

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 64 Sayı/No 711

Nisan-Haziran/April-June 2023



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 : 2023

CİLT/VOLUME : 64

SAYI/ ISSUE : 711



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

30 Haziran 2023



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/Eskişehir 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
Eskişehir İlinde Karayolu Taşımacılığında Yakıt Tüketiminden Kaynaklanan CO₂ Emisyonlarının Tier 1 Yöntemine Göre Tespiti ve Değerlendirilmesi Determination and Evaluation of CO ₂ Emissions From Fuel Consumption In Road Transportation In Eskişehir According To Tier 1 Method Çisil TİMURALP	194-210
AA5754-H22 VE AA2024-T3 Levhaların Zn Ara Tabaka Kullanarak Sürtünme Karıştırma Ekstrüzyon Lehimleme Yöntemiyle Birleştirilmesi Joining AA5754-H22 and AA2024-T3 Plates By Friction Stir Extrusion Brazing Method Using Zn İnter Neslişah KURNAZ, Berna SALVAZLIOĞLU, Yahya BOZKURT	211-227
Tersanelerde İş Sağlığı Ve Güvenliğinin Göstergeler Üzerinden İrdelenmesi Examination of Occupational Health and Safety in Shipyards Based on İndicators Tuncay AYVAZ, Osman Alpaslan ERGÖR	259-296
Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri Renewable Energy Status and Installation Costs in The World and Turkey Seyda ÖZBEKTAŞ, Mahmut Can ŞENEL, Bilal SUNGUR	317-351
Makine İmalat Teknolojileri ve Eklemeli İmalat Literatürünün Görselleştirilmesine Dair Bibliyometrik Bir Analiz A Bibliometric Analysis to Visualization of Machine Manufacturing Technologies and Additive Manufacturing Literature Sabiha KILIÇ	352-385
Development and Verification of A Multiblock Structured Grid Solver For 3D Euler/Navier-Stokes Equations Üç Boyutlu Euler/Navier-Stokes Denklemleri İçin Çok Bloklu Yapısal Ağılı Çözücü Geliştirilmesi ve Doğrulanması Defne KIRAN, Ali Ruhşen ÇETE	386-395

Derleme Makaleleri / Review Articles

	Sayfalar
A Review On Laboratory Scale Machines Supporting R&D Studies Used İn Filament Yarn Technology Filament İplik Teknolojisinde Kullanılan ve Ar-Ge Çalışmalarını Destekleyen Laboratuvar Ölçekli Makinalar Üzerine Bir İnceleme Selcen ÖZKAN HACIOĞULLARI, Osman BABAARSLAN	228-258
Floropolimerlerin Geri Dönüşümü ve Sızdırmazlık Sektöründeki Uygulama Alanları Recycling of Fluoropolymers and Applications in The Sealing Industry Ezgi ÖZGÜNERGE FALAY, Burcu ÇALIŞKANELLİ, Öz Erman ARUSAN, Lütfiye ALTAY, Mehmet SARIKANAT	297-316



ESKİŞEHİR İLİNDE KARAYOLU TAŞIMACILIĞINDA YAKIT TÜKETİMİNDEN KAYNAKLANAN CO₂ EMİSYONLARININ TİER 1 YÖNTEMİNE GÖRE TESPİTİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Çisil TİMURALP¹

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği, Eskişehir, ORCID No : 0000-0002-2894-3575

Anahtar kelimeler

Öz

*İklim değişikliği,
Eşdeğer CO₂ emisyonu,
Tier 1, Karbon ayak izi,
Karayolu taşımacılık*

Ulaştırılmadan kaynaklanan emisyonların azaltılması sadece ülkemizin değil aynı zamanda AB ülkelerinin de öncelikli problemidir. Bu problemin çözümünde öncelikle verimliliğin ve sürdürülebilirliğin sağlanması gerekmektedir. Bunun için de yapılan araştırmaların somut verilerle yapılması ve sürekli güncellenmesi gereklidir. Bu çalışmada Eskişehir ilinin 2011-2021 yılları arasında karayolu taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonu IPCC'de belirtilen Tier 1 yöntemine göre hesaplanmıştır. Karayolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonun 2011 yılından 2021 yılına kadar % 46.5 arttığı görülmüştür. Ayrıca Covid-19 pandemi etkisi de incelenerek, seçilen aylarda hareketliliğin kısıtlanması nedeniyle emisyon miktarlarında düşüş olduğu fakat bunun kısa vadede etkili olduğu çalışmada görülmüştür. Ayrıca çalışmada yakıt tüketimini azaltmak için neler yapılabileceği ile ilgili önerilere de yer verilmiş olup gerekli tedbirler alınmadığı takdirde her geçen sene emisyon miktarlarındaki artışın önlenmesi daha da zorlaşacaktır.

¹ Sorumlu yazar; e-posta: cisil@ogu.edu.tr
doi : muhendismakina.1318997

DETERMINATION AND EVALUATION OF CO₂ EMISSIONS FROM FUEL CONSUMPTION IN ROAD TRANSPORTATION IN ESKİŞEHİR ACCORDİNG TO TİER 1 METHOD

Keywords

Climate change, equivalent CO₂ emission, Tier 1, carbon footprint, road transportation

Abstract

Reducing emissions from transportation is a priority problem not only for our country, but also for EU countries. In the solution of this problem, first of all, it is necessary to ensure efficiency and sustainability. It is necessary to carry out the researches made in this context with concrete data and to be constantly updated. In this study, the CO₂ emissions of Eskişehir from road transport between the years 2011-2021 were calculated according to the Tier 1 method specified in the IPCC. It has been observed that emissions from road transport increased by 46.5 % from 2011 to 2021. In addition, the effect of the Covid-19 pandemic was examined, and it was seen in the study that there was a decrease in the amount of emissions due to the restriction of mobility in the selected months, but this was effective in the short term. In addition, suggestions about what can be done to reduce fuel consumption are also included in the study, and if necessary precautions are not taken, it will be difficult to prevent the increase in the amount of emissions amounts every year.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 11.05.2022

Kabul Tarihi : 06.06.2022

Research Article

Submission Date : 11.05.2022

Accepted Date : 06.06.2022

Extended Abstract

Increasing greenhouse gas emissions as a result of human activities cause global warming and climate change. Transportation plays a crucial role in society and the economy. Our quality of life depends on an efficient and accessible transportation system. In addition, fossil fuels used in conventional transportation systems cause climate change, air pollution and noise. One third of the energy consumed in our country belongs to the transportation sector. Since global warming and climate change are a global problem, countries seek solutions by acting together. The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), which entered into force in 1994, encourages the parties to cooperate to prevent the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere and to reduce their emissions. The long-term goal of the Paris Agreement, which constitutes the climate change framework for the post 2020 years, is to keep the average temperature rise 2°C lower than in the pre-industrial period. Turkey has declared to reduce its greenhouse gas emissions by 21% in 2030, according to the reference scenario.

