileri) şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumlarını değerlendirmek için karşılaştırmalı ve sistematik bir yöntem önermektedir. CMMI, yazılım süreç yönetimi ve kalite güvencesi için geliştirilmiş uluslararası bir standart olup, günümüzde BT sektörü başta olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hâlihazırda on binden fazla BT şirketi CMMI sertifikasına sahiptir ve bu şirketlerin süreç yönetimi konusundaki yetkinlikleri, Endüstri 4.0 gibi dijital dönüşüm süreçlerine ne kadar hazır olduklarını anlamada önemli bir rol oynamaktadır.

CMMI'nin Seviye 4 ve Seviye 5 düzeylerine sahip olan şirketlerin, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği yüksek otomasyon, veriye dayalı karar alma süreçleri ve ileri teknoloji entegrasyonuna sahip olma zorunluluğu vurgulanmaktadır. Bu makalede, CMMI kriterlerine dayalı bir Endüstri 4.0 hazırlık seviyesini ölçmek için kullanılan bir çerçeve sunulmaktadır. Bu çerçeve, BT sektörünün ötesine geçerek diğer sektörlere de uygulanabilir potansiyele sahiptir. Önerilen yöntem, CMMI'nin çeşitli alanlara uyarlanmış yaklaşımlarını kullanarak, Endüstri 4.0 için gerekli olan dönüşüm süreçlerini yönetmede rehberlik edebilecek bir model ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, CMMI'nin süreç iyileştirme yeteneklerinden yararlanarak, şirketlerin Endüstri 4.0'a hazırlık seviyelerini objektif bir şekilde ölçebilmektir. Önerilen modelin BT sektöründe başarılı bir şekilde uygulanabileceği, daha sonra diğer sanayi dallarında da genişletilebileceği belirtilmektedir.

* cihan.unal@hacettepe.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1456837

READINESS OF CMMI LEVEL 4-5 CERTIFIED IT COMPANIES FOR INDUSTRY 4.0: A SYSTEMATIC EVALUATION AND MEASUREMENT APPROACH

Keywords

Industry 4.0, CMMI, process management, quality assurance, digital transformation

Abstract

This article proposes a comparative and systematic method for evaluating the readiness of CMMI (Capability Maturity Model Integration) certified IT companies for Industry 4.0. CMMI is an international standard developed for software process management and quality assurance and is widely used across many sectors, particularly in the IT industry. Currently, more than ten thousand IT companies hold CMMI certification, and the capabilities of these companies in process management play a critical role in determining their readiness for digital transformation processes like Industry 4.0.

It is emphasized that companies with CMMI Level 4 and Level 5 certifications are required to have high levels of automation, data-driven decision-making processes, and advanced technology integration, which are key requirements for Industry 4.0. The article presents a framework based on CMMI criteria to measure the Industry 4.0 readiness level. This framework is not limited to the IT sector but also has the potential to be applied in other industries. The proposed method utilizes adapted approaches from CMMI to provide guidance in managing the transformation processes necessary for Industry 4.0.

The main objective of this study is to leverage the process improvement capabilities of CMMI to objectively measure companies' readiness for Industry 4.0. While the model is particularly applicable to the IT sector, it is also suggested that it can be expanded to other industries.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 21.03.2024

Kabul Tarihi : 21.10.2024

Research Article

Submission Date : 21.03.2024

Accepted Date : 21.10.2024

Extended Abstract

Introduction

This study focuses on evaluating the readiness of Capability Maturity Model Integration (CMMI) certified IT companies for Industry 4.0. The research aims to provide a systematic approach that aligns the objectives of Industry 4.0 with the processes defined at CMMI Levels 4 and 5. CMMI, originally developed as a framework for software process management and quality assurance, has evolved into a global standard applicable across various industries. More than 10,000 IT companies worldwide hold CMMI certification, demonstrating their process management competencies, which are critical for adapting to the technological demands of Industry 4.0.

Industry 4.0 represents the fourth industrial revolution, characterized by cyber-physical systems, the Internet of Things (IoT), and advanced technologies like Artificial Intelligence (AI) and big data. Companies certified at CMMI Levels 4 and 5 are considered well-prepared to meet Industry 4.0 requirements, such as automation, data-driven decision-making, and technology integration. However, assessing their actual readiness for this digital transformation necessitates a comparative framework based on CMMI criteria.

Methodology

The research adopts a comparative analysis method, examining how CMMI processes, particularly at Levels 4 and 5, overlap with Industry 4.0 requirements. The methodology includes the following steps:

Literature Review

Academic studies on CMMI and Industry 4.0 were reviewed to understand the technological requirements and process management capabilities in these frameworks.

Data Sources: Case studies of IT companies with CMMI certification and their adoption of Industry 4.0 technologies were collected. These companies' progress in digital transformation was analyzed.

Tabular Comparison

A table was developed to compare the processes and technologies outlined in CMMI Levels 4 and 5 with the key principles of Industry 4.0, such as interoperability, virtualization, and real-time operation.

Case Analysis

Selected IT companies with high CMMI maturity were studied to assess their performance in adopting Industry 4.0 technologies.

Data Analysis

Qualitative methods were used to evaluate the technological advancements and process management benefits provided by CMMI in relation to Industry 4.0.

Results Evaluation

The effectiveness of CMMI in facilitating the digital transition to Industry 4.0 was measured, and recommendations for applying this framework to other sectors were provided.

Findings

The study reveals that CMMI-certified companies, especially those at Levels 4 and 5, are generally well-equipped to implement Industry 4.0 technologies. These companies already possess advanced process management systems, enabling them to seamlessly integrate AI, IoT, and other innovations. The comparative framework developed in this research provides a clear method for assessing a company's readiness for Industry 4.0 based on CMMI criteria. Notably:

CMMI's emphasis on process optimization aligns closely with the data-driven nature of Industry 4.0.

Automation and real-time monitoring, key to Industry 4.0, are already foundational elements in CMMI Level 4 and 5-certified companies.

The study identifies that using CMMI to evaluate Industry 4.0 readiness is not only feasible in IT but can be adapted to other industries, such as manufacturing and healthcare.

Discussion

The study's findings highlight the compatibility between CMMI Level 4-5 processes and Industry 4.0 requirements, particularly in IT companies. However, some gaps between the two frameworks need further exploration. For example, while CMMI is highly effective in software process management, its application to physical industries that require advanced robotics and autonomous systems may require additional adjustments.

Additionally, the study raises questions about the adaptability of CMMI in non-IT sectors. While CMMI offers strong process optimization tools, the unique challenges of Industry 4.0—such as integrating physical systems with digital networks—may require supplementary frameworks.

Another consideration is the human factor in Industry 4.0. CMMI, particularly at higher levels, focuses on continuous improvement and reducing human error. However, Industry 4.0 emphasizes human-machine collaboration, which may necessitate modifications to traditional CMMI frameworks to fully address this aspect.

Ultimately, while CMMI provides a solid foundation for assessing Industry 4.0 readiness, the study suggests that sector-specific adaptations may be necessary to fully realize the potential of this framework in diverse industrial environments.

Conclusion

The findings suggest that CMMI provides a robust framework for assessing and enhancing Industry 4.0 readiness. The advanced process management capabilities outlined in CMMI Levels 4 and 5 support companies in meeting the complex technological demands of the fourth industrial revolution. While the study focuses on IT companies, the proposed model can be applied to other sectors to measure and improve their digital transformation efforts.

This research highlights the value of CMMI as a tool for achieving Industry 4.0 objectives, offering a clear pathway for companies to enhance their competitiveness in the rapidly evolving digital landscape.

1. Giriş

Standartlar, insanlık tarihinin her aşamasında çeşitli alanlarda düzenleme ve iyileştirme amacıyla kullanılmıştır. Genel olarak ikiye ayrılan bu standartlar, zorunlu düzenleyici standartlar ve gönüllü standartlar olarak bilinir. Zorunlu standartlar yasal gereklilikler içerirken, gönüllü standartlar teşvik edici yapıları ve rekabet avantajı sağlama potansiyelleri nedeniyle geniş kabul görür (Schwab, 2016). Bu bağlamda, dijitalleşmenin yükselişiyle birlikte Endüstri 4.0 gibi yeni standartlar, sektörler arası bir dönüşüm hareketi yaratmıştır. Bu hareket, üretim ve hizmet sektörlerinde dijitalleşme, otomasyon ve veri odaklı süreçlerin entegrasyonuna odaklanmaktadır. Endüstri 4.0, 2011 yılında Almanya'daki Hannover Fuarı'nda tanıtılmasından bu yana hızla yaygınlaşmış ve sanayinin geleceğini şekillendiren devrimsel bir süreç olarak kabul görmüştür (Schwab, 2016).

Endüstri 4.0 kavramı, dijitalleşmenin getirdiği yeniliklerle birlikte, iş dünyasında köklü bir değişim anlamına gelir. Bu değişim, Yapay Zeka (YZ), Nesnelerin İnterneti (NiT), otonom robotlar, 3D yazıcılar ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilerin entegrasyonu ile mümkün olmuştur. Ancak, her sektörün bu teknolojileri ne ölçüde ve hangi hızda benimsediği büyük bir sorudur. Örneğin, otomotiv sektöründe otonom robotlar ve 3D yazıcılar ön plana çıkarken, sağlık ve havacılık gibi sektörlerde Yapay Zekâ ve Nesnelerin İnterneti daha kritik rol oynayabilir.

Bu dönüşüm süreci sadece teknolojik altyapı ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda şirketlerin süreç yönetimi olgunluklarına da bağlıdır. Bu noktada, yazılım sektöründen başlayarak süreç iyileştirme ve kalite kontrolüne odaklanan bir model olan CMMI (Capability Maturity Model Integration), Endüstri 4.0'a uyum sağlama sürecinde önemli bir rol oynayabilir. CMMI, organizasyonların süreç yönetiminde olgunlaşmalarını sağlarken, aynı zamanda dijitalleşme ve otomasyon süreçlerinde yüksek verimlilik elde etmelerine olanak tanır.

CMMI, başlangıçta Carnegie Mellon Üniversitesi'ne bağlı Software Engineering Institute (SEI) tarafından yazılım üretim süreçlerinde kaliteyi artırmak ve süreç yönetimini standart hale getirmek amacıyla geliştirilmiştir. SEI'nin Yetenek Olgunluk Modeli (CMM), yazılım geliştirme süreçlerindeki boşlukları doldurmak için icat edilmiştir ve ardından daha geniş bir kapsamda CMMI adıyla evrilmiştir (SEI, 2021). CMMI, organizasyonların süreç yönetiminde bir olgunluk seviyesi elde etmelerine ve bu seviyeyi sürekli olarak iyileştirmelerine olanak sağlar. İlk olarak yazılım sektöründe kullanılan bu model, zamanla farklı endüstrilere de uygulanabilir hale gelmiştir.

Endüstri 4.0, dijitalleşmeye dayalı olarak sanayi devrimlerinin dördüncü aşaması olarak kabul edilirken, bu yeni çağın gereksinimlerini karşılamak için organizasyonların süreçlerini olgunlaştırmaları ve dijital teknolojilere uyum sağlamaları gerekmektedir. CMMI 4 ve 5 seviyelerine ulaşmış organizasyonlar, Endüstri 4.0'ın

gerektirdiği dijitalleşmeye daha hazırdır. Çünkü CMMI'ın sunduğu süreç iyileştirme ve kalite kontrol mekanizmaları, Endüstri 4.0'da kritik olan otomasyon, veri temelli karar alma ve ileri teknoloji entegrasyonu gibi unsurları destekler.

Bu bağlamda, CMMI 4-5 seviyeleri, bir organizasyonun süreç yönetiminde yüksek olgunluk seviyesine ulaştığını gösterir. Bu olgunluk, sadece yazılım geliştirme süreçlerinde değil, aynı zamanda üretim ve hizmet sektörlerindeki dijital dönüşüm süreçlerinde de başarı sağlar. CMMI'ın sürekli iyileştirme prensipleri, organizasyonların Endüstri 4.0'ın gereksinimlerine uyum sağlamalarına yardımcı olur ve bu sayede dijital dönüşüm süreçlerinde yüksek verimlilik elde edilebilir.

Mevcut literatür incelendiğinde, CMMI'ın Endüstri 4.0'a olan etkisine dair yeterli araştırma yapılmadığı görülmektedir. Özellikle, CMMI 4-5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadıkları konusunda önemli bir bilgi eksikliği mevcuttur. Bu çalışma, bu bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlayarak, aşağıdaki araştırma sorularına yanıt arayacaktır:

CMMI 4-5 seviyelerine sahip BT şirketleri, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği dijital dönüşüm, otomasyon ve veri temelli karar alma süreçlerine ne kadar hazırdır?

CMMI olgunluk seviyeleri, BT dışındaki sektörlerde Endüstri 4.0'a geçişte nasıl uygulanabilir ve etkili bir çerçeve sunabilir?

CMMI'nın sunduğu süreç olgunluğu, Endüstri 4.0'ın gereksinimlerini karşılamak için yeterli midir, yoksa bu iki model arasında belirli uyumsuzluklar veya eksiklikler mevcut mudur?

Bu çalışmanın amacı, CMMI 4-5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumlarını değerlendirmek ve bu modelin diğer sektörlerde uygulanabilirliğini incelemektir. CMMI süreç yönetimi ve kalite güvencesi kriterlerinin, Endüstri 4.0'ın ileri teknoloji gereksinimlerini nasıl desteklediği analiz edilerek, objektif bir değerlendirme çerçevesi sunulacaktır. Bu doğrultuda, CMMI olgunluk seviyelerine sahip şirketlerin dijital dönüşüme ne kadar hazır olduğu ortaya konulacak ve Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde kullanabilecekleri kolaylaştırıcı unsurlar tartışılacaktır.