The primary way to reduce greenhouse gas emissions from transportation will be through accurate measurement and easy access to accurate statistical data. According to Turkish Statistical Institute (TUIK) data, the total greenhouse gas emission in Turkey in 2020 has been calculated as 523.9 Mt CO₂ equivalent. Total greenhouse gas emissions increased by 163.3% from 1990 to 2020 and reached 367.6 Mt CO₂ equivalent. The share of the transportation sector, which is below the energy-related emissions, is approximately 16.1% according to the 2017 TUIK inventory. According to this inventory, 93% of CO₂ emissions originate from road transport, while the remaining 7% originates from airway, maritime and rail transport.

In the energy sector, greenhouse gas emissions have the highest CO₂ emissions. The amount of CO₂ emissions in the transportation sector comes from road transportation at a rate of 90%. In this study, CO₂ emissions from road transportation in Eskişehir were calculated using the Tier 1 method for the years between 2011 and 2021. In addition, the effect of the pandemic was examined in the time period specified as pre-pandemic and pandemic period. In the Tier 1 method, which is one of the three methods developed by the IPCC, there is CO₂ emission that occurs with the emission factors of fuel consumption and fuel type, since combustion technology is not taken into account (TUIK 1990-2020 Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 2022). Finding emission amounts by using consumption data according to fuel types is an important step in preparing future scenarios and determining the measures to be taken. For this, it is necessary to carry out the researches with concrete data and to be constantly updated. When the sales quantities are examined according to the types of fuel, 80-82% of the fuel consumed is diesel, while 20% is LPG and gasoline in almost equal proportion.

It is seen that the highest emission was 1406.6 Gg CO₂ in 2017 and the lowest emission was 778.5 Gg CO₂ in 2012. The amount of CO₂ emissions caused by road transport in Eskişehir has increased by 45.5 % from 2011 to 2021. In 2019 and 2020, there was a decrease due to the COVID 19 pandemic. As mobility was restricted during the pandemic period,

the most affected area was the transportation sector. Emissions from Eskişehir road transport in 2020 decreased by 10.2 % compared to 2018, and decreased by 1.4 % compared to 2019. In 2021, there was an increase of 8.4 % compared to the previous year.

Within the scope of the measures taken during the pandemic process, the travel and movement restrictions, the implementation of the distance education model, the opportunity to work from home for the employees and the partial and full closures have greatly affected the transportation sector. Since the restrictions and prohibitions within the scope of pandemic measures started in mid-March 2020, the fuel consumption data of March, April and May were selected for the years 2019-2020 and 2021, and the effect of the pandemic process was examined. Equivalent CO₂ emissions from fuel consumption in road transport decreased by 1.1 % in March 2020, when the restrictions began, compared to March 2019. In 2021, when the pandemic was ongoing, it increased by 7.8 % compared to 2019. In April 2020, there was a decrease of 18.6 % compared to the pre-pandemic period, and the decrease in May was 4.5 %.

Global warming is a major threat that needs to be addressed urgently today. It is necessary to ensure energy efficiency in land vehicles. If fuel consumption is reduced, there will be a corresponding reduction in CO₂ emissions. With the widespread use of electric or hybrid cars, the widespread use of public transportation vehicles will also reduce the amount of emissions caused by fuels.

1. Giriş

Kentleşme sonucunda insanların ulaşım ihtiyacı arttığı için her geçen gün trafikteki araç sayısında artış olmaktadır. Taşıt sayısının artmasıyla yakıt tüketimi de artmakta, bunun sonucunda da emisyonlarda artış görülmektedir. İnsanların faaliyetleri sonucu artan sera gazı emisyonları küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Küresel ısınma ve iklim değişikliği küresel bir sorun olduğu için ülkeler birlikte hareket ederek çözüm yolu aramaktadırlar.

1994 yılında yürürlüğe giren Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) taraf ülkeleri atmosferdeki sera gazları birikimini önlemek, emisyonlarını azaltmak ve bunun için iş birliğine teşvik etmektedir. Sera gazları salımının artarak devam etmesi nedeniyle emisyon azaltım hedeflerinin net olarak konulduğu ve tarafları bağlayıcılığı olan Kyoto Protokolü 1997 yılında kabul edilmesine rağmen 2005 yılında yürürlüğe girmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Kyoto Protokolü,2022). 2020 sonrası iklim değişikliği çerçevesini oluşturan ve taraf olan ülkelerin katkılarına dayanan Paris Antlaşması 2016 yılında yürürlüğe girmiştir. Paris Antlaşmasının uzun dönemli hedefi ortalama sıcaklık artışının sanayileşme öncesi döneme göre 2°C daha düşük tutulmasıdır Ülkemiz, 2030 yılında, referans senaryoya göre sera gazları emisyonlarını %21 düşürmeyi beyan etmiştir (T.C. Dışişleri Bakanlığı Paris Anlaşması, 2022). Ancak 2022 yılında yayınlanan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) 6. Raporunda acil önlemler alınmazsa Paris Antlaşmasında alınan hedeflere ulaşılamayacağını ve bu yüzyılın sonuna kadar dünyanın yaklaşık 3,2°C kadar ısınacağı belirtilmiştir (IPCC Assessment Report, 2022).

Ulaştırmadan kaynaklı sera gazı emisyonlarını azaltmanın öncelikli yolu ise doğru ölçümleme ve doğru istatistikî verilere erişimin kolaylıkla sağlanması yoluyla olabilecektir. TÜİK verilerine göre 2020 yılında toplam sera gazı emisyonu 523,9 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır. Toplam sera gazı emisyonunu 1990 yılından 2020 yılına kadar %163,3 artış göstererek 367,6 Mt CO₂ eşd. ulaşmıştır (TÜİK 1990-2020 Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 2022). Enerji kaynaklı emisyonların altında yer alan taşıma sektörünün payı ise 2017 TÜİK envanterine göre yaklaşık %16,1'dir. Bu envantere göre, CO₂ emisyonunun %93'ü karayolu taşımacılığında kaynaklanırken geriye kalan %7'lik kısmı havayolu, denizyolu ve demiryolu taşımacılığında kaynaklanmaktadır (TÜİK Çevresel Göstergeler, 2022).

2. Bilimsel Yazın Taraması

Soruşbay (2007), karayolu ulaşımından kaynaklanan CO₂ emisyonları ile ilgili yaptığı çalışmada alternatif yakıt kullanılmasını, enerji tüketimini azaltmak için toplu taşımanın tercih edilmesini ve karayolu taşımacılığının yanında deniz ve havayolu taşımacılığının da kullanılmasını önermiştir. COPERT 3 programı-

nı kullanan Soylu (2007) çalışmasında, 2003 yılı verilerini kullanarak 2004 yılı için Türkiye'deki karayolu taşımacılığı emisyon miktarlarını tahmin etmiştir. Kamakate ve Schipper (2009) seçili OECD ülkelerinde kamyon taşımacılığında enerji kullanımı ve karbon emisyonlarını, McKinnon ve Piecyk (2009) ise, Birleşik Krallık'ta karayolu taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonlarını hesaplamak için kullanılan yöntemleri incelemişlerdir. Özen ve Yaman (2013), COPERT 4 programını kullanarak 2000-2019 yılları arasında Türkiye şehirlerarası devlet yollarındaki kamyonlar için CO₂ emisyonlarını önerdikleri metod ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Palander (2017) senkronize hesaplama yöntemini kullanarak büyük ve ağır araçların CO₂ emisyonlarını araştırmıştır. Güzel ve Alp (2020), 2016-2050 yılları için İstanbul'un karayolu taşımacılığında kaynaklanan sera gazı emisyon miktarını üç farklı senaryo üzerinden MARKAL EFOM-TİMES modeli ile hesaplamışlardır. Elektrikli-raylı ulaşım, elektrikli ve hibrit arabalar ile sınırlı CO₂ emisyonları olarak hazırlanan senaryolarda toplam sera gazı azaltımı en yüksek %39 olarak sınırlı CO₂ emisyonlarında çıkmıştır. Bıyık ve Civelekoğlu (2020) Isparta ilinin karayolu taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonunu 2010-2016 yılları arası için Tier 1 ve Tier 2 yöntemine göre hesaplamışlardır. Çanakkale karayolu taşımacılığında karbon ayak izini 2015-2018 yılları için Yalılı Kılıç, Dönmez ve Adalı (2021) hesaplamışlar ve üç yılda %7 artış olduğunu görmüşlerdir. Dünder ve Kolay (2021), 2010-2018 yıllarında Konya ilinde karayolu ve yük taşımacılığında kaynaklanan sera gazı emisyonunu IPCC'de yer alan Tier-1 metodunu kullanarak hesaplamışlar ve sekiz yıl sonunda toplam sera gazı emisyonununun %87, kişi başına düşen emisyonun da %70 arttığını bulmuşlardır. Nevşehir ili karayolu taşımacılığında sera gazı emisyonlarını pandemi başlangıç dönemindeki süreç için Cüce ve Uğur (2021) çalışmıştır. Mart-Ekim dönemini kapsayan sürede 2020 yılı ortalamasının geçmiş yılların aynı dönemlerinden daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Aminzadegan, Shahriari, Mehranfer ve Abramovic (2022) yaptıkları literatür çalışmasında farklı ulaşım sektörlerinde sera gazı emisyonlarının kontrolünü etkileyen faktörleri çıkararak temel analizler yaparak çözüm önerileri sunmuşlardır.

Enerji sektöründe sera gazı emisyonlarında CO₂ emisyonu en yüksek oranda bulunur. Ulaştırma sektöründeki CO₂ emisyon miktarı ise %90 oranında karayolu taşımacılığında kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada Eskişehir iline ait karayolu taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonu Tier 1 yöntemi kullanılarak 2011-2021 arasındaki yıllar için değerlendirilmiştir. Ayrıca pandeminin etkisi de pandemi öncesi ve pandemi dönemi olarak belirtilen zaman diliminde incelenmiştir. Yakıt türlerine göre tüketim verileri kullanılarak emisyon miktarlarının bulunması, gelecek senaryolarının hazırlanmasında ve alınacak tedbirlerin belirlenmesinde önemli bir adımdır.

3. Yöntem

Bu çalışmada Eskişehir ili için 2011-2021 yılları arasında karayolu taşımacılığın-
dan kaynaklanan CO₂ emisyon miktarı IPCC'nin geliştirdiği Tier 1 yöntemi kul-
lanılarak hesaplanmıştır. Sunulan üç yöntemden biri olan bu yöntemde yanma
teknolojisi dikkate alınmadığı için, yakıt tüketimi ve yakıt türüne ait emisyon fak-
törleriyle ortaya çıkan CO₂ emisyonu bulunmaktadır (IPCC guidelines for natio-
nal greenhouse gas inventories: General guidance and reporting-methodological
choice and identification of key categories, 2006). Tablo 1'de IPCC Kılavuzuna
göre yakıt türlerine göre yakıtların dönüşüm faktörleri ve karbon emisyon fak-
törleri verilmektedir (IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories:
Energy-mobile combustion, 2006)

Tablo 1. Yakıt Türlerine Göre Yakıtların Dönüşüm Faktörleri Ve Karbon Emisyon Faktörleri

Yakıt	Dönüşüm faktörü (TJ/Gg)	Emisyon faktörü (kg/TJ)
Benzin	44,3	69300
Motorin	43	74100
LPG	47,3	63100

Farklı yakıt türlerinden kaynaklanan enerji tüketimini bulmak için kullanılan ya-
kıt miktarı ile dönüşüm faktörü çarpılır.

$$\text{Enerji Tüketimi} = \text{Yakıt Tüketimi} \times \text{Dönüşüm Faktörü} \quad (1)$$

Hesaplanan bu enerji tüketimi ve emisyon faktörü ile kullanılan yakıtın karbon
içeriği bulunur.

$$\text{Karbon İçeriği} = \left(\frac{\text{Enerji}}{\text{Tüketimi}} \right) \times \left(\frac{\text{Karbon Emisyon}}{\text{Faktörü}} \right) \quad (2)$$

Karbon emisyonunun hesaplanmasında Eşitlik 3 kullanılır. Eşitlikte yer alan kar-
bon oksitlenme oranı değeri sıvı yakıt olan benzin ve motorin için 0,99; LPG için
ise 0,995 alınır

$$\text{Karbon Emisyonu} = \left(\frac{\text{Karbon}}{\text{İçeriği}} \right) \times \left(\frac{\text{Karbon}}{\text{Oksitlenme Oranı}} \right) \quad (3)$$

Son olarak Denklem 4 ile CO₂ emisyonu hesaplanır. Denklemde yer alan 44/12,
CO₂'in molekül ağırlığının karbonun mol ağırlığına oranını ifade etmektedir.