Daha önce SEI tarafından geliştirilen CMMI çerçevesi, yalnızca yazılım süreçlerini değil, aynı zamanda süreç yönetimi olgunluğunu gerektiren diğer sektörleri de kapsamaktadır. Federal Havacılık İdaresi (FAA), CMMI modellerini entegre ederek bu süreci optimize eden ilk büyük endüstrilerden biri olmuştur. 1997 yılında FAA tarafından geliştirilen FAA-iCMM modeli, yazılım edinme süreçlerini ve sistem mühendisliği süreçlerini birleştiren entegre bir modeldir ve süreç iyileştirmede başarılı sonuçlar elde etmiştir (SEI, 2021).

Bu örnekten de görüldüğü gibi, CMMI modelleri, sadece BT sektöründe değil,

daha geniş bir endüstriyel uygulama alanına sahiptir. Bu bağlamda, CMMI 4-5 seviyelerinin, Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde şirketlere nasıl rehberlik edebileceği ve süreç iyileştirme açısından ne gibi avantajlar sağlayabileceği üzerinde durulacaktır.

Bu çalışma, CMMI 4-5 seviyelerine sahip şirketlerin Endüstri 4.0'a olan hazırlık durumlarını incelemekte ve bu iki modelin süreç iyileştirme kapasitelerini bir araya getirmektedir. CMMI ve Endüstri 4.0 arasındaki bu bağ, süreç olgunluğunu artırarak dijitalleşme sürecini hızlandırabilir ve organizasyonların rekabet avantajı elde etmesine olanak tanıyabilir. Çalışma sonucunda, dijital dönüşüm süreçlerinde CMMI'nin sektörel uyulanabilirliği ve Endüstri 4.0'a hazırlıkta sunduğu avantajlar üzerine öneriler sunulacaktır.

2. Kavramsal Arka Plan

Standartlar gönüllü ve zorlayıcı standartlar olarak ikiye ayrılır. Ekonomik, sosyal, teknolojik taleplerin sonucudur ve tarihi geçmişe ve olgunlaşma süreçlerine de sahiptir. Ülkeler, bölgeler, birlikler veya düzenleyici kurumlar tarafından karar verilen standartlar mevcuttur. Örnek Standart enstitülerden bazıları TSE, ITU, CE, ANSI, ETSI ve IEEE'dir. TSE (Türk Standartları Enstitüsü): Türkiye'de ulusal standartların hazırlanmasından ve uygulanmasından sorumlu kuruluştur. Bunlarla ilgili kısa açıklamalar şöyledir:

ITU (International Telecommunication Union): Uluslararası Telekomünikasyon Birliği, bilgi ve iletişim teknolojileri için küresel standartlar geliştiren Birleşmiş Milletler'e bağlı bir kurumdur.

CE (Conformité Européenne): Avrupa Birliği'nde üretilen veya ithal edilen ürünlerin belirli sağlık, güvenlik ve çevre koruma gerekliliklerine uygun olduğunu gösteren işarettir.

ANSI (American National Standards Institute): ABD'de ulusal standartları geliştiren, koordine eden ve denetleyen kuruluştur.

ETSI (European Telecommunications Standards Institute): Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü, telekomünikasyon ve dijital teknoloji standartları geliştiren Avrupa merkezli bir kurumdur.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers): Elektrik, elektronik, bilgisayar mühendisliği ve diğer ilgili disiplinlerde dünya çapında standartlar geliştiren profesyonel bir dernektir.

Standartların oluşum sürecinde ilgili tüm tarafların bir araya getirilmesi gerekir. Bu taraflar tüketiciler, üreticiler, hükümetler, enstitüler, üniversitelerdir. Standartlara olan ihtiyaçları teknolojik gelişmeler ve sosyal ihtiyaçlar ortaya çıkartır ve belirler. Bazı standartlar yalnızca küçük bir işletme ve grupta bilinir ve etki

düzeyi sınırlıdır. Bununla birlikte, bazıları dünyadaki tüm taraflarca genel kabul görür. Mesela ISO 9001 gibi bir standart tüm ekonomik sektörler yayılmıştır. Bu standartlar çoğu ilk tanımlanmasının ardından, zamana ve ülkelere göre yeniden adlandırılmış veya kodlanmıştır.

Standartlar, teknolojik ve sosyal talepler değiştikçe evrim geçirir ve farklı bir boyut kazanır. Yeni standartlar yayınlanabilir, mevcut standartlar güncellenebilir ya da birden fazla standart daha uyumlu bir yaklaşımla bir çatı altında birleştirilebilir. Standartların bir diğer önemli özelliği ise ölçüm ve değerlendirme yapabilme yeteneğidir. Bu ölçümler, gerçek ihtiyaçlara dayandırılır ve birçok farklı hedef doğrultusunda kullanılabilir.

Yetenek ve olgunluk düzeyini anlama yöntemleri, farklı sektörler için de benzerdir. İlk olarak, gerçek ihtiyaçları ve talepleri kapsayan bir konsept çerçevesi (White Paper) oluşturulmalıdır. Bunun yanı sıra, önceki standartların da gözden geçirilmesi gereklidir.

Geçmişte, o dönemin gereksinimlerini yansıtan standartlar bulunmaktaydı. Ancak günümüzdeki modern standartlar, başlangıçta ticaretin yalnızca iki temel bileşeninden biri olan “mallar” için tanımlanmıştı. Zamanla, “hizmetler” de kendi standartlarına kavuştu ve böylece bu iki unsur, ekonominin ayrılmaz parçaları haline geldi.

Yazılım sektörü, hizmet sektörünün içindedir. Ancak farklı özelliklere sahip olduğu ve mevcut kriter ve standartlarla ölçme ve değerlendirmesinin mümkün olmadığı da ortaya çıkmıştır. Yazılım sektöründe organizasyonel tasarımın merkezi bir paradigması olan süreç oryantasyonu ve sürekli süreç iyileştirmenin üst düzey yöneticinin gündemlerinde üst sıralarda yer almasıyla birlikte, işletme süreci yönetiminde de CMMI yetenek ve olgunluk modeli geliştirilmiştir.

Modelin farklı firmalarda ve coğrafik bölgelerde uygulanması ile birlikte hem tasarım ürünleri olarak olgunluk modellerine hem de olgunluk modeli tasarım sürecine atıfta bulunulan çok sayıda eksiklik ortaya çıkmıştır. Araştırma tasarım sürecini zaten doğrulamış olsa da olgunluk modellerinin karşılaması gereken tasarım ilkeleri olan biçim ve işlev ilkelerinin bütüncül bir anlayışı yoktur. Bu modelde yapılan geliştirmeler ile modelin öğrenen ve eksiklikleri gideren tarafları geliştirilmiştir.

BT ve özellikle Yazılım sektöründe CMMI hem yönetim hem de üretim tarafında kullanılacak bir model olarak pratik uygulamalarda test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Literatür taraması, olgunluk modelinin çok geniş bir alanda kullanıldığını ortaya koymuştur.

Çok sayıda unsur ve sorun potansiyel olarak risk taşıyabilir. BT şirketleri, ticari gizlilik ve konuya olan ilgi ve uzmanlıkları nedeniyle, Endüstri 4.0 bağlamında

kritik öneme sahip olan bilgi güvenliği uygulamalarına daha yatkındır. Yönetimden üretimin tüm aşamalarına kadar olan süreçler, artık yeni teknolojilerle düşünülmelidir. Yeni kavramlar ve yöntemler, farklı seviyelerdeki BT teknolojileriyle güçlü bir ilişki içindedir. (Basl, 2018)

CMMI olarak bilinen yazılım alanında geliştirilen olgunluk yönteminin kullanılması için Endüstri 4.0 bakımından tarihi süreçler ışığında öne çıkan teknolojiler mevcuttur. CMMI- Kapasite Olgunluk Ölçümü İndeksleme, geliştirme süreçlerine rehberlik eden bir modeldir. Bir organizasyonda doğrudan uygulanabilecek bir dizi süreç tanımlaması değildir. Bir kuruluş tarafından kullanılan gerçek yöntemler, uygulama alanı ve kuruluş yapısı ve boyutu dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, bir CMMI modelinin süreç alanları genellikle bir organizasyonda kullanılan süreçlerle tam olarak ve bire bir örtüşmez. Bir kurumda uygulanan prosedürler, çalışma alanı, organizasyon yapısı ve büyüklüğü gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. CMMI modelleri doğrudan süreçler değildir; bunun yerine, süreçlerin nasıl yürütülmesi gerektiğine dair rehberlik sağlayan süreç tanımları sunar. (SEI, 2021)

CMMI modelleri, çeşitli ilgi ve işlem alanlarını kapsar. Bu süreç alanları, her kurumun ve sürecin organik olarak birbirine bağlanmasından meydana gelir. Süreç alanlarıyla sonuçlanan herhangi bir süreç iyileştirme faaliyeti, kurum yapısı içinde birbirinden bağımsız olarak tanımlanır; ancak bu faaliyetlerin etkileşimi her zaman göz önünde bulundurulmalıdır (Ariffin and Ahmad, 2021).

Çeşitli süreç iyileştirme modellerini bir araya getirerek oluşturulan CMMI modeli, bu modellerden hedeflere doğal bir geçiş sağlar ve bu nedenle iki farklı temsile sahip eşdeğer sonuçlar üretir. Bu temsillerden ilki «sürekli iyileştirme» olarak adlandırılır ve herhangi bir alandaki süreç yeterlilik ve olgunluk seviyesi tarafından belirlenir.

2.1 Literatür Taraması

Bu çalışmada, CMMI (Capability Maturity Model Integration) 4-5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık düzeyleri ele alınmaktadır. Literatür incelemesi, bu iki önemli kavramın birbirleriyle ilişkisini ortaya koyan önceki çalışmalara dayanarak, CMMI ve Endüstri 4.0'ın süreç yönetimi ve dijital dönüşümdeki rollerine odaklanmıştır.

CMMI Üzerine Çalışmalar

CMMI, öncelikle Carnegie Mellon Üniversitesi'ne bağlı Software Engineering Institute (SEI) tarafından yazılım süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla geliştirilmiştir (SEI, 2021). Bu model, yazılım geliştirme süreçlerinin optimizasyonu için başlangıçta kullanılmış, zamanla diğer sektörlerde de süreç iyileştirme ve kalite

yönetimi aracı olarak yaygınlaşmıştır. Yıldırım (2018), Türkiye'deki tersanelerde CMMI'in uygulanabilirliğini inceleyerek modelin süreç yönetimi üzerinde olumlu etkilerini ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Wood ve Vickers (2018), havacılık sektöründe CMMI'in güvenlik ve süreç yönetimi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir.

Endüstri 4.0 Üzerine Çalışmalar

Endüstri 4.0, dijitalleşmenin sanayi sektöründeki yansımalarını temsil eden bir kavramdır. Schwab (2016) tarafından öne sürülen bu kavram, sanayi devriminin dördüncü aşaması olarak kabul edilmektedir ve yapay zeka, Nesnelerin İnterneti (IoT), otonom sistemler gibi yenilikçi teknolojileri kapsamaktadır. Brettel ve arkadaşları (2014), Endüstri 4.0'ın süreç yönetimi üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu yeni sanayi devriminin özellikle üretim süreçlerinde büyük bir dönüşüm yol açtığını vurgulamışlardır. Endüstri 4.0 Platformu, Endüstri 4.0 konseptini destekleyen önemli bir yapıdır. Almanya merkezli olarak kurulan bu platform, sanayi sektörünü dijital dönüşüm konusunda yönlendiren ve teşvik eden bir yapıya sahiptir. Platform, devlet kurumları, araştırma kuruluşları, teknoloji sağlayıcıları ve sanayi temsilcilerini bir araya getirerek Endüstri 4.0'ın temel prensiplerinin uygulanmasını kolaylaştırmayı hedefler. Ayrıca, sanayide dijitalleşme süreçlerini hızlandırmak amacıyla ortak bir dil ve standart oluşturulmasına katkı sağlar. Bu platform sayesinde, Endüstri 4.0'ın getirdiği teknolojik yeniliklerin iş dünyasına entegrasyonu daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Endüstri 4.0 Platformu, 2021).

Literatürdeki Eksiklikler

Yapılan literatür taraması, CMMI 4-5 seviyelerine sahip şirketlerin Endüstri 4.0'a hazırlık seviyelerine dair bir çalışmanın mevcut olmadığını göstermektedir. Bu çalışmanın temel amacı, CMMI'in süreç iyileştirme kapasitelerini analiz ederek, BT şirketlerinin dijital dönüşüm süreçlerindeki hazırlık durumlarını ölçmek ve bu modelin diğer sektörlerde uygulanabilirliğini araştırmaktır.

2.2 İş ve Süreçlerle İlgili Olgunluk Modeli Benimsemenin Faydaları

CMMI tekniği, yalnızca şirketlerin süreç olgunluklarını değerlendirmekle kalmaz, aynı zamanda projeyi üstlenen şirketin, işi önceden belirlenen süre ve maliyet içinde tamamlayacağına dair bir güvence sağlar. ABD'de savunma projelerinde yaşanan tarih sapmaları ve büyük maliyet artışları, böyle bir modele olan ihtiyacı doğurmuştur. Bu duruma en bilinen örnek, F-35 savaş uçağı projesindeki gecikmeler ve sapmalardır. Bu nedenle CMMI, başlangıçta ABD savunma sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise CMMI, çok çeşitli organizasyonlarda iş süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla giderek daha yaygın bir şekilde benimsenmektedir (SEI, 2021).

Yerel yazılım geliştirme endüstrisinin küresel ölçekte daha rekabetçi olabilmesi için uluslararası standartlara uyum sağlaması gerekecektir. Bu sayede, uluslararası sözleşmeler arayan yerel şirketler, yabancı firmalar tarafından talep edilen CMMI seviyelerini karşılayabilecektir. CMMI, çeşitli organizasyonların proje öngörülebilirliğini ve tutarlılığını önemli ölçüde iyileştiren somut faydalar sağlayan kanıtlanmış bir yaklaşım sunar.