$$\text{CO}_2 \text{ Emisyonu} = \text{Karbon Emisyonu} \times \left(\frac{44}{12} \right) \quad (4)$$

4. Tartışmalar ve Bulgular

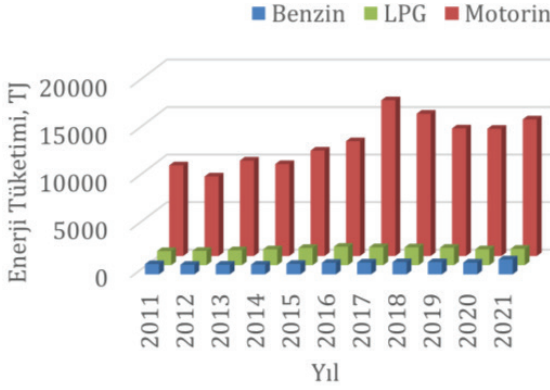
Eskişehir karayolu taşımacılığında 2011-2021 yılları arasındaki yakıt türlerine göre satış verileri T.C Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Petrol ve LPG Piyasası Sektör Raporlarından düzenlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir (EPDK Petrol ve Sıvılaştırılmış Petrol Gazları (LPG) piyasaları için 2011-2021 yılları yıllık sektör raporları, 2022).

Tablo 2’ye bakıldığında 2011 yılında tüketilen yakıtın % 8,8’ini benzin, % 11,4’ü LPG ve % 79,8’i motorin iken 2021 yılına kadar bu sıralama neredeyse değişmemiş, 2021 yılında % 8,7’sinin benzin, % 9,1’inin LPG ve %82,2’sinin de motorin olduğu görülmektedir.

Tablo 2. 2011-2021 yılları için Eskişehir karayolu taşımacılığına ait yakıt satış verileri

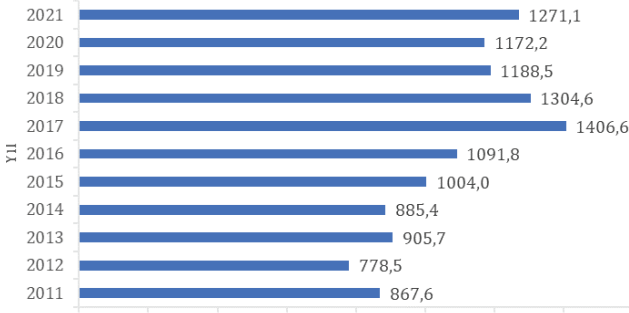
Yıl	Yakıt Türü		
	Benzin (ton)	Motorin (ton)	LPG (ton)
2011	24151	220224	31544
2012	22668	193289	31906
2013	22849	231831	33312,8
2014	22975	223397	35376,2
2015	24791	256081	38465
2016	27273,5	278815,1	41140
2017	27964,6	378275,8	39998
2018	28760,8	345633	39760
2019	28803,7	309893,3	38868
2020	27708,9	309023,7	35426
2021	35197	331799,7	36636,4

Tablo 2’deki verilerle hesaplanan Eskişehir ilinde karayolu taşımacılığında kullanılan yakıt türlerine göre enerji tüketim miktarları Şekil 1’de verilmiştir. Tüm yıllarda motorinin satış miktarı, dizel ve LPG ile karşılaştırıldığında çok yüksek olduğu için motorinin kullanılmasıyla oluşan enerji tüketimi de yüksek çıkmıştır.



Şekil 1. Eskişehir için 2011-2021 yılları arasında yakıt türlerine göre enerji tüketim miktarları [TJ]

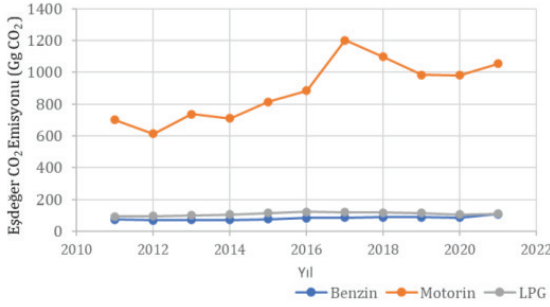
Şekil 2 Tier I yöntemine göre hesaplanan CO₂ emisyonlarını göstermektedir.



Şekil 2. Eskişehir'de karayolu taşımacılığında kaynaklanan eşdeğer CO₂ emisyonları [Gg CO₂]

Şekil 2'ye göre, en yüksek emisyonun 1406,6 Gg CO₂ olarak 2017 yılında, en düşük emisyonun da 778,5 Gg CO₂ olarak 2012 yılında gerçekleştiği görülmektedir. Eskişehir ilinde karayolu taşımacılığının neden olduğu CO₂ emisyon miktarı 2011 yılından 2021 yılına kadar % 45,5 artış göstermiştir. 2012 yılındaki düşüşün nedeni ise yaşanan küresel ekonomik kriz, 2019 ve 2020 yıllarındaki düşüşün nedeni ise COVID19 pandemisidir.

Oluşan CO₂ emisyonunun yakıt türlerine göre dağılımı ise Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Eşdeğer CO₂ emisyonunun yakıt türlerine göre değişimi

Şekil 3'e göre, motorinden kaynaklanan emisyonun benzin ve LPG'den kaynaklanan emisyonlara kıyasla çok daha fazla olduğu görülmektedir. En az emisyon, yıllık satış miktarı diğerlerine göre daha az olan benzinden kaynaklanmaktadır. LPG'den kaynaklanan emisyon ise çok az bir farkla benzinin üstünde yer almaktadır. Bunun nedeni 2011-2020 yılları arasında tüketilen LPG miktarı benzinden % 2-% 4,5 daha fazla iken 2021 yılında bu fark neredeyse kaybolmuş % 0,4'e düşmüştür. İncelenen tüm yıllar göz önüne alındığında, benzin ve LPG'den kaynaklanan eşdeğer CO₂ emisyonu neredeyse yatay bir yol izlemiştir. 2011 yılında bu iki yakıt türünden oluşan emisyon oranı % 19,4 iken 2021 yılında % 17,1 olmuştur. Motorinden kaynaklanan emisyon miktarı ise zigzaglı bir yol izlese de yıllar içinde artış olmuştur. 2011 yılında motorinden kaynaklanan eşdeğer CO₂ emisyon miktarı 699,7 Gg CO₂ iken, 2012 yılında 614,1 Gg CO₂'e düşmüş, 2013 yılında ise 2011 yılındaki değerinde üstüne çıkarak 736,6 Gg CO₂ olmuştur. 2021 yılında da 1054,2 Gg CO₂ olarak hesaplanmıştır.

Pandemi sürecinde alınan tedbirler kapsamında başta seyahat ve hareket kısıtlamalarının olması, uzaktan eğitim modelinin uygulanması, çalışanlar için evden çalışma imkanlarının sunulması ve yapılan kısmi ve tam kapanmalar ulaşım sektörünü fazlasıyla etkilemiştir. Tablo 3'de 2019, 2020 ve 2021 yıllarında Mart, Nisan ve Mayıs aylarına ait Eskişehir'de karayolu taşımacılığında kullanılan yakıt türlerinin satış miktarları verilmiştir (EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Petrol piyasası ve Sıvılaştırılmış Petrol Gazları (LPG) piyasası 2019-2020-2021 yılları için Mart-Nisan-Mayıs aylık sektör raporları, 2022). 2020 yılı Mart ayının ortalarında Covid-19 tedbirleri kapsamında kısıtlamalar ve yasaklar başladığı için mart, nisan ve mayıs ayı verileri ele alınarak pandemi sürecinin etkisi incelenmiştir.

Tablo 3. Pandemi öncesi ve pandemi sürecinde Eskişehir ili karayolu taşımacılığında kullanılan yakıtların satış verileri

Yıl	Ay	Yakıt Türü		
		Benzin (ton)	Motorin (ton)	LPG (ton)
2019	Mart	2258,1	26493,2	2884,8
	Nisan	2346,6	27505,8	3046,4
	Mayıs	2424	27812,7	2996,3
2020	Mart	2250	26446,6	2582,1
	Nisan	1343,9	23528,9	1847,3
	Mayıs	1348,8	28403,2	1878,1
2021	Mart	2343,7	28812,8	2925,6
	Nisan	2094,4	28171,4	2462,5
	Mayıs	2035,9	23764,4	2354,9

2019 ve 2020 yıllarına ait satış verilerine bakıldığında önlemlerin alınmaya başladığı 2020 Mart ayında yakıt tüketim miktarlarının düşmeye başladığı sonraki aylarda da bu düşüşün çok daha fazla olduğu görülmektedir. Pandeminin devam ettiği 2021 yılında ise satış miktarlarının bir önceki seneye göre arttığı fakat Nisan ve Mayıs aylarında pandemi öncesi sayılan 2019 yılı tüketimlerinin altında olduğu görülmektedir. Bunun nedeni de pandemi nedeniyle insanların toplu taşıma araçlarını tercih etmeyip kendi araçlarını kullanmalarıdır.

Tablo 4’de seçilen aylarda pandeminin Eskişehir karayolu taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonuna etkisi incelenmiştir. Covid-19 salgınının başlamasıyla ülkemizde 2020 yılının Mart ayı ortalarında tedbirler alınmaya başlanmıştır. İl genelinde karayolu taşımacılığını etkileyen ilk tedbir 16 Mart 2020 tarihinde okulların 2 hafta eğitime ara vermesi ve daha sonra uzaktan eğitim modeline geçilmesidir. 2019 Mart ayında tüm yakıt türleri için toplam 99,7 Gg CO₂ olarak hesaplanan eşdeğer CO₂ emisyonu kısıtlamaların başladığı 2020 Mart ayında % 1,1 azalarak 98,6 Gg CO₂ olmuştur. Pandeminin devam ettiği 2021 yılında ise 2019 yılına göre % 7,8 artarak 107,4 Gg CO₂ olmuştur. Nisan 2020’de hafta sonları tam kapanma ve 2 haftalık kısmi kapanma tedbiri uygulanan bu ayda ise CO₂ emisyonu 84,4 Gg CO₂ olarak hesaplanmış ve pandemi öncesine göre % 18.6 düşüş yaşanmıştır. 20 günlük tam kapanmanın olduğu Mayıs 2020’de ise pandemi öncesine göre düşme % 4.5’dir. Pandemi öncesinde mart ayından mayısa doğru gidildiğinde hesaplanan toplam eşdeğer CO₂ emisyonlarında artış görülürken pandemi döneminde, ülke genelinde en sıkı tedbirlerin alındığı Nisan 2020 hariç, bir önceki aya göre düşüş görülmektedir.

Tablo 4. Eskişehir ili karayolu taşımacılığında kaynaklanan eşdeğer CO₂ emisyonuna pandeminin etkisi

Dönem	Yıl	Ay	Yakıt Türü	Eşdeğer CO ₂ Emisyonu [Gg CO ₂]	Toplam Eşdeğer CO ₂ Emisyonu [Gg CO ₂]
Pandemi Öncesi	2019	Mart	Benzin	6,9	99,7
			Motorin	84,2	
			LPG	8,6	
	2019	Nisan	Benzin	7,2	103,6
			Motorin	87,4	
			LPG	9,0	
	2019	Mayıs	Benzin	7,5	104,7
			Motorin	88,4	
			LPG	8,9	
	Pandemi Dönemi	2020	Mart	Benzin	6,9
Motorin				84,0	
LPG				7,7	
2020		Nisan	Benzin	4,1	84,4
			Motorin	74,8	
			LPG	5,5	
2020	Mayıs	Benzin	4,1	100	
		Motorin	90,2		
		LPG	5,6		
Pandemi Dönemi	2021	Mart	Benzin	7,2	107,4
			Motorin	91,5	
			LPG	8,7	
	2021	Nisan	Benzin	6,4	103,3
			Motorin	89,5	
			LPG	7,3	
2021	Mayıs	Benzin	6,3	88,8	
		Motorin	75,5		
			LPG	7,0	

5. Sonuçlar

Kirlenen denizlerimiz, kuruyan su kaynaklarımız, azalan orman varlığımız, verimsizleşen topraklarımız hepimiz için bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle yaşanabilir bir dünya için doğamıza, çevreye ve hayata bakış açımızın düzeltilmesi gerekmektedir. Çevrenin korunmasının bütün bireylerin ve tüm insanlığın ortak meselesidir. Bununla birlikte yeni nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakılması için ilgili tüm kurum ve kuruluşların çevreye duyarlı bir anlayışla işbirliği içerisinde hareket etmeleri gerekmektedir.