Yukarıda belirtilen faktörlerin herhangi biri ya da tamamı, bir kuruluşun CMMI'a olan ilgisini yönlendirebilirken, yöneticilerin bu modeli uygulamaya odaklanmasının temel faydası, teslimatta sağlanan tutarlılıktır. CMMI güdümlü süreç iyileştirme, aynı zamanda daha erken ve etkili hata tespiti gibi maliyet tasarrufları sağlar. Bu sayede iyileştirme maliyetleri düşerken, değişiklikler daha etkili bir şekilde yönetilir. Sonuç olarak, yeniden çalışma maliyetleri azalır, program değişiklikleri minimuma iner ve maliyet öngörülebilirliği artar (SEI, 2021).

Bir kuruluşun nasıl çalıştığına, hangi işlemlere ihtiyaç duyduğuna ve bu işlemlerin nasıl etkileşim kurduğuna dair bir model olmadan, iyileştirme çabalarına liderlik etmek zor olabilir. Model, bir organizasyondaki ayrı unsurların anlaşılmasını sağlar ve dilin formüle edilmesine ve neyin iyileştirilmesi gerektiği ve ne kadar iyileştirme sağlanabileceğinin tartışılmasına yardımcı olur.

Geçen 20 yıl boyunca teknoloji, endüstrilerin verimliliği artırma ve üretkenliği artırma ihtiyaçlarını karşılamaya yardımcı oldu. Pandemi dolayısı ile günümüzde Dünya'nın ciddi ekonomik zorlukları vardır. BT teknolojileri daha yüksek büyüme fırsatları sunmakla birlikte rekabet gücünü de azaltmamaktadır.

CMMI ölçeği, kuruluşların süreç olgunluğu ve iyileştirme seviyelerini değerlendirmek için kullanılan bir modeldir. CMMI'nın beş aşamasının özet ifadesi şöyledir:

Başlangıç Seviyesi- Seviye 1

Bu seviyede kuruluşlar genellikle tahmin edilemez ve tepkisel bir yapıdadır. Süreçler düzensiz ve sıklıkla kaotiktir. İşler tamamlanır; ancak, genellikle belirlenen zaman ve bütçenin üzerine çıkarılır.

Yönetilen Seviye- Seviye 2

Bu aşamada, organizasyon projeleri bireysel bir temelde yönetir. Planlama ve yönetim süreçleri daha düzenli hale gelmiş, projelerin uygulanması, ölçülmesi ve kontrol edilmesi sistematik bir yaklaşım içindedir.

Tanımlanmış Seviye- Seviye 3

Proaktif bir yaklaşım öne çıkar; kuruluş genelindeki standartlar belirlenmiş ve uygulanmaktadır. Bu standartlar kuruluşun tüm projelerine, programlarına ve portföylerine rehberlik eder, tutarlılık ve verimliliği artırır.

Niceliksel Olarak Yönetilen Seviye- Seviye 4

Bu düzeyde, kuruluşlar süreçlerini ve performanslarını sayısal verilere dayalı olarak yönetir. Organizasyon, ölçülebilir hedefler belirleyerek ve bu hedeflere ulaşmak için veri analizi yaparak iç ve dış paydaşların ihtiyaçlarını karşılayabilir bir yapıya sahiptir.

Optimizasyon Seviyesi- Seviye 5

Organizasyonlar bu aşamada sürekli iyileştirme sürecine odaklanır, değişim ve fırsatlara hızlı ve etkili yanıtlar verebilir. Kuruluşlar, istikrarlı, esnek ve yenilikçi çözümler sunarak endüstri lideri olma yolunda ilerler.

Endüstri 4.0'a ulaşmış firmalar, özellikle CMMI'nın 4. ve 5. seviyelerinde belirtilen ölçütleri yerine getirme kapasitesine sahiptirler. Bu seviyeler, yüksek teknolojik entegrasyon ve otomasyon seviyesi gerektiren kapsamlı ve gelişmiş süreç yönetimi uygulamalarını içerir. Bu firmalar, süreçlerindeki verimliliği ve etkinliği artırmak için ileri teknolojileri ve süreç iyileştirme metodolojilerini kullanmaktadır (SEI, 2021).

Tablo 1. CMMI Seviyeleri Tanım ve Açıklamaları Tablosu (Kaynak: <https://www.sei.cmu.edu/>)

CMMI-SEVİYE	TANIM	AÇIKLAMA
Seviye 1	Başlangıç	Kuruluşlar genellikle tahmin edilemez ve tepkisel bir yapıdadır. Süreçler düzensiz ve kaotiktir. İşler genellikle zaman ve bütçe sınırlarının dışına çıkar.
Seviye 2	Yönetilen	Projeler bireysel düzeyde yönetilir. Planlama ve yönetim süreçleri daha düzenlidir. Projeler sistematik olarak uygulanır, ölçülür ve kontrol edilir.
Seviye 3	Tanımlanmış	Kuruluş genelinde standartlar belirlenmiş ve uygulanmaktadır. Bu standartlar, projelere, programlara ve portföylere rehberlik eder, verimliliği artırır.
Seviye 4	Niceliksel Olarak Yönetilen	Süreçler ve performanslar sayısal verilere dayanarak yönetilir. Ölçülebilir hedefler belirlenir, veri analizi ile kararlar alınır.
Seviye 5	Optimizasyon	Sürekli iyileştirme süreci öne çıkar. Değişim ve fırsatlara hızlı yanıt verilir, istikrarlı, esnek ve yenilikçi çözümler sunulur.

2.3 Endüstri 4.0

Endüstri 1.0, 1780'lerde su ve buhar gücünü kullanarak mekanik üretim sistemlerinin ortaya çıkmasıyla başladı. En bilinen sonuçları buharlı motorlar, buharlı trenler ve buharlı gemilerdir. Endüstri 2.0, 1890'larda elektrik gücünün devreye girmesiyle seri üretim araçlarının kullanılmaya başlanmasını tanımlar. Endüstri 3.0 olarak adlandırılan dönem ise 1990'lı yıllarda dijital dönüşümün başlaması ve yarı iletken teknolojilerinin kullanımıyla öne çıkar. Günümüzde, Endüstri 4.0, 2011 sonrasında üretim süreçlerinin tamamen son teknoloji Bilgi Teknolojileri (BT) ürün ve araçlarından faydalanılarak gerçekleştirilmesini ifade eder.

Bu makalenin amacı, Endüstri 4.0 için gerekli dönüşüm süreçlerinin yönetimini sağlamak üzere CMMI modelinin 4 ve 5. seviye yaklaşımlarında geliştirilen prosedür ve yöntemlerden nasıl yararlanılabileceğini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, sistematik bir yaklaşımın geliştirilmesi gerekliliği açıktır. İlk olarak BT şirketlerinden başlanmasının nedeni, CMMI'nin başlangıçta yazılım sektörü için tasarlanmış olmasıdır. Bu sayede, zaten CMMI sertifikasına sahip olan ve bu sürece aşina olan BT şirketlerinin mevcut potansiyellerinden daha etkin bir şekilde faydalanılması hedeflenmiştir.

İnceleme için BT şirketlerinin seçilmesinin bir diğer nedeni ise şudur: Endüstri 4.0, teknolojiler ile kurumsal olgunluk gerektiren değerler ve kavramlar zincirinin iş birliğini içeren kapsamlı bir yapıdır. Bu yapı, siber-fiziksel sistemler, Nesnelerin İnterneti-NiT (Internet of Things) ve Hizmetlerin İnterneti (Internet of Sevices-IoS) kavramlarına dayanmaktadır.

Endüstri 4.0 genel olarak 3 yapıdan oluşmaktadır. Bunlar; 1) Nesnelerin İnterneti 2) Hizmetlerin İnterneti 3) Siber-Fiziksel Sistemlerdir.

Görüldüğü üzere, Endüstri 4.0 ile modüler yapıya sahip akıllı üretim tesisleri arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki, fiziksel işlemlerin siber-fiziksel sistemler aracılığıyla izlenmesi, fiziksel dünyanın sanal bir kopyasının oluşturulması ve merkezi olmayan karar mekanizmalarının devreye sokulmasını hedefler (Stentoft, Jensen, Philipsen and Haug, 2019).

Endüstri 4.0, genel kabul görmüş altı temel ilkeye dayanmaktadır. Bu ilkeler şunlardır: Karşılıklı Çalışabilirlik (Interoperability), Sanallaştırma (Virtualisation), Özerk Yönetim, Gerçek Zamanlı Çalışma Yeteneği (Real Time Operation), Hizmet Oryantasyonu (Service Orientation) ve Modüler Olma (Modularity).

CMMI kullanımının Endüstri 4.0 hedefleri ile örtüştüğü ve özellikle 4. ve 5. seviyelerine ait hedeflerle benzerlik gösterdiği söylenebilir. Bu hedefler arasında; sistemin izlenmesiyle aksayan yönlerin kolayca tespit edilmesi, insan ve sistem bileşenlerinin öz farkındalık kazanması, sistemin çevre dostu ve kaynak tasarruflu bir yapıya kavuşarak sürdürülebilirlik sağlanması, yüksek verimliliğin elde

edilmesi, üretimde esneklik ve elastikiyetin benimsenmesi, verimliliğin artırılması ve öğrenen, kendini sürekli geliştiren sistemlere geçilmesi gibi unsurlar bulunmaktadır (Shumaker, Erol and Sihn, 2016).

BT şirketlerinin yapısında, Endüstri 4.0 için öngörülen tüm yeni teknolojiler bulunmaktadır. Bu açıdan, bu şirketler küçük bir laboratuvar işlevi görmektedir. Ayrıca, CMMI 4-5 seviyelerinde yer alan üretim ve yönetim süreçlerinde, tüm sistemin uzaktan yönetilebilmesi mümkündür (Yıldırım, 2018). Bu durum, yalnızca uygun ve en son teknoloji ürünlerin kullanılmasıyla sağlanabilir. Dolayısıyla, bir BT şirketinin Endüstri 4.0'a hazır olma seviyesini değerlendirmek için CMMI 4-5 seviyelerindeki ölçütlerin incelenmesi faydalı olacaktır.

2.4 Yapay Zekâ-YZ

Yapay zekâ kavramı günümüzde sıkça duyulan bir terimdir ve beraberinde Derin Öğrenme, Büyük Veri ve Artırılmış Gerçeklik gibi kavramlarla birlikte anılmaktadır. Ayrıca Nesnelerin İnterneti ve Hizmetlerin İnterneti gibi terimler de sıklıkla aynı bağlamda kullanılır. Derin Öğrenme (Deep Learning-DL), aslında Makine Öğrenimi (Machine Learning-ML) alanının bir alt kategorisidir ve denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme gibi farklı öğrenme türlerini içerir.

Derin Öğrenme, ismini Yapay Sinir Ağlarından (Artificial Neural Networks-ANN) aldı ve bu ağlar, insan biyolojisinin sinir ağlarından esinlenilerek tasarlandı. Derin Öğrenme, Makine Öğreniminin bir yöntemi olarak kullanılır. Temelde, girdi ve çıktı katmanı arasına birçok gizli katman eklemekten ibarettir. Her bir katman, ağırlıkları öğrenmeye çalışır ve girdiyle işlendiğinde istenen sonuca yakın bir tahmin sağlar.

Derin Öğrenme yöntemlerini uygulamak için farklı teknikler bulunmaktadır. Hangi yöntemin kullanılacağı, sahip olunan veri türüne, uygulanmak istenen denetimli veya denetimsiz öğrenme görevine ve çözümlenmek istenen problem türüne bağlıdır. Bu faktörler göz önüne alınarak, en uygun yöntem seçilir.

Makine Öğrenimi ile Derin Öğrenme arasında bazı farklar bulunur. İşlevsellik açısından, Derin Öğrenme, girdi verilerini alır ve katmanlar aracılığıyla sezgisel ve akıllı kararlar verirken, Makine Öğrenimi, verileri işler, özelliklerini ayıklar ve bu özelliklere dayanarak kararlar alır.

Ayrıca, Derin Öğrenme verilerden anlamlı özellikleri çıkarmak için uygun bir yöntem olarak kabul edilir. El yapımı özelliklere dayanmadan öğrenir ve katmanlar arası hiyerarşik özellik çıkarımı yapar. Makine Öğrenimi ise el yapımı özelliklere daha fazla güvenir ve verilerden anlamlı özellikler çıkarmak konusunda daha az etkilidir. Bu nedenle, Derin Öğrenme, veri analizi ve tanıma gibi görevlerde genellikle daha etkili bir seçenek olarak kabul edilir (Goodfellow, Bengio and Courville, 2016).

2.5 NiT (IoT) Sensörleri

NiT'in temelini oluşturan bu sensörler, Nesnelerin İnternetindeki "şeylerin" canlılık kazanmasını sağlar. Bir örnek vermek gerekirse, bir makinenin sıcaklığını izleyen bir NiT hizmetini ele alalım. Bu senaryoda, bir ısı sensörü, sıcaklığı analog veya dijital bir formda ölçer ve sıcaklık belirli bir eşiği aştığında veya altına düştüğünde daha karmaşık bir işlemi başlatmak için bir sinyal gönderir. Geleneksel bir senaryoda bu sinyali gözlemci veya kullanıcı alır ve gerektiğinde müdahale eder.

Ancak NiT kurulumunda, bu sensörler bu tür olayları otomatik olarak algılayan ve belirli kurallara sahip bir karar motoruna bilgi gönderebilirler. Bu nedenle, NiT sensörleri çok çeşitli türlerde bulunabilir: sıcaklık sensörleri, nem sensörleri, basınç sensörleri, CO2sensörleri, ışık sensörleri, doluluk sensörleri, hareket sensörleri ve daha fazlası. Önemli olan, bu sensörlerin NiT cihazlarının önemli bir bileşeni olduğu, gerçek dünyadaki verilerin kaynağı olduğu ve bir karar motoruyla entegre olduğunda çeşitli işlevleri otomatikleştirebildiğidir.