Günümüzde acil önlemlerin alınması gerekli olan küresel ısınma sorununa çözüm yolu bulunabilmesi için ülkelerin emisyonları azaltmak için uygulanacak politika ve stratejilerini net bir şekilde belirlemeleri gerekmektedir. Türkiye'nin hedefi 2053 yılına kadar net sıfır emisyonudur. Enerjiden kaynaklı emisyonlar içerisinde yer alan karayolu taşımacılığı, ulaştırma sektöründeki emisyonların %90'ını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada Eskişehir ili için 2011-2021 yıllarını kapsayan karayolu ulaşımından kaynaklanan farklı yakıt türlerine ait CO₂ emisyonu incelenmiştir. Tüm yıllarda motorin yakıt türü satış verilerine bakıldığında ilk sırada yer alırken en fazla CO₂ emisyon oranı da yine motorine aittir. 2011 yılında motorinden kaynaklı CO₂ emisyonu %80 iken 2021 yılında % 82 olarak hesaplanmıştır. Tüm yakıt türleri göz önüne alındığında ise karayolu taşımacılığına ait toplam emisyon miktarında 2021 yılında 2011 yılına göre % 46,5 artmıştır. Pandemi döneminde hareketlilik kısıtlandığı için en çok etkilenen alan ulaşım sektörü olmuştur. 2020 yılına ait Eskişehir karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyon 2018 yılına göre % 10,2 azalma gösterirken, 2019 yılına göre % 1,4 azalmıştır. 2021 yılında ise bir önceki seneye göre % 8,4 artış olmuştur. Acil ve kesin önlemler alınmadığı takdirde, fosil yakıtların yerine alternatiflerini kullanarak fosil yakıt tüketim miktarlarındaki azalmayı sağlamazsak karbon emisyonu insanlığın en büyük problemi olmaya devam edecektir.

Kontrolsüz nüfus artışı ve sanayileşme ile birlikte enerji talebinde ve şehirleşme ihtiyacında artış olmaktadır. Bunların sonucu olarak da sera gazlarında artış görülmektedir. Küresel ısınma günümüzde acilen ele alınması gereken büyük bir tehdit olarak karşımıza çıkmaktadır. Kara taşıtlarında enerji verimliliğinin sağlanması gereklidir. Yakıt tüketimi azaltıldığı takdirde buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarında da azalma olacaktır.

Gelişen teknoloji ile araçlarda alternatif yakıt kullanılmasına rağmen ulaştırma sektöründe yine de yeterli azaltım sağlanamamakta, sürekli artış olmaktadır. Elektrikli veya hibrit arabaların kullanılmasının yaygınlaşmasıyla aynı zamanda toplu taşıma araçlarının geniş kitlelerce kullanılması da yakıtlardan kaynaklanan emisyon miktarını azaltacaktır.

Sürücü davranışı ve sürüş tekniği yakıt tüketimini doğrudan etkilediği için sürücüler bu konuda bilgilendirilmelidir. Kullanılan kara taşıtların bakımı da zamanında yapılmalı, özellikle yakıt tüketiminin artmasına neden olacak tıkanmış filtreler hemen değiştirilmeli ve lastik basıncına dikkat edilmelidir. Kullanıcıların yakıt tüketimi az araçları satın almaları için teşvikler sunulmalıdır.

Kaynakça

- Aminzadegan, S., Shahriari, M., Mehranfar, F. ve Abramovic B. (2022). Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: A literature review, *Energy Reports*, 8, 2508-2539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.161>
- Bıyık, Y. ve Civelekoğlu, G. (2020). Isparta ilinde karayolu kaynaklı karbon ayak izinin hesaplanması, *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4(2), 78-87. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bilgesci/issue/56891/608623>
- Cüce, H. ve Uğur, O. (2021). Nevşehir İlinde Karayolu Ulaşımından Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Covid-19 Salgını Başlangıç Döneminde Değerlendirilmesi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 118-134. doi: <https://doi.org/10.31466/kfbd.885206>
- Dündar, A. O. ve Kolay, A. (2021). Karayolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun hesaplanması, *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14(1), 317-334. doi: <https://doi.org/10.25287/ohuiibf.786463>
- EPDK (2022), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Petrol ve Sıvılaştırılmış Petrol Gazları (LPG) piyasaları için 2011-2021 yılları yıllık sektör raporları. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu> Son erişim tarihi: 28.02.2022
- EPDK (2022), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Petrol piyasası ve Sıvılaştırılmış Petrol Gazları (LPG) piyasası 2019-2020-2021 yılları için Mart-Nisan-Mayıs aylık sektör raporları. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-104-1008/petrolaylik-sektor-raporu> Son erişim tarihi: 15.04.2022
- Güzel, T. D. ve Alp K. (2020). Modeling of greenhouse gas emissions from the transportation sector in Istanbul by 2050, *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2190-2201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.034>
- IPCC Assessment Report 6, (2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate

- te Change- Summary For Policymakers. https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf Son erişim tarihi: 15.04.2022
- IPCC, (2006) 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories: General guidance and reporting-methodological choice and identification of key categories, Volume 1, Chapter 4, Erişim adresi: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_4_Ch4_MethodChoice.pdf Son erişim tarihi: 15.04.2022
- IPCC, (2006), 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories: Energy-mobile combustion, Vol. 2, Chapter 3. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf Son erişim tarihi: 15.04.2022
- Kamakate, F. ve Schipper L. (2009). Trends in truck freight energy use and carbon emissions in selected OECD countries from 1973 to 2005, *Energy Policy*, 37(10), 3743-3751. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.029>
- McKinnon, A.C. ve Piecyk, M.I. (2009). Measurement of CO2 emissions from road freight transport: A review of UK experience, *Energy Policy*, 37(10), 3733-3742. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.007>
- Özen, M. ve Tüydeş Yaman, H. (2013). Türkiye'de Şehirlerarası Yük Trafiği CO₂ Emisyonlarının Tahmini, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(3), 56-64. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sdufenbed/issue/20802/221984>
- Palander, T. (2017). The environmental emission efficiency of larger and heavier vehicles – A case study of road transportation in Finnish forest industry, *Journal of Cleaner Production*, 155(1), 57-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.095>
- Soruşbay, C. (2007). Karayolu ulaşımından kaynaklanan CO2 emisyonlarının çevreye etkisi ve kontrolü, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 48(564), 22-27.
- Soylu, S. (2007). Estimation of Turkish road transport emissions, *Energy Policy*, 35(8), 4088-4094. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.015>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Kyoto Protokolü. (2022). Erişim adresi: <https://iklim.csb.gov.tr/kyoto-protokolu-i-4363> , Son erişim tarihi: 15.04.2022
- T.C. Dışişleri Bakanlığı, Paris Anlaşması. (2022). Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa> , Son erişim tarihi: 15.04.2022

TÜİK, (2022), Türkiye İstatistik Kurumu, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri 1990-2020. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Greenhouse-Gas-Emissions-Statistics-1990-2020-45862>, Son erişim tarihi: 15.04.2022

TÜİK, (2022), Türkiye İstatistik Kurumu, Çevresel Göstergeler, Erişim adresi: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turune-gore-seragazi-emisyonu-i-85790>, Son erişim tarihi: 15.04.2022

Yalılı Kılıç, M., Dönmez, T. ve Adalı, S. (2021). Karayolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakkale örneği, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 943-955. doi: <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.848016>



AA5754-H22 VE AA2024-T3 LEVHALARIN ZN ARA TABAKA KULLANARAK SÜRTÜNME KARIŞTIRMA EKSTRÜZYON LEHİMLEME YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ

Neslişah KURNAZ^{1*}, Berna SALVAZLIOĞLU², Yahya BOZKURT³

¹ Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul,
ORCID No : 0000-0001-8459-5117

² Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul,
ORCID No : 0000-0003-2767-9378

³ Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul
ORCID No : 0000-0003-1816-5922

Anahtar kelimeler

Öz

Alüminyum, çinko, ekstrüzyon, lehimleme, sürtünme karıştırma ekstrüzyon

Günümüzde savunma, havacılık ve uzay sanayinde, otomobil sanayiinde ve çeşitli endüstriyel alanlarda alüminyum alaşımları imalatı büyük önem kazanmıştır. Üretim aşamasında alüminyum malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan ergitmeli kaynak yöntemleri problemlidir ve zordur. Ayrıca, bu alaşımların birbirine benzemeyen metaller ile birleştirilmesinde geleneksel birleştirme yöntemleri katı hal kaynak yöntemleri kadar cevap verememektedir. Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluk, iyi tokluk, kolay şekillendirilebilme, yüksek mekanik özelliklere sahip olması ve hafifliği, işlenebilirliği, yüksek korozyon direnci, yüksek dayanıma sahip olması gibi özelliklerinden dolayı alüminyum alaşımlarının birleştirme tekniklerinde katı hal kaynak yöntemleri önemli bir husustur. Son yıllarda ön planda olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının yanı sıra Sürtünme karıştırma ekstrüzyon lehimleme yöntemi güncel kaynak yöntemleri arasına girmiştir.

¹ Sorumlu yazar; e-posta: neslisahkurnazz@hotmail.com
doi : muhendismakina.1319106

Bu çalışmada, takım ilerleme hızı sabit tutulup bekleme süresi değiştirilerek AA2024-T3/Zn/AA5754-H22 alüminyum alaşımlı levhalar ve ara katman olarak çinko metalleri kullanılarak SKEL yöntemiyle birleştirme yapılmıştır. SKEL yöntemi ile yapılan birleştirmelerde takım ilerleme hızının, karıştırıcı ucun dönme hızının ve takım bekleme süresinin mekanik davranışlar üzerine olan etkisini tespit etmek amacıyla; çekme testi, mikrosertlik testi ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda takım bekleme süresinin artmasıyla mekanik özelliklerde artış elde edilmiştir.

JOINING OF AA5754-H22 AND AA2024-T3 PLATES BY FRICTION STIR EXTRUSION BRAZING METHOD USING ZN INTERLAYER

Keywords

Aluminum, zinc, extrusion, brazing, friction stir extrusion

Abstract

Today, the production of aluminum alloys has gained great importance in the defense, aviation and space industry, automobile industry and various industrial areas. Fusion welding methods used in joining aluminum materials during production are problematic and difficult. In addition, conventional joining methods are not as successful as solid state welding methods in dissimilar joining these alloys with other metals. Solid state welding methods are an important issue in the joining techniques of aluminum alloys due to their low density, good toughness, easy formability, high mechanical properties and light weight, machinability, high corrosion resistance and high strength. In addition to Friction Stir Welding and Friction Stir Spot Welding, which have been at the forefront in recent years, Friction Stir Extrusion Brazing (FSEB) has become one of the current welding methods. In this study, FSEB method was performed using AA2024-T3/Zn/AA5754-H22 aluminum alloy sheets and zinc metals as interlayer by keeping the tool feed rate constant and changing the waiting time. In order to determine the effect of tool feed speed, rotating speed of the mixer tip and tool waiting time on mechanical behavior in the joints made with the FSEB method; tensile test, microhardness test and microstructure analyzes were performed. As a result of the experimental studies, an increase in the mechanical properties was obtained with the increase of the tool waiting time.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 05.08.2022

Submission Date : 05.08.2022

Kabul Tarihi : 09.11.2022

Accepted Date : 09.11.2022

Extended Abstract

Introduction

Aluminum and aluminum alloys are used in the aviation and automotive industries due to their lightness. In today's automotive industry, the use of aluminum alloy sheets as a light metal is increasing to increase fuel efficiency and reduce automobile structure weight. TIG and MIG welding methods are the most preferred for joining aluminum and aluminum alloys. However, metallurgical transformations that occur in the heat affected region depending on the internal structure of the material in welded joining of aluminum and its alloys with these welding methods, which are based on melting, cause problems such as porosity, oxide film, hot cracking during the use of welded joints. Due to such problems, friction stir welding (FSW), which is a solid phase welding method, has started to be used, apart from melting-based joining methods. Then, Friction Stir Extrusion Brazing (FSEB) was used to join aluminum alloys. The Friction Stir Extrusion Brazing (FSEB) process is the most interesting solid state welding method. It is a method obtained with the development of friction stir welding. The FSEB process is a process of forming an interlayer between overlapping sheets using the downward dipping motion of a rotating pinless tool (without agitator tip) to form the extrusion of the top plate. The interlayer reduces the reaction between the reactive base metals, prevents the formation of inter-metallic phases, improves the performance of the joined zone, and also during the friction mixing process the relative width of the joint creates a brazed zone by diffusion. Joining using extrusion aids mechanical joining and good combination for durable strength of the joined regions. Friction stir welded joints have several advantages over joints produced by conventional melt welding processes, such as low residual stress, minimal distortion, and high joint strength. In this study, AA2024-T3/Zn/AA5754-H22 was joined with FSEB method using aluminum alloy and interlayer zinc metals. The mechanical and microstructural properties were evaluated by changing the tool waiting time in the joints.