IoT ve IoS kavramları, günümüzde teknolojideki büyük değişiklikleri yansıtıyor ve nesnelerin ve hizmetlerin daha akıllı ve otomatik hale gelmesine yardımcı oluyorlar (Gubbi, Buyya, Marusic and Palaniswami, 2013).

2.6 Ağ ve Bağlantı

Sensörlerin nasıl çalıştığını anladıktan sonra, bu sensörlerin karar verme süreçleriyle nasıl etkileşim kurduğunu inceleyelim. Karar verme motorları, genellikle Programlanabilir Mantık Denetleyicisi (PLC) adı verilen cihazlarla sağlanır ve uzun yıllardır bu şekilde kullanılmaktadır. Ancak, eskiden bu tür bağlantıların çoğu kabloyla yapılırdı. Günümüzde, sensörlerin sayısının artması ve bu sensörlerin daha fazla cihazda kullanılmasıyla kablosuz bağlantı çok daha önemli hale geldi.

Son yıllarda, sensörlerden gelen verileri kablosuz olarak iletmek için birçok yeni teknoloji geliştirildi. Örneğin, Bluetooth Low Energy (düşük enerji tüketen Bluetooth), LoRa (uzun mesafeli iletişim), ZigBee (kısa mesafe için güvenilir bir ağ), SigFox (düşük enerjiyle uzun mesafe veri iletimi), ve NB-IoT (dar bantta çalışan Nesnelerin İnterneti teknolojisi) gibi seçenekler bulunuyor. Bu isimler kulağa teknik gelebilir, ancak hepsi aslında aynı amacı taşır: Sensörlerin topladığı bilgileri radyo frekansları kullanarak kablosuz bir şekilde iletmek (Raza, Kulkarni and Sooriyabandara, 2017).

Bu teknolojilerden en popüler olanı Bluetooth Low Energy (BLE) yani düşük enerji tüketen Bluetooth'tur. Birçok IoT (Nesnelerin İnterneti) sensörü, verilerini BLE üzerinden göndermek için bazı iletişim proto kollerini kullanır. Örneğin, UART ve Modbus gibi protokoller sensörlerin topladığı bilgileri BLE cihazlarına

iletmesine yardımcı olur. BLE cihazları, bu bilgileri kablosuz olarak diğer BLE cihazlarına ya da “Ağ Geçidi” denen özel alıcılara aktarır.

Altyapı ya da maliyet sınırlamaları nedeniyle çok sayıda alıcı cihaz eklemek her zaman mümkün olmasa da, BLE cihazları bir “Mesh Ağ” adı verilen sistemle düzenlenebilir. Bu sistemde, ağa bağlı cihazlar birbirine veri aktararak hedef alıcıya ulaşır. Bu yenilikçi teknoloji, IoT sensörlerinin sağlık hizmetleri, perakende, lojistik ve imalat gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır.

Verileri alan bu alıcılara, bilgileri genellikle GPRS (mobil veri), Wi-Fi veya LTE (4G) gibi bağlantılar aracılığıyla bulut tabanlı sistemlere iletir. Bu sistemler, topladıkları verileri analiz etmek ve işlem yapmak için özel ya da kamuya ait bulut hizmetlerinde çalışır (Raza et al., 2017).

2.7 NiT Bulut Teknolojisi ve Veri Yönetimi

Günümüzde dijital dünyada toplanan verilerin büyük çoğunluğu, işlenmek ve depolanmak üzere bulut sistemlerine gönderilmektedir. “Nesnelerin İnterneti (NiT) Bulutu” kavramı, bu verilerin toplanması, iletilmesi ve işlenmesi için kullanılan bir altyapıdır. NiT cihazları, sınırlı işlem gücüne ve depolama kapasitesine sahip olduklarından, topladıkları verileri daha güçlü sunuculara göndermek zorundadır. Bu noktada, bulut teknolojisi devreye girer.

NiT sensörleri, çeşitli verileri topladıktan sonra bu verileri belirli bir hedefe iletme ihtiyacı duyarlar. Bu veri iletiminde en çok tercih edilen protokollerden biri MQTT’dir (Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşınması). MQTT, hafif ve verimli bir iletişim protokolü olup, düşük bant genişliği kullanan cihazlar için idealdir. Bir aracı gibi çalışan MQTT, sensörlerden gelen verileri toplar ve ilgilene kullanıcıya ya da sistemlere dağıtır. Kullanıcılar, belirli bir konuya abone olduklarında, bu konu hakkında sensörlerden gelen bilgilere erişebilirler.

MQTT sunucusu, genellikle “NiT sunucusu” olarak adlandırılır. Bu sunucu, sensörlerden gelen verileri toplar ve işleme sürecini yönetir. NiT sunucusunda kurallar belirlenir ve bu kurallar çerçevesinde gelen veriler filtrelenir. Verilerin filtrelenmesi, sadece gerekli ve ilgili bilgilerin işlenmesini sağlar, bu da sistemin verimli çalışmasına katkı sunar.

Bazı kullanıcılar, NiT sensörleri için neden özel bir sunucuya ihtiyaç olduğunu merak edebilir. Bunun temel nedeni, sensörlerin ürettiği veri hacminin çok büyük olabilmesidir. Özellikle büyük endüstriyel tesislerde ya da akıllı şehirlerde kullanılan NiT sistemleri, saniyede binlerce veri paketini işleyebilir. Standart bir sunucu, bu yoğun veri trafiğini yönetmekte yetersiz kalabilir. Bu yüzden, özelleşmiş NiT sunucuları kullanılır. Bu sunucular, yüksek hacimli verileri işleyip analiz edebilecek kapasitededir ve gerçek zamanlı veri işlemeye uygundur.

NiT verilerinin buluta taşınması, sadece verilerin depolanmasını değil, aynı zamanda bu verilerin analiz edilmesini ve anlamlı bilgiye dönüştürülmesini sağlar. Bulut sistemleri, büyük veri analitiği, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi teknolojilerle entegre edilerek, toplanan verilerin daha hızlı ve etkili bir şekilde işlenmesine olanak tanır. Örneğin, bir üretim hattındaki NiT sensörleri tarafından toplanan veriler, bulut tabanlı sistemlere aktarılır ve burada analiz edilerek üretim süreçlerinin optimize edilmesi sağlanır.

NiT Bulutu, sağlık hizmetlerinden perakendeye, tarımdan imalat sanayine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu sistemler, verimlilik, maliyet tasarrufu ve gerçek zamanlı izleme gibi birçok avantaj sunar. Örneğin, sağlık sektöründe, bir hastanın vücut değerlerini ölçen sensörler, verileri sürekli olarak buluta aktarır ve doktorlar bu verilere anında erişerek gerekli müdahaleleri yapabilirler. Benzer şekilde, tarım sektöründe kullanılan toprak nem sensörleri, verileri buluta gönderir ve çiftçiler, bu verileri analiz ederek sulama stratejilerini optimize edebilirler.

NiT sensörlerinin topladığı büyük miktarda verinin verimli bir şekilde yönetilmesi ve işlenmesi için bulut teknolojisinin kullanılması gereklidir. Bulut teknolojisi hem depolama hem de analiz için ideal bir platform sunar ve bu sayede NiT tabanlı sistemler, farklı sektörlerde devrim niteliğinde yenilikler sağlayabilir (Tang, Sun, Liu and Gaudiot, 2017).

2.8 Artırılmış Gerçeklik-AG (Augmented Reality-AR)

Artırılmış gerçeklik (AG), günümüzün en hızlı büyüyen ve dinamik teknoloji trendlerinden biri olarak öne çıkıyor. Bu teknoloji, akıllı telefonlar ve diğer AG uyumlu cihazların artan erişilebilirliği sayesinde her geçen gün daha fazla kullanıcıya ulaşıyor. AG teknolojisi, kullanıcıların fiziksel dünyayı dijital bilgilerle zenginleştirerek, gerçek dünyayla etkileşim kurmasını sağlıyor. Günlük yaşamdan profesyonel alanlara kadar geniş bir yelpazede devrim niteliğinde yenilikler sunan bu teknoloji, BT şirketleri ve teknoloji devleri tarafından sürekli olarak geliştiriliyor ve yeni kullanım alanlarına entegre ediliyor.

AG ve BT Şirketleri: AG teknolojisinin sunduğu olanaklar, özellikle bilgi teknolojisi (BT) şirketleri için büyük fırsatlar yaratmaktadır. BT firmaları, AG uygulamaları geliştirerek farklı sektörlerin dijital dönüşüm süreçlerine katkıda bulunuyor. Örneğin, AG tabanlı yazılımlar ve çözümler, BT şirketlerinin müşterilerine daha etkileşimli ve kullanıcı dostu hizmetler sunmasını sağlıyor. İşletmeler, AG'nin sunduğu görselleştirme ve veri entegrasyonu olanaklarını kullanarak müşterileri deneyimini dönüştürmektedir. Bu durum, e-ticaret, dijital eğitim, sağlık ve iş gücü eğitiminde büyük etkiler yaratıyor.

Meta (eski adıyla Facebook) gibi teknoloji devleri, artırılmış gerçeklik teknolo-

jisinin potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için büyük yatırımlar yapmaktadır. Meta, "Metaverse" kavramını tanıtarak AG ve sanal gerçekliği (VR) birleştiren dijital bir evren oluşturmayı hedeflemektedir. Bu yeni dijital dünya, kullanıcıların gerçek zamanlı olarak sanal ortamlarla ve diğer kullanıcılarla etkileşim kurmasını sağlamaktadır. Meta, AG teknolojisini kullanıcı deneyimlerinin merkezine koyarak, iş dünyasından eğlenceye, eğitimden sosyal etkileşimlere kadar geniş bir alanda yenilikler sunmayı planlamaktadır. Bu girişim, BT sektöründe yeni iş modellerinin doğmasına ve dijital dönüşümün hızlanmasına katkıda bulunmaktadır (Alharthi, Alghamdi, Al-Ghaith and McAllen, 2022).

AG'nin Sektörel Kullanımları

Perakende Sektörü: AG, perakende sektöründe müşteri deneyimlerini büyük ölçüde geliştiren bir araç haline gelmiştir. Örneğin, IKEA'nın AG uygulaması IKEA Place, müşterilere mobilyaların evlerinde nasıl görüneceğini gerçek zamanlı olarak görselleştirme imkânı sunar. Bu tür uygulamalar, müşterilerin alışveriş deneyimlerini daha kişiselleştirilmiş ve etkileşimli hale getirir; aynı zamanda satın alma kararlarını kolaylaştırır.

Eğitim ve Simülasyon: Artırılmış gerçeklik, eğitim ve simülasyon alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıp öğrencileri, AG sayesinde insan vücudunun karmaşık yapısını 3D modellerle daha iyi anlayabilirken, mühendisler karmaşık makine yapılarını AG aracılığıyla inceleyebilirler. Bu teknoloji, öğrenme süreçlerini daha etkili hale getirerek, teorik bilgileri somut deneyimlere dönüştürür.

Askeri Uygulamalar: AG, askeri alanlarda da kritik bir rol oynamaktadır. Askeri pilotlar, kask vizörlerindeki AG projeksiyonları aracılığıyla uçuş sırasında önemli bilgileri gerçek zamanlı olarak görebilirler. Bu sistemler, savaş pilotlarının çevresel farkındalığını artırır ve karar verme süreçlerini hızlandırır.

Tıp ve Cerrahi Uygulamalar: Tıp alanında AG, cerrahların operasyonları daha hassas bir şekilde gerçekleştirmesine yardımcı olur. Beyin cerrahları, operasyon sırasında 3D beyin projeksiyonlarını kullanarak daha doğru kesimler yapabilir ve hastanın beyin yapısını daha iyi anlayabilirler. Bu tür AG uygulamaları, hem tıbbi hataları azaltır hem de hasta güvenliğini artırır.

Navigasyon ve Harita Sistemleri: AG, harita ve navigasyon sistemlerini de dönüştürmektedir. Gelişen AG destekli harita uygulamaları, kullanıcıların bir şehirde dolaşırken gerçek zamanlı olarak yönlendirilmesine olanak tanır. Bu sayede kullanıcılar, sanki fiziksel olarak şehirde gezmüş gibi bir deneyim elde ederler. Bu teknoloji, özellikle turizm ve lojistik gibi sektörlerde büyük faydalar sağlamaktadır (Ünal, 2022).

Meta'nın AG Stratejisi ve Metaverse

Meta (eski adıyla Facebook), AG ve VR teknolojilerine büyük yatırımlar yapı-

rak, bu teknolojilerin geleceğini şekillendirme konusunda öncülük etmektedir. Meta'nın "Metaverse" girişimi, sanal ve artırılmış gerçekliği birleştirerek dijital bir evren yaratmayı hedeflemektedir. Bu evrende kullanıcılar, sanal ortamlarla ve diğer kullanıcılarla gerçek zamanlı olarak etkileşim kurabilir, iş yapabilir ve sosyalleşebilir. Meta'nın bu stratejisi, AG ve VR'nin sadece eğlence sektörüyle sınırlı kalmadığını, iş dünyası, eğitim ve sosyal yaşamda da büyük değişiklikler yaratacağını göstermektedir.

Meta, aynı zamanda BT şirketleri için yeni iş fırsatları sunmaktadır. Metaverse'in altyapısını oluşturacak yazılım ve uygulamaların geliştirilmesi, BT firmalarına geniş bir pazar açmaktadır. Ayrıca, Meta'nın geliştirdiği AG uygulamaları, kullanıcıların işlerini daha verimli bir şekilde yürütmesine, sanal toplantılar yapmasına ve eğitim süreçlerini daha etkili hale getirmesine olanak tanır. Bu durum, hem Meta'nın teknoloji liderliğini pekiştirirken, hem de BT sektöründe AG'nin benimsenmesini hızlandırmaktadır.

Artırılmış gerçeklik, yalnızca eğlence değil, birçok sektörde devrim yaratan bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Kullanıcı deneyimini önemli ölçüde artıran AG, hem iş hem de günlük yaşamda daha fazla kullanılacak ve gelişmeye devam edecektir. AG'nin sunduğu olanaklar, BT şirketleri ve Meta gibi teknoloji devleri için büyük fırsatlar sunarken, kullanıcıların dünyayı algılayışını da dönüştürmektedir. Gelecekte, AG'nin akıllı şehirler, endüstriyel üretim ve eğitim gibi alanlarda daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir. Meta'nın Metaverse vizyonu ve AG yatırımları, bu teknolojinin hem tüketici hem de kurumsal alanlarda önemli bir yer edinmesini sağlayacaktır (Ünal, 2022).

2.9 Endüstri 4.0'a Hazırlık Durumlarının Kolay Ölçüm Yöntemi

Endüstri 4.0'ın kapsamı yalnızca tedarik zinciri veya üretimle sınırlı kalmaz; aksine, organizasyonun, sektörün ve hatta toplumun tüm yönlerini kapsar (Brettel, Friederichsen, Keller and Rosenberg, 2014). Bu nedenle, Endüstri 4.0'ın organizasyon stratejisi üzerindeki etkisi son derece belirleyici olacaktır. Organizasyonlar içinde Endüstri 4.0 ile birlikte değişecek uzun vadeli ilişkiler, organizasyon ve çevre arasındaki dinamikleri de etkileyecektir.

Artan dijital yakınlık, müşteri kabulü ve müşterilerin tasarım ile üretim süreçlerine entegrasyonu üzerine kurulu organizasyonlar ve değer zincirleri, iş birliğine dayalı süreçler aracılığıyla dağıtılmış ve esnek üretim sistemlerini hayata geçirir. Bu sayede, ürün ve hizmetlerin toplu olarak özelleştirilmesi mümkün hale gelir. Bu bağlamda, örgütsel strateji, bu ilişkilerin her birinde kritik bir rol oynayacak ve kuruluşların Endüstri 4.0'a hazırlıklı olup olmadıklarını değerlendirmenin en önemli bileşenlerinden biri olacaktır (Endüstri 4.0 Platformu, 2021).

Bu çalışmanın en önemli bulgularından biri, Tablo 2'de detaylandırılan CMMI

4-5 seviyeleri ile Endüstri 4.0 gereksinimlerinin karşılaştırılmasıdır. Tablo 2, iki modelin kritik unsurlarını doğrudan kıyaslayarak BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık seviyelerinin ölçümünde nasıl kullanılabilmesine dair somut bir çerçeve sunmaktadır. CMMI'nın 4 ve 5. seviyelerindeki süreç yönetimi ve kalite kontrol yöntemlerinin, Endüstri 4.0'ın talep ettiği ileri teknoloji, otonom sistemler ve dijitalleşme gibi gereksinimlerle büyük oranda örtüştüğü bu tabloda açıkça görülmektedir. Tablo 2, sadece BT sektöründe değil, diğer üretim ve hizmet sektörlerinde de Endüstri 4.0'a uyum sağlamada CMMI'nın ne kadar etkin bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu kıyaslama, Endüstri 4.0'ın altı temel ilkesinin (karşılıklı çalışabilirlik, sanallaştırma, özerk yönetim, gerçek zamanlı çalışma, hizmet oryantasyonu, modülerlik) CMMI'nın üst seviye hedefleriyle nasıl uyumlu olduğunu gözler önüne sermektedir.

Tablo 2. Endüstri 4.0 ile CMMI karşılaştırma tablosu (BT şirketleri için ve CMMI 4-5. Seviyelerde kullanılan ölçeklerden yararlanma tablosu)

	CMMI 4-5. SEVİYE	ENDÜSTRİ 4.0
Standart Gönüllü mü Zorlayıcı mı?	Gönüllü Standart (Zorlayıcı Değildir)	Gönüllü Standart (Zorlayıcı Değildir)
Kullanılmaya Başlandığı ilk sektör	Önce BT şirketlerinde yazılım süreç ve kalite kontrolü amacıyla icat edildi	İlk defa ağır sanayi şirketleri için önerildi
İlk önerilme tarihi	2002	2011
Diğer sektörlerde kullanımı	İçinde Üretim ve Süreç Yönetimi olan her sektörde kullanılabileceği konusunda kendisini ispat etmiştir.	Son teknoloji ürünleri BT'ye dayalı üretim olan her sektörde kullanılabileceği konusunda kendisini ispat etmiştir
Gelişmeye devam ediyor mu?	Son olarak 2018 yılında ciddi bir güncelleme görmüştür	Şimdiden Endüstri 5.0 tanımlanmıştır.
İlk İcat edildiği Ülke	ABD	Almanya (Japonya)
Prosedürleri	Çok yetenekli deneticileri ve sıkı prosedürleri vardır	Prosedür takibi yerine Hazırlık İndeksi konusunda görüş belirlemiştir.
Kaç seviyesi var	5	Geliştirilen ölçeğe göre puanı olabilir

Öne çıkan teknolojiler	Yapay Zekâ (AI), Big Data, Nesnelerin İnterneti, Hizmetlerin İnterneti, 3 Boyutlu Yazıcılar, Otonom Robotlar, Siber Güvenlik, Bulut Teknolojileri, Artırılmış Gerçeklik, Yatay ve Dikey Entegrasyon, Mobil Teknolojiler, RFID ve RTLS, Benzetim (Simülasyon)	Yapay Zekâ (AI), Big Data, Nesnelerin İnterneti, Hizmetlerin İnterneti, 3 Boyutlu Yazıcılar, Otonom Robotlar, Siber Güvenlik, Bulut teknolojileri, Artırılmış Gerçeklik, Yatay ve Dikey Entegrasyon, Mobil Teknolojiler, RFID ve RTLS, Benzetim (Simülasyon)
------------------------	--	--

Tablo-2’de, Endüstri 4.0 ve CMMI (Yetenek Olgunluk Model Entegrasyonu) 4-5. seviyeleri arasında karşılaştırmalar görülmektedir. Her iki modelin benzerlikleri ve farklılıkları belirtilmiş, özellikle standartların gönüllü olma durumu, ilk hizmete sunulma tarihi/yılı, diğer sektörlerdeki kullanımı, sürekli gelişim, ilk icat edildiği ülkeler, prosedürleri, kaç seviyesi olduğu ve öne çıkan teknolojiler gibi çeşitli başlıklar altında kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırma, BT şirketlerinin Endüstri 4.0’a hazırlık durumlarını CMMI kriterleri ile değerlendirmek için kullanılmaktadır. Her iki modelin de gönüllü standartlar olduğu, farklı sektörlerde kullanılabilirliği ve sürekli gelişim gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, her iki modelin de benzerlikleri tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo-2 incelendiğinde Otonom Robotlar’ın BT şirketleri ve özellikle kod yazılımcıları için geçerli olmayabileceği düşünülebilir. Oysa bu görüş yanlıştır. Son zamanlarda her sektörde olduğu gibi BT şirketleri ve özellikle yazılım sektörleri için de kod üreten yazılımlar öne çıkmıştır.

Yukarıda görülen Tablo-2, Endüstri 4.0 ve CMMI arasındaki ilişkiyi göstermesi bakımından önemlidir. Özellikle, Endüstri 4.0’ın 4. ve 5. seviyeleriyle CMMI’nin ilgili yönleri arasındaki paralellikler ve etkileşimler karşılaştırmalı olarak ifade edilmiştir. Tablo 2, her iki kavramın nasıl birbirini tamamladığını ve birleştiğinde nasıl daha güçlü bir çerçeve oluşturduğunu anlamak açısından önemlidir. Tablonun içeriği, CMMI ve Endüstri 4.0 modellerinin uygulama süreçlerindeki kritik unsurları ve bu unsurların iş dünyasındaki etkilerini daha görünür hale getirmektedir. Özellikle, işletmelerin süreç iyileştirmesi, verimlilik artışı ve dijital dönüşüm gereksinimlerine nasıl cevap verdikleri tablo üzerinden net bir şekilde anlaşılabilir.

Tablo-2, Endüstri 4.0 ve CMMI (Yetenek Olgunluk Modeli Entegrasyonu) 4-5. seviyeleri arasındaki ilişkiyi vurgulamak ve daha iyi anlamak bakımından önemlidir. Bu, Endüstri 4.0’ın temel unsurları ve CMMI’nin ilgili yetkinlik seviyeleri arasındaki uyumu ortaya koyuyor. Tablo-2, Endüstri 4.0 kapsamında teknolojik ve işlemsel gelişmelerin, CMMI’nin daha yüksek seviyelerine ulaşmak için nasıl

entegre edilebileceğini vurguluyor. Bu entegrasyonun, işletmelerin süreçlerini ve performansını iyileştirmede kritik bir rol oynadığı anlaşılıyor.

Hazırlık durumunu anlamak için öne çıkan teknoloji ve insan etkileşimini etkileyen yeni nesil konsept anlayışının uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu durumda Endüstri 4.0 için farklı sanayiler ve farklı bölgelerde kullanılabilecek bir hazırlık durumunun ölçümü konusunda daha önce yapılmış CMMI 4-5 seviyelerindeki şirketlerin incelemesinde ve süreç analiz ve yönetiminde kullanılan yol ve yöntemlerden ve araştırılan konulardan derinlemesine yararlanabileceği de ortaya konulmuştur.

2021 itibarıyla, 106'dan fazla ülkede 10,000'den fazla işletme CMMI modellerini benimsemiştir. Bu sayı, yalnızca BT şirketleri değil, geniş bir organizasyon yelpazesini içerir ve CMMI standartlarının küresel olarak benimsenme derecesi hakkında yaklaşık bir fikir verir (www.isaca.org).

Eş deyişle yukarıda temelleri anlatılan ve oluşturulacak bir çerçeve ile hazırlık durumlarının ölçümü sayesinde dünya üzerinde on binin üzerinde BT işletmesinin Endüstri 4.0 hazırlık durumu son derece optimum bir yöntemle ölçülebilecektir.

Kısaca bakılacak olursa, CMMI seviyesi 4 ve 5 olarak sertifikalandırılmış BT şirketlerinin Endüstri 4.0 hedeflerine sahip olduğu söylenebilir. Bunun altındaki seviyelerde ise bu sertifikanın seviyesine göre yapılacak işler bir bakıma aynı akış şemasındaki seviyenin 4 ve 5 seviyesine çıkarılması ile aynıdır. Yani bir bakıma 3 seviyesindeki bir BT şirketinin 4'e ulaşması Endüstri 4.0 hedefine ulaşması ile aynı anlamı taşıyacaktır.

BT şirketleri ile ilgili bu düzeyde hazır olan yöntemin diğer alanlar ile ilgili olarak da kullanılması olanaklıdır. Hatta günümüzde tüm üretim süreçlerinde kendisini hissettiren YZ ve BT teknolojilerine dayalı süreçler düşünüldüğünde bu teknik tüm alanlara uygulanabilir. Bir bakıma içinde üretim olan tüm işletmeler için CMMI kullanılabileceğinden ve üretim süreçlerinin ise giderek artan oranda BT teknolojilerine dayandığından bu yöntemin kullanılabilir olduğu ve sanayide sürekli değişen modeller kullanılmasından kaynaklı kafa karışıklığının giderileceği de söylenebilir.

2.10 Çalışmanın Metodoloji

Bu çalışma, CMMI 4 ve 5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumlarını değerlendirmek için sistematik bir yaklaşım geliştirmeyi hedeflemektedir. Araştırmada, karşılaştırmalı analiz yöntemi kullanılarak, CMMI süreç yönetimi standartları ile Endüstri 4.0 gereksinimleri arasındaki benzerlikler incelenmiştir. Çalışmanın temel adımları aşağıdaki gibidir:

Literatür Taraması: CMMI ve Endüstri 4.0 ile ilgili mevcut akademik literatür ve sektörel raporlar incelenmiştir. Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın getirdiği yeni teknolojik gereksinimler ve CMMI seviyelerinin süreç yönetimi açısından sunduğu katkılar değerlendirilmiştir (Brettel et al., 2014; Yıldırım, 2018).

Veri Kaynakları: Çalışma kapsamında, 2011 sonrası Endüstri 4.0 uygulamalarına dair vaka incelemeleri ve CMMI sertifikasına sahip şirketlerle ilgili bilgiler elde edilmiştir. Ayrıca, CMMI sertifikasına sahip işletmelerin Endüstri 4.0'a uyum düzeylerini anlamak için geçmiş çalışmalardan faydalanılmıştır.

Tablo 1 Karşılaştırma Modeli: Çalışmanın odak noktasını oluşturan Tablo 1, CMMI 4-5 seviyeleri ile Endüstri 4.0 standartlarını karşılaştıran temel çerçeve olarak geliştirilmiştir. Bu tablo, BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a ne ölçüde hazır olduklarını değerlendirmede kullanılan bir araçtır. Bu karşılaştırma sayesinde, iki modelin süreç yönetimi ve teknoloji entegrasyonu açısından örtüşen ve farklılaşan yönleri belirlenmiştir.

Alan Uygulamaları ve Vaka Çalışmaları: BT sektöründe CMMI'nin 4 ve 5. seviyelerine ulaşan firmalar incelenmiş ve bu firmaların Endüstri 4.0'a geçiş süreçlerindeki performansları analiz edilmiştir. Özellikle üretim süreçlerinin otomasyonu, veri temelli karar alma mekanizmaları ve ileri teknoloji kullanımı bu aşamada dikkate alınmıştır.