Material and Methods

In experimental studies, AA5754-H22 aluminum alloy sheet 50x150x1.5 mm pure zinc (Zn) sheet 54x100x0.5 mm and AA2024-T3 aluminum alloy sheet 100x120x1.6 mm used as an intermediate layer were cut with guillotine shears and made ready for joining. The pinless tool (without mixing tip) used in the FSEB process was manufactured from 1.2343 hot work steel and reached a hardness value of 54-56 HRC by quenching. The shoulder diameter of the tool used is 14 mm. The FSEB process was carried out on a numerically controlled milling machine with the AA2024-T3 aluminum alloy plate on top. After placing the Zn plate on the AA5754-H22 aluminum alloy plate in the FSEB mold, the AA2024-T3 aluminum alloy plate was placed on the top and compressed with the pressure shoes. The end position of the part is determined by adjusting the tool axis to the exact center of the joint. The samples that were ready for the FSEB process were manually combined depending on the joining parameters. 2080 rpm tool rotation speed, 45 mm/min tool feed rate and tool waiting times are determined as 10 and 50 s. The joined materials were grinded and etched with Keller's reagent for metallographic examination. Samples prepared for metallographic examination were examined under an optical microscope for microstructure evaluation. In addition, HV microhardness measurements were taken from the joint areas. The HV test was carried out with a load of 200 g and a time of 10 s.

Findings and Discussion

FSEB made samples was applied to tensile test. As a result of the tensile test, the highest tensile strength value was observed in the sample with a waiting time of 50 seconds. In the literature, it has been observed that increasing the waiting time increases the tensile strength. Another test applied to the samples is the microhardness test. HV microhardness measurements were taken from the joint areas. For the microhardness test, the hardness value was taken from the AA2024-T3, Zn and AA5754-H22 regions of the sample. The highest hardness value was reached in the AA2024-T3 region. This region is the heat affected zone (HAZ). The reason why this region is high is the high mechanical properties of AA2024-T3. The lowest hardness value was observed in the region of the Zn interlayer. Since the heating and cooling times are long, this region is deformed and recrystallization or excessive aging has occurred. AA5754-H22 shows a thermo-mechanically affected (TMAZ) transition zone where the hardness of the aluminum alloy is measured. It has been determined that this region is a value between pure zinc and AA2024-T3 aluminum alloy. As a result of the microstructure test, when the waiting time was taken for 10 s, no coalescence was observed in the region between AA5754-H22/Zn and cracks occurred due to heat input. When the waiting time is increased to 50 s, it has been observed that a well-joined region is formed. It has been observed that the Zn layer used as the intermediate layer acts as a barrier, inhibiting the intermetallic phases, and mechanically durable interlocking has been obtained.

Conclusions

It has been observed that the waiting time affects the mechanical properties when joining AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloy sheets with FSEB using Zn interlayer. AA2024-T3 aluminum alloy sheet was successfully bonded with AA5754-H22 aluminum alloy sheet using Zn interlayer by FSEB method using 2080 rpm tool rotation speed, 45 mm/min tool feed speed and tool waiting time of 10 s to 50 s.

1. Giriş

Otomotiv üreticilerinin önemli hedefleri arasında hafif ancak mukavemeti yüksek alaşımların geliştirilmesi oldukça önemlidir. Alüminyum, otomotiv endüstrisinde yakıttan tasarruf etmek için hafif malzeme seçiminde önemli derecede kullanıma sahiptir (Başer, 2012).

AA5754-H22 alaşımlı alüminyum levhalar; düşük yoğunlukları, geri dönüşüm kolaylığı ve korozyon direncinin yüksek olmasının sağladığı avantaj ile otomotiv sektöründe araçlarda çeliğin yerine kullanılan cazip bir malzeme haline gelmiştir. Ayrıca AA5754-H22 alüminyum alaşımı makine imalat sektörü, inşaat sektörü ve gemi inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Turbaloğlu). Havacılık ve uzay uygulamalarında düşük özgül ağırlık, yüksek yorulma dayanımı, korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı AA2024-T3 alüminyum alaşımı yoğun olarak kullanılmaktadır. AA2024-T3 alaşımı uçak gibi hava araçlarında kanat ve gövde yüzeylerinde kullanılmaktadır (Günerhan, 2021).

Kaynak kabiliyeti zor olan Al-alaşımı ve Cu-alaşımı gibi malzemelerin birleştirme işleminde 1991 yılında geliştirilen bir katı hal birleştirme işlemi olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) kullanılmaktadır (Şık, A., Ertürk, İ. ve Önder, M., 2010; American National Standards Institute, 2019). G.İpekoğlu ve arkadaşları, dört farklı kalınlıktaki AA6061-T6 levhalarını uygun karıştırıcı takımlar kullanıp SKK yöntemiyle birleştirmişlerdir ve elde edilen kaynaklı bağlantıların hiçbirinde kaynak hatasına rastlamamaları başarılı bir birleştirme yaptıklarını doğrulamıştır (İpekoğlu, Akçam ve Çam, 2018). Sürtünme karıştırma kaynağı kaynak süresinin kısa olması, minimum yüzey hazırlığı ve otomasyon kolaylığı avantajlarından dolayı son yıllarda kullanımı artmış bir kaynak yöntemidir (Şık ve diğerleri, 2010). Çevik, Özçatalbaş ve Uygur (2012) yapmış oldukları çalışmada 7075-T651 Al alaşımı levhalar sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile sabit devirde ve farklı ilerleme hızları kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirme bölgesinin sertlik ve mikro yapısını incelemişlerdir.

Sarsılmaz ve Özdemir (2008), AA 1050 ve AA6061 alüminyum alaşımları, alın pozisyonunda sabit devir (1120 dev/dk) ve sabit ilerleme hızında (250 mm/dk) üç farklı uç profili kullanılarak başarılı bir şekilde birleştirilmişlerdir. Vidalı karıştırıcı uç geometrisinin, kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Boz ve Kurt (2004), Al 1080 alaşımlı levhaları 5 farklı karıştırıcı uç geometrisi kullanarak SKK ile birleştirmişlerdir. Karıştırıcı uç geometrileri 0.85, 1.10, 1.40 ve 2.00 mm diş açıklıklı vida şeklinde ve 5x5 mm kare kesitli şekilde imal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, 1.40 ve 2.00 mm diş açıklıklı vida şekilli karıştırıcı uçların kaynak için uygun olmadığı gözlemlenmiştir. 5x5 mm kare kesitli karıştırıcı ucun ise mekanik özelliklerinin düşük çıktığı belirlenirken,

0.85 ve 1.10 mm dış açıklığına sahip karıştırıcı uçların 110 N/mm² çekme mukavemeti elde edildiği belirtilmiştir (Boz ve Kurt, 2004).

Bozkurt, Salman ve Çam (2013), 1.6 mm kalınlığında AA2024-T3 ve 1.5 mm kalınlığında AA5754-H22 alüminyum levhalarını SKNK yöntemi ile birleştirmişlerdir. SKNK yönteminde kullanmış oldukları takımın malzemesi sıcak iş takım çeliği olup alüminyum titanyum nitrür (AlTiNi) ile kaplanmış ve 58 HRC sertliğe