Veri Analizi: Çalışma boyunca elde edilen bulgular, nitel analiz teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Endüstri 4.0'ın teknolojik gereksinimlerini karşılamak üzere, CMMI'nin sağladığı süreç yönetimi avantajları karşılaştırılmıştır.

Sonuçların Değerlendirilmesi: BT şirketleri ve diğer sektörler için Endüstri 4.0'a geçişte CMMI 4-5 seviyelerinin ne ölçüde etkili olduğu incelenmiş ve öneriler geliştirilmiştir. Bu yöntem, diğer sektörlerde de uygulanabilir bir model önerisi sunmaktadır.

2.11 Tartışma

Bu çalışma, CMMI Seviye 4-5 sertifikalı BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumunu değerlendirirken, süreç olgunluğu ile dijital dönüşüm arasındaki güçlü ilişkiyi ortaya koymaktadır. CMMI'nin ileri seviye süreç iyileştirme ve kalite güvence yaklaşımlarının, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği veri odaklı karar alma, otomasyon ve ileri teknoloji entegrasyonu gibi unsurlarla örtüştüğü gözlenmiştir. Ancak, CMMI ile Endüstri 4.0 arasında %100 uyumlu bir yapının olup olmadığı konusunda bazı belirsizlikler devam etmektedir. Örneğin, CMMI süreç yönetimi modeli, Endüstri 4.0'ın belirli sektörlerde gerektirdiği özel teknoloji ve operasyonel değişikliklere tam anlamıyla cevap veremeyebilir. Bununla birlikte, çalışma bulguları, CMMI'nin süreç odaklı yaklaşımının, Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde organizasyonlara büyük avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Özellikle BT şirketleri açısından CMMI'nin üst seviye olgunluk seviyelerine ulaşmış olanların, Endüstri 4.0'ın ileri düzeyde otomasyon ve dijitalleşme gereksinimlerine büyük ölçüde hazır olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, CMMI'nin diğer sanayi dallarına uygulanabilirliği, her sektörde aynı derecede etkili olup olmadığı konusunda daha fazla araştırmayı gerekli kılmaktadır. Örneğin, üretim sektörü gibi fiziksel operasyonların daha yoğun olduğu alanlarda, Endüstri 4.0'ın temel prensipleriyle tam bir uyum sağlanması, CMMI'nin sunduğu süreç yönetimi modeli ile yeterince desteklenemeyebilir.

Literatürde, Endüstri 4.0 ile CMMI arasındaki ilişkiye dair sınırlı sayıda araştırma bulunmakta olup, bu çalışma literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. CMMI'nin Endüstri 4.0'a entegrasyonunu daha geniş bir perspektiften ele alarak, özellikle veri temelli yönetim ve otomasyon odaklı sistemlerde süreç iyileştirmenin potansiyel etkilerini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, BT dışındaki sektörlerin CMMI'nin sunduğu modelle ne ölçüde dijital dönüşüm gerçekleştirebileceği konusu da daha derinlemesine araştırılmalıdır.

CMMI 4 ve 5 seviyeleri ile Endüstri 4.0'ın gerektirdiği olgunluk ve dijitalleşme süreçleri arasındaki uyum, BT şirketleri için güçlü bir başarı faktörü olarak değerlendirilebilir. Ancak, farklı sektörlerdeki uygulamaları derinlemesine araştırarak, Endüstri 4.0'a geçişte CMMI'nin diğer sanayi dallarında ne kadar etkili olduğunu belirlemek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

3. Sonuç Değerlendirme ve Öneriler

Yazılım sektörü için geliştirilen ve süreç yönetiminde kullanılan CMMI endeksi giderek sadece yazılım sektöründe değil tüm üretim ve süreç yönetimi olan her alanda kullanılabilir bir standart haline geldi. CMMI'nin giderek genişlemesinin aksine Endüstri 4.0 ise daha en başından çerçevesini çok geniş tutmuştur. Öte yandan henüz Endüstri 4.0'a pek çok alanda geçilmemiş iken şimdilerde ise Endüstri 5.0 konsepti ortaya atılmıştır. Yine de bu durum Endüstri 4.0 için güvenilir bir hazırlık endeksi ihtiyacını ortadan kaldırmamıştır (Aslam, Amin, Li and Ur Rehman, 2020).

Bu makalede incelendiği gibi konuyu sadeleştirmek ve sektörel bazda uygulanabilirliğini anlamak adına iki konseptin birbirinden yararlanması oldukça doğal ve gerekli bir bakıştır. Nitekim yazılım üreten şirketler zaten üretimlerini BT araçlarıyla yaptığından bu araçları kullanma konusunda tereddüt olmayan firmalardır. Öte yandan süreç yönetimi bakımından ise CMMI çerçevesinin kullanıldığı kalite güvence yaklaşımları aynı zamanda BT araçlarının doğru ve verimli kullanımını da garanti etmektedir.

Yukarıdaki karşılaştırmalı tablolar CMMI çerçeve yaklaşımlarının Endüstri 4.0 hazırlık durumunun ölçümü açısından kullanılabileceğini yazılım sektörü açısın-

dan ortaya koymuştur. Ancak bu durum ayrıca diğer sektörler açısından da kullanılabilirliğini de ortaya koymuştur. Çünkü tek işi BT araçlarını kullanmak olan yazılım şirketlerinde Endüstri 4.0 hazırlık ölçümlerinin yapılması ile diğer şirketler arasında bazı farklar olacağı muhakkaktır (Endüstri 4.0 Platformu, 2021).

Öte yandan bir alanda süreç yönetimi varsa CMMI kalite güvencesi olarak o alanda kullanılabilirliğini geçen yıllar içinde ispatlamış bir standarttır. Aynı mantık ile bakıldığında yazılım sektörü BT araçlarının en iyi kullanıldığının kabul edilebileceği iyi bir laboratuvar olmuştur.

Aradaki fark sadece üretim araçlarının çeşitliliğidir. Ürünlerin farklı olduğunu söylemek ise tüm sektörler düşünüldüğünde doğru bir yaklaşım olamaz. Merkezdeki bakış filtresine üründeki farklılık konulursa ortaya ürün adedi kadar fazla endeks gerektiği çıkacaktır.

Sadece somut ve soyut ürünler bakımından bakıldığında ise yazılım ürünleri gibi başkaca pek çok ürün de soyuttur. O halde üretimi yapılan ürünlerden çok üretim araçlarına ve yöntemlerine odaklanmanın daha isabetli bir yaklaşım olduğu da böylece ortaya çıkmıştır.

Endüstri 5.0 ise daha çok toplum ile üretimi bir zincir olarak ele almaktadır. Burada bireyler sipariş-üretim-tedarik zincirinin mutlak bir parçasıdır. Bu ise Endüstri 4.0'ın tamamlanmasından ya da geniş kapsamlı olarak uygulanmasından önce mümkün değildir. Ancak tamamen geçilmesi bir sürece dayalı da olsa kısmi geçişlerin başlaması da kaçınılmazdır. Yani bu iki sürecin ardıl olduğu ve sebep sonuç ilişkisine dayandığı görülmektedir.

Ağır sanayi ve özellikle demir çelik sektörünün içinde olduğu alanlarda kullanılan otonom robot ve 3-boyutlu yazıcılar Türkiye'de de kullanılmaya başlamıştır. Ancak sağlık sektöründe ise Yapay Zekâ kullanımı daha net bir ölçüm aracıdır. Artırılmış Gerçeklik, Yatay ve Dikey Entegrasyon, Mobil Teknolojiler, RFID ve RTLS, Benzetim (Simülasyon) ise bu amaçla geliştirilecek bir ölçüm modeli için daha belirgin ve belirleyici ölçütler olarak araştırılması gereken konulardır.

CMMI süreç yönetiminin ayrılmaz bir parçası ise seviye 4-5 arasında süreçlerin otomatik olarak ve uzaktan yönetilebilen bir hal almasıdır. CMMI seviye 5 olduğunda ise büyüme küçülme gibi becerileri öğrenmesi ve eksikleri giderebilen bir hal almasıdır. Doğal olarak süreçlerin bu ölçüde yüksek bir güvenilirlik ve zekâ ile sevk ve idaresinin ise ancak siparişten üretime tüm alanlarda ya da bir diğer deyişle uçtan uca dijitalleşmiş bir sistemden bahsedildiğini ortaya koymaktadır (SEI, 2021).

BT firmalarının kullandıkları araçlara çeşitli ve BT destekli yeni nesil üretim araçlarının araştırılması ise diğer sektörlerde de bazı değişiklikler ve ilavelerle Endüstri 4.0 hazırlık ölçüm modeli hazırlanabileceğini göstermiştir.

Bu makalede, Endüstri 4.0 hazır olma ölçüm modeli oluşturulmasında CMMI

seviye 4-5 çerçeve yaklaşımının BT firmaları özelinde kullanımının sağlıklı bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir. Bu durumda tüm sektörleri için farklılaşan diğer teknoloji ve süreçler de genel başlıklar altında toplanabilirse bu durumda yeni bir Endüstri 4.0 hazır olma durumuna ilişkin bir hazır olma ölçüm modeli hazırlanabilecektir.

CMMI'nın Endüstri 4.0'a geçişteki kritik bir role sahiptir. CMMI seviyeleri, özellikle 4 ve 5, dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0'a geçişte büyük bir önem taşımaktadır. Bu seviyeler, süreç iyileştirme ve kalite yönetimi gibi konularda ileri düzeyde bir olgunluk gerektirir. Bu olgunluk, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği otomasyon, veri temelli karar alma ve ileri teknoloji entegrasyonunu başarıyla gerçekleştirmek için kritik öneme sahiptir. CMMI 4-5 seviyesindeki şirketler, süreçlerinde elde ettikleri olgunluğu dijitalleşme süreçlerine uyarlayarak Endüstri 4.0'ın gereksinimlerine hazır bir yapıya kavuşmaktadır.

Önerilen model ilerleyen zamanlarda ve uygulama pratikleri izlendikten sonra diğer sektörlerde de uygulanabilir. Bu çalışmada geliştirilen CMMI tabanlı değerlendirme çerçevesi, sadece BT sektörüyle sınırlı kalmamakta, diğer sektörlerde de adapte edilebilecek bir model sunmaktadır. Süreç yönetimi ve kalite güvenesi, günümüzde tüm üretim ve hizmet sektörlerinin merkezinde yer aldığından, CMMI kriterlerine dayalı bu yaklaşım, farklı sektörlerdeki Endüstri 4.0 dönüşüm süreçlerinde de uygulanabilir. Özellikle üretim, sağlık ve hizmet gibi dijitalleşmenin önemli olduğu alanlarda CMMI'nın sağladığı süreç olgunluğu ile Endüstri 4.0 hazırlık seviyesi ölçülebilir ve iyileştirilebilir.

Çalışma aynı zamanda Endüstri 5.0'a hazırlık sürecine de ışık tutmaktadır. Endüstri 4.0 henüz tam anlamıyla tüm sektörlerde uygulanmamışken, Endüstri 5.0 kavramı gündeme gelmiştir. CMMI seviyelerine dayalı süreç yönetimi modelleri, Endüstri 5.0'a hazırlıkta da etkili bir araç olabilir. Özellikle insan-merkezli üretim süreçlerine odaklanan Endüstri 5.0, CMMI'nın süreç iyileştirme yaklaşımını daha da ileri taşıyarak birey ve teknoloji arasındaki iş birliğini optimize etmeye yardımcı olabilir.

Önerilen model süreç iyileştirme ve sürekli gelişim amaçlayan her işletme ve üretim sürecinde kullanılacak bir öneri sunmaktadır. CMMI'nın en üst seviyeleri, sürekli iyileştirme ve esneklik üzerine kuruludur. Bu, Endüstri 4.0'ın temel prensipleri olan modülerlik, gerçek zamanlı işlem ve otomasyon gibi süreçlerle doğrudan uyumludur. Sürekli gelişime odaklanan bir yaklaşım, Endüstri 4.0'a geçişte kısa vadeli başarılar kadar uzun vadeli sürdürülebilirliği de sağlamaktadır. CMMI-5 seviyesine ulaşan şirketler, sadece Endüstri 4.0'a hazır olmaz aynı zamanda değişen teknoloji trendlerine daha hızlı uyum sağlayacak esneklikte süreçlere sahip olurlar.

BT dışındaki sektörlerde uygulanabilirliği üzerine daha somut öneriler vermek gerekirse bazı örnekler şunlardır:

Üretim Sektörü: CMMI'nin süreç iyileştirme ve kalite güvence mekanizmaları, özellikle Endüstri 4.0'ın gerektirdiği otomasyon ve veri tabanlı karar verme süreçleri için üretim sektörüne uyarlanabilir. Öneri olarak, üretim şirketlerinin, CMMI'nin süreç yönetim sistemlerini kullanarak makine öğrenimi ve IoT (Nesnelerin İnterneti) sistemlerinin entegrasyonunu optimize etmeleri sağlanabilir. Üretim hattındaki performans verileri, CMMI'nin 4-5 seviyelerindeki veri analiz süreçleriyle izlenebilir ve sürekli iyileştirme sağlayan döngüsel süreçler kurulabilir.

Sağlık Sektörü: Sağlık sektöründe CMMI, dijitalleşme ve otomasyon süreçlerine uyarlanarak kullanılabilir. Sağlık kuruluşları, hastane yönetimi, tıbbi cihazlar ve veri yönetimi süreçlerini optimize etmek için CMMI'nin süreç iyileştirme ilkelerini benimseyebilir. Örneğin, IoT cihazları ile toplanan hasta verilerinin analizi ve hastane süreçlerinin otomasyonu CMMI'nin süreç odaklı modeliyle desteklenebilir. Sürekli iyileştirme yaklaşımı, özellikle hasta güvenliği ve hizmet kalitesinde önemli ilerlemeler sağlayabilir.

Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi: CMMI'nin süreç optimizasyonu, lojistik ve tedarik zinciri yönetiminde de uygulanabilir. Lojistik süreçlerinin otomasyonu, stok yönetimi, dağıtım ağları ve gerçek zamanlı veri analizi gibi alanlarda CMMI'nin 4-5 seviyelerindeki veri yönetimi ve süreç takibi modelleri devreye alınabilir. Öneri olarak, tedarik zinciri boyunca izlenebilirlik ve performans iyileştirmesi için CMMI'nin süreç iyileştirme modelleri, Endüstri 4.0 teknolojileriyle birleştirilebilir.

Örnekler çoğaltılabilir. Ancak bu modelin sadece BT sektörü ile sınırlı olmadığı açıkça görülmektedir. Gelecekte bu iki modelin de kendi içlerinde daha da gelişmeye açık olduğu görülmektedir. Ancak birlikte çalışma bakımından da gelişmesi ve çalışmamızın bu yöndeki çalışmalara destek sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- Alharthi, A. M., Alghamdi, A. A., Al-Ghaith, W., & McAllen, D. (2022). Metaverse as a digital business ecosystem: The economics and business models of hyperconnectivity. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 28(9), 52-73. Doi: <https://doi.org/10.1108/IJEER-12-2021-0984>
- Ariffin, K. A. Z., & Ahmad, F. H. (2021). Indicators for maturity and readiness for digital forensics investigation in era of industrial revolution 4.0. *Computers & Security*, 105, 102237. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102237>
- Aslam, F., Aimin, W., Li, M., & Ur Rehman, K. (2020). Innovation in the Era of IoT and Industry 5.0: Absolute Innovation Management (AIM) Framework. *Information*, 11(2), 124. Doi: <https://doi.org/10.3390/info11020124>
- Basl J. (2018) Analysis of Industry 4.0 Readiness Indexes and Maturity Models and Proposal of the Dimension for Enterprise Information Systems. In: Tjoa A., Raffai M., Doucek P., Novak N. (eds) *Research and Practical Issues*

of Enterprise Information Systems. CONFENIS 2018. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 327. Springer, Cham. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99040-8_5

- Brettel, M, Friederichsen, N, Keller, M, Rosenberg, M, (2014). World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, *Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol:8, No:1, 2014
- Bottani, E., & Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IJSE Transactions*, 51(3), 284-310. Doi: <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
- CMMI Principles and Values, May 2018, [online] Available: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh765978\(v=vs.120\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh765978(v=vs.120).aspx) .
- Endüstri 4.0 Platformu (Bağlantı Tarihi: 05.02.2021) www.endustri40.com/teknik
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Jiang, P., Liu, Z., Niu, X., & Zhang, L. (2021). A combined forecasting system based on statistical method, artificial neural networks, and deep learning methods for short-term wind speed forecasting. *Energy*, 217, 119361. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119361>
- Leyh C., Schäffer T., Bley K., Forstenhäusler S. (2017) Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0. In: Ziemba E. (eds) *Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions. ISM 2016, AITM 2016. Lecture Notes in Business Information Processing*, vol 277. Springer, Cham. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53076-5_6
- Machado, C. G., Winroth, M., Carlsson, D., Almström, P., Centerholt, V., & Hallin, M. (2019). Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enabler towards increased digitalization. *Procedia CIRP*, 81, 1113–1118. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.262>
- Muelaner, J. (2020). *Unsettled Technology Domains for Rapid and Automated Verification of Industry 4.0 Machine Tools*. SAE International. Doi: <https://doi.org/10.4271/epr2020019>
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855-873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>

- Rauschnabel, P. A., Rossmann, A., & tom Dieck, M. C. (2017). An adoption framework for mobile augmented reality games: The case of Pokémon Go. *Computers in Human Behavior*, 76, 276-286. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.07.030>
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihni, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161-166. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Schwab, K. (2016). *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum.
- SEI, (Software Engineering Industry) Bağlantı Tarihi, 02.03.2021) www.sei.cmu.edu Capability Maturity Model Integration - CMMI® version 1.3. Software Engineering Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- Stentoft, J., Jensen, K. W., Philipsen, K., & Haug, A. (2019). Drivers and Barriers for Industry 4.0 Readiness and Practice: A SME Perspective with Empirical Evidence. Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii International Conference on System Sciences. Doi: <https://doi.org/10.24251/hicss.2019.619>
- Sony, M., & Naik, S. (2019, January 29). Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: A literature review. Retrieved February 11, 2021, from <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BIJ-09-2018-0284/full/html>
- Tang, J., Sun, D., Liu, S., & Gaudiot, J.-L. (2017). Enabling Deep Learning on IoT Devices. *Computer*, 50(10), 92-96. Doi: <https://doi.org/10.1109/mc.2017.3641648>
- Ünal, C., Sungur, C., & Yildirim, H. (2022). Application of the maturity model in industrial corporations. *Sustainability*, 14(15), 9478.
- Ünal, C., (2022) *Sanayi 4.0 için hazırlık ve uygunluk endeksi modeli geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi
- Yıldırım, H. Doktora tezi, THE APPLICATION OF SHIPBUILDING MANAGERIAL AND OPERATIONAL CAPABILITY ASSESSMENT MODEL (S-MCM) TO TURKISH SHIPYARDS, Piri Reis Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- Wood, P. B., & Vickers, D. (2018, March). Anticipated impact of the capability maturity model integration (CMMI®) V2. 0 on aerospace systems safety and security. In *2018 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-11). IEEE.
- Zubrow, D., High Maturity Software Engineering Measurement and Analysis, May 2018, [online] Available: https://insights.sei.cmu.edu/sei_blog/2012/02/high-maturity-software-engineering-measurement-and-analysis.html.



2024 YILI MAKALE DİZİNİ

TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından ülke sanayisinin, toplumun, Odamıza üye olan meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın ihtiyaçlarını karşılamak üzere 1957'den bugüne değin yayımlanan Mühendis ve Makina Dergisi'nde 2024 yılında yer alan makalelerin dizinini siz değerli okurlarımızla paylaşıyoruz. 3 aylık periyotlar ile yayımlanan, ülkemizin konusunda önde gelen dergilerinden olan Mühendis ve Makina, yeni teknolojileri, bilimsel araştırma ve inceleme konularını ve mühendisliğe ilişkin birikimleri sayfalarına taşıyarak Oda üyelerine ve ilgili kesimlere bu birikimlerini ulaştırma çabasıdadır. Dergimizde üniversiteler ve bilim-araştırma kurumlarından gelen makalelerin yanı sıra, çeşitli sektörlerden gelen uygulamaya yönelik makalelere de yer verilmektedir.

2024 yılında dergimize makale gönderen bütün yazarlara teşekkür eder, 2025 yılında da değerli katkılarını bekleriz.

OCAK-MART 2024 714. SAYI

Araştırma Makaleleri / Research Articles

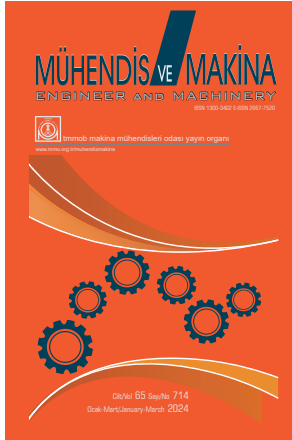
Ticari Bir Soğutucuda Ürün Sıcaklık Sınıflarının Enerji Tüketimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of the Effect of Product Temperature Classes on Energy Consumption in A Closed Display Refrigerator

**F. Mertkan ARSLAN, Hüseyin GÜNERHAN,
Hakan TAVUKCU, Binnur SOYSAL, Sertan AKSOY,
Bora DEVRİM**

Comparison of Machinability of Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC For Multi-Layer Coated Insert: Validated Fem and Statistical Approaches

Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC'nın Çok Katmanlı Kaplamalı Kesici Takımlarla İşlenebilirliğinin Karşılaştırılması: Doğrulanmış Fem ve İstatistiksel Yaklaşımlar
Erkan ÖZTÜRK



Tel Örgü Katmanlarının Faz Deęiřtiren Malzeme Üzerindeki Isıl Performansı Etkisinin Deneysel İncelenmesi

Experimental Investigation of the Thermal Performance Effect of Wire Mesh Layers on Phase Change Material

Mustafa Yasin GÖKASLAN

Evaluation of the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Designed in Different Sizes

Farklı Ebatlarda Tasarlanan Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi Performanslarının Değerlendirilmesi

Adem YILMAZ, Sinan ÜNVAR, Bünyamin AYGÜN

LPG Yakıtlı Buji Ateřlemeli Motorlarda Strok/Çap Oranı Etkilerinin Ekserji Analiziyle İncelenmesi

Investigation of Stroke/Bore Ratio Effects in LPG Fuelled Spark Ignition Engines Via Exergy Analysis

İsmet SEZER

Ploughshares Material Selection: Shannon's Entropy Based Fuzzy Topsis Application

Pulluk Uç Demiri Malzeme Seçimi: Shannon Entropi Temelli Bulanık Topsis Uygulaması

Ahmet Bilal ŐENGÜL Derleme Makaleleri / Review Articles

Derleme Makaleleri / Review Articles

Geleceğin Enerji Depolama Teknolojileri, Sürdürülebilirlik ve Enerji Dönüşümü

Future Energy Storage Technologies, Sustainability and Energy Conversion

Edip TAŞKESEN, Hamza ALAHMAD, Elif Nur BİLEN

Tedarik Zincirinde Direnç Konulu Literatürün Bibliyometrik Analizi Bibliometric

Review of Resilience in Supply Chain Literature

Batuhan KOCAOęLU, Utkan ULUÇAY

NİSAN-HAZİRAN 2024 715. SAYI

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Crack Growth Simulations in Adhesively Bonded Joints
Yapıştırma Bağlantılarında SMART Yöntemi ile Çatlak İlerleme Simülasyonları

Ahmet Can YILDIZ, Tezcan ŞEKERCİOĞLU

Bulaşık Makineleri İçin Doğal Havalandırma Yöntemini Kullanan Yeni Bir Kurutma Sistemi Tasarımı ve Deneysel Analizi

Design and Experimental Analysis of A New Drying System Using Natural Ventilation For Dishwashers

Fatih ENGİNSEL, Halil Kürşad ERSOY

Sequencing Model For A Seat Belt Manufacturer

Bir Emniyet Kemerı Üreticisi İçin Sıralama Modeli

Talha SATIR, Aleyna KARATAS, Yasemin GUVENDI FILIZ, Mohammed Mohanad Yawar SAYAN, İlayda ULKU

Optimizing Renewable Energy Integration: A Case Study of Standalone PV-Battery Systems in İztech Campus

Yenilenebilir Enerji Entegrasyonunun Optimize Edilmesi: İytech Yerleşkesindeki Bağımsız PV-Pil Sistemlerine İlişkin Bir Örnek Olay İncelemesi

Beste RAMAZAN, Emin AÇIKKALP, Başar ÇAĞLAR

Optimization Of A Thermoelectric Cooler For A Turbocharged Tractor

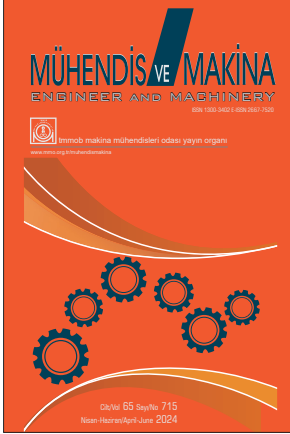
Turboşarjlı Bir Traktör İçin Bir Termoelektrik Soğutucunun Optimizasyonu

Ali Kürşad ARICIOĞLU, Gülay YAKAR, Ali GÜRCAN

Bir Mobil Silah Platformunda Süspansiyon Sisteminin Atış Kalitesine Etkisinin Değerlendirilmesi

Evaluation On The Effect Of Suspension System To Pointing Quality In A Mobil Weapon Platform

Cem ONAT, Berk TOPÇUOĞLU, Umut ARDA, Mustafa AKTEMUR



TEMMUZ-EYLÜL 2024 716. SAYI

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Covid 19 Pandemisinin Kocaeli İli Toplu Ulaşım Sistemi Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi
Investigation of The Effect Of The Covid 19 Pandemic On Energy Consumption of Natural Gas Buses In Kocaeli Province Public Transportation System

İsmail GÜLSOY, Mustafa ÖZCAN

Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Ankara, Gaziantep, Kars
Determination Of Biogas Production Potential From Animal Manure: Specific To The Provinces Of Ankara, Gaziantep, Kars
Utku CANCI MATUR, Aytaç ATASAYIN

The Impact Of Covid-19 On The Technology Sector: The Case Of The Turkish Consultancy Company
Covid-19'un Teknoloji Sektörüne Etkisi: Bir Danışmanlık Şirketi Örneği

Eda GÖZÜTOK, İlayda ÜLKÜ

Ticari Biyokütle Yakma Sistemlerinde Kül Kaynaklı Problemler Üzerine Bir Değerlendirme
An Assessment On Ash-Related Issues In Commercial Biomass Combustion Systems

Anıl BADEM, Hayati OLGUN

Derleme Makaleleri / Review Articles

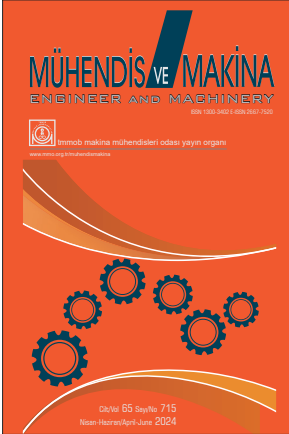
Compliance Strategy For The Certification of Environmental Control System In Military Applications
Çevresel Kontrol Sistemi'nin Askeri Uygulamalara Özel Uçuşa Elverişlilik Sertifikasyonuna İlişkin Uyum Doğrulama Stratejisi
Emre GÜLER

Matris Malzemesi Olarak Alüminaya Titanyum ve Grafen İlavelerinin Etkilerinin Belirlenmesi

Determination Of The Effects Of Titanium and Graphene Additions To Alumina As A Matrix Material

Samet YAVUZ, Mevlüt GÜRBÜZ

Electricity Generation Methods From Solar Energy
Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Yöntemleri
Berire Şen AYVAZ, Alper BAYRAK



EKİM-ARALIK 2024 717. SAYI

Araştırma Makaleleri / Research Articles

60° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizisinde Isı Transferi Etkilerinin İncelenmesi

Investigation of Heat Transfer Effects in A Confined Impinging Jet Array With 60° Inclined Secondary Jets

Haluk KELEŞ, Yücel ÖZMEN

Elektronik Atıkların Geri Dönüşümü İçin Ön Kırma ve Öğütme Ekipmanının Tasarımı

Design of Pre-Shredding and Grinding Equipment For The Recycling Of Electronic Waste

Furkan BULUT, Ayhan ÇELİK

A Qualitative Comparison of Dimensional Deviation of Laser Powder Bed Fusion Processed Multi Morphology Lattice Structures Based on Thermomechanical Simulations

Lazer Toz Yatağı Füzyon Yöntemi ile Üretilmiş Çoklu Morfoloji Kafes Yapılarının Boyutsal Sapmasının Termomekanik

Simülasyonlara Bağlı Niteliksel Bir Karşılaştırması

Orhan GÜLCAN, Kadir GÜNAYDIN, Ugur SIMSEK,

Cemal Efe GAYIR

Düzce İli Hava Şartlarında Bir Hanede Fotovoltaik Pil Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkisi ve Ekserji Analizi

Effect of Photovoltaic Battery Use on Energy Efficiency and Exergy Analysis In A House In Düzce Province Weather Conditions

İrem DÜZDAR, İlay Özge ERYILMAZ

Otomotiv Sektörü Aydınlatma Ürünleri Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Kullanılan DIN 1.2343 Çeliğinin Dalma Erozyon Yöntemi İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülük Değerine Etkisinin İncelenmesi

Investigation Of The Effect Of Plunge Erosion Machining Parameters On The Surface Roughness Value Of DIN 1.2343 Steel Used In Plastic Injection Molds For Automotive Industry Lighting Products

Mert ÇELİK, İbeyi KILAVUZ

Havacılık Alanında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi Ve Dijital İkiz Bağlantısının Değerlendirilmesi

Evaluation Of Product Lifecycle Management and Digital Twin Integration In Aviation Field

İsmail DEMİRCAN

CMMI Sertifikalı Bt Şirketlerinin Endüstri 4.0'a Hazırlık Durumu: Kolay Ölçüm İçin Bir Yöntem Önerisi

Readiness of CMMI Level 4-5 Certified It Companies For Industry 4.0: A Systematic Evaluation And Measurement Approach

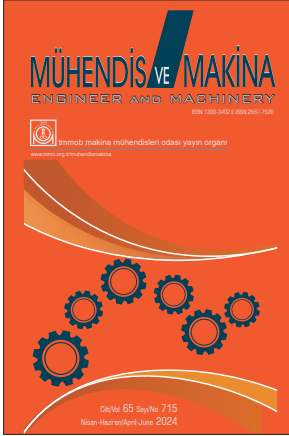
Hakan YILDIRIM, Cihan ÜNAL

Derleme Makaleleri / Review Articles

An Overview of Türkiye's Renewable Energy

Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Görünümüne Genel Bakış

Zafer ÇAKMAK



2024 YILINDA DERGİMİZ İÇİN MAKALE DEĞERLENDİREN HAKEMLER

<i>Abdullah Akpolat</i>	<i>Gaziantep Üniversitesi</i>
<i>Abdullah Demir</i>	<i>Marmara Üniversitesi</i>
<i>Abdullah Mevlüt Mutluel</i>	<i>Doğuş Üniversitesi</i>
<i>Adem Mehmet Yıldız</i>	<i>Kırklareli Üniversitesi</i>
<i>Adnan Topuz</i>	<i>Bülent Ecevit Üniversitesi</i>
<i>Ahmet Çağlar</i>	<i>Akdeniz Üniversitesi</i>
<i>Ahmet Fatih Yuran-</i>	<i>Afyon Kocatepe Üniversitesi</i>
<i>Ahmet Numan Kocacık</i>	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>
<i>Ahmet Yakın</i>	<i>Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi</i>
<i>Ahmet Yılandı</i>	<i>Ege Üniversitesi</i>
<i>Ali Murat Ateş</i>	<i>Manisa Celal Bayar Üniversitesi</i>
<i>Ali Rıza Motorcu</i>	<i>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi</i>
<i>Arslan Kaptan</i>	<i>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi</i>
<i>Atakan Tantekin</i>	<i>Adana Alparslan Türkeş Bil. ve Tek. Üniversitesi</i>
<i>Atilla Gencer Devocioğlu</i>	<i>Dicle Üniversitesi</i>
<i>Aydın Çıtlak</i>	<i>Fırat Üniversitesi</i>
<i>Aykut Fatih Güven</i>	<i>Yalova Üniversitesi</i>
<i>Ayyüce Aydemir Karadağ</i>	<i>Çankaya Üniversitesi</i>
<i>Bahadır Erman Yüce</i>	<i>Bursa Uludağ Üniversitesi</i>
<i>Bahar Uymaz</i>	<i>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi</i>
<i>Banu Güner</i>	<i>Eskişehir Teknik Üniversitesi</i>
<i>Barış Özlü</i>	<i>Aksaray Üniversitesi</i>
<i>Beytullah Başeğmez</i>	<i>Uşak Üniversitesi</i>
<i>Bilgehan Erkal</i>	<i>Karabük Üniversitesi</i>
<i>Binnur Gören Kırıl</i>	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
<i>Bülent Aktaş</i>	<i>Harran Üniversitesi</i>
<i>Cem Boğa</i>	<i>Adana Alparslan Türkeş Bil. ve Tek. Üni.</i>
<i>Cemal Meran</i>	<i>Pamukkale Üniversitesi</i>
<i>Cemalettin Aygün</i>	<i>Karadeniz Teknik Univ. Sürmene Deniz Bil. Fak.</i>
<i>Ceyhun Köse</i>	<i>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi</i>
<i>Cihad Fidan</i>	<i>Munzur Üniversitesi</i>
<i>Demet Taştemür</i>	<i>Karabük Üniversitesi</i>
<i>Dilara Albayrak Serin</i>	<i>Sabancı Üniversitesi</i>
<i>Dilşad Engin</i>	<i>Ege Üniversitesi</i>
<i>Doğan Engin Alnak</i>	<i>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi</i>
<i>Doğan Acar</i>	<i>Karadeniz Technical Üniversitesi</i>

<i>Duygu Sofuoğlu</i>	<i>Gazi Üniversitesi</i>
<i>Edip Taşkesen</i>	<i>Şırnak Üniversitesi</i>
<i>Elif Aslı Yetkin</i>	<i>İstanbul Bilgi Üniversitesi</i>
<i>Emin Açıkkalp</i>	<i>Eskişehir Teknik Üniversitesi</i>
<i>Emir Hüseyin Özder</i>	<i>Ankara Bilim Üniversitesi</i>
<i>Emrah Kantaroğlu</i>	<i>Kırıkkale Üniversitesi</i>
<i>Engin Ünal</i>	<i>Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi</i>
<i>Erdal Aydemir</i>	<i>Süleyman Demirel Üniversitesi</i>
<i>Erdoğan Güner</i>	<i>Atatürk Üniversitesi</i>
<i>Erol Solmaz</i>	<i>Bursa Uludağ Üniversitesi</i>
<i>Ersin Bahçeci</i>	<i>İskenderun Teknik Üniversitesi</i>
<i>Eylem Yılmaz Ulu</i>	<i>Pamukkale Üniversitesi</i>
<i>Fikri Erdem Şeşen</i>	<i>Kırıkkale Üniversitesi</i>
<i>Fuat Kara</i>	<i>Düzce Üniversitesi</i>
<i>Fuat Lüle</i>	<i>Adıyaman Üniversitesi</i>
<i>Hakan Çalışkan</i>	<i>Uşak Üniversitesi</i>
<i>Hakan Gürün</i>	<i>Gazi Üniversitesi</i>
<i>Hamit Adin</i>	<i>Batman Üniversitesi</i>
<i>Hüseyin Gündüz</i>	<i>Anadolu Üniversitesi</i>
<i>İbrahim Kocabaş</i>	<i>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi</i>
<i>İbrahim Yavuz</i>	<i>Afyon Kocatepe Üniversitesi</i>
<i>İlker Turgut Yılmaz</i>	<i>Marmara Üniversitesi</i>
<i>Kubilay Karacıf</i>	<i>Hitit Üniversitesi</i>
<i>Lütfü Namlı</i>	<i>Samsun Üniversitesi</i>
<i>Mehmet Akif Ezan</i>	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
<i>Mehmet Nurullah Balcı</i>	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
<i>Mehmet Okan Görtan</i>	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
<i>Mehmet Şükrü Adin</i>	<i>Batman Üniversitesi</i>
<i>Mehmet Tunç</i>	<i>Bingöl Üniversitesi</i>
<i>Melek Mengeş Turğut</i>	<i>Fen Bilimleri Enstitüsü</i>
<i>Melih Kuncan</i>	<i>Siirt Üniversitesi</i>
<i>Mithat Şimşek</i>	<i>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi</i>
<i>Muhammet Aktaş</i>	<i>Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Tek. Üniv.</i>
<i>Murat Ciniöz</i>	<i>Selçuk Üniversitesi</i>
<i>Musa Demirci</i>	<i>KTO Karatay Üniversitesi</i>
<i>Mustafa Burak Cömert</i>	<i>İzmir Demokrasi Üniversitesi</i>
<i>Nergizhan Anaç</i>	<i>Bülent Ecevit Üniversitesi</i>
<i>Netice Duman</i>	<i>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi</i>
<i>Nurdan Yıldırım</i>	<i>Yaşar Üniversitesi</i>
<i>Nurettin Furkan Doğan</i>	<i>Gaziantep Üniversitesi</i>

Oğuz Turgut
Oğuzhan Der
Oğuzhan Erbaş
Ömer Faruk Can
Özge Altun
Özge Tezel
Özgür Erol
Pınar Baykan
Seda Hezer
Sedat Dikici
Senai Yaçmkaya
Serhat Yudar
SİNEM Başkut
Taha Tuna Göksu
Tezcan Şekercioğlu
Üsâme Demir
Yusuf Özbakış

Gazi Üniversitesi
Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi
Dumlupınar Üniversitesi
Dicle Üniversitesi
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Başkent Üniversitesi
Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi
Konya Teknik Üniversitesi
Bülent Ecevit Üniversitesi
Marmara Üniversitesi
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Adıyaman Üniversitesi
Pamukkale Üniversitesi
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Amasya Üniversitesi

2024 yılında Mühendis ve Makina dergisine katkılarından dolayı uzmanlarımıza teşekkür ederiz.

ARAŞTIRMA MAKALELERİ

Research Articles

- 60° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizisinde Isı Transferi Etkilerinin İncelenmesi** 598-627
Investigation of Heat Transfer Effects in A Confined Impinging Jet Array With 60° Inclined Secondary Jets
Haluk KELEŞ, Yücel ÖZMEN
- Elektronik Atıkların Geri Dönüşümü İçin Ön Kırma ve Öğütme Ekipmanının Tasarımı** 628-642
Design of Pre-Shredding and Grinding Equipment For The Recycling Of Electronic Waste
Furkan BULUT, Ayhan ÇELİK
- A Qualitative Comparison of Dimensional Deviation of Laser Powder Bed Fusion Processed** 643-658
Multi Morphology Lattice Structures Based on Thermomechanical Simulations
Lazer Toz Yatağı Füzyon Yöntemi ile Üretilmiş Çoklu Morfoloji Kafes Yapılarının Boyutsal Sapmasının Termomekanik Simülasyonlara Bağlı Niteliksel Bir Karşılaştırması
Orhan GÜLCAN, Kadir GÜNAYDIN, Ugur SIMSEK, Cemal Efe GAYIR
- Düzce İli Hava Şartlarında Bir Hanede Fotovoltaik Pil Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkisi ve Ekserji Analizi** 659-674
Effect of Photovoltaic Battery Use on Energy Efficiency and Exergy Analysis In A House In Düzce Province Weather Conditions
İrem DÜZDAR, İlay Özge ERYILMAZ
- Otomotiv Sektörü Aydınlatma Ürünleri Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Kullanılan DIN 1.2343 Çeliğinin Dalma Erozyon Yöntemi İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülük Değerine Etkisinin İncelenmesi** 675-693
Investigation Of The Effect Of Plunge Erosion Machining Parameters On The Surface Roughness Value Of DIN 1.2343 Steel Used In Plastic Injection Molds For Automotive Industry Lighting Products
Mert ÇELİK, İbeyi KILAVUZ
- Havacılık Alanında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi ve Dijital İkiz Bağlantısının Değerlendirilmesi** 694-711
Evaluation Of Product Lifecycle Management and Digital Twin Integration In Aviation Field
İsmail DEMİRCAN
- CMMI Sertifikalı Bt Şirketlerinin Endüstri 4.0'a Hazırlık Durumu: Kolay Ölçüm İçin Bir Yöntem Önerisi** 712-740
Readiness of CMMI Level 4-5 Certified It Companies For Industry 4.0: A Systematic Evaluation And Measurement Approach
Hakan YILDIRIM, Cihan ÜNAL

DERLEME MAKALELERİ

Review Articles

- An Overview of Türkiye's Renewable Energy Outlook** 558-597
Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Görünümüne Genel Bakışı
Zafer ÇAKMAK

ISSN 1300-3402
E-ISSN 2667-7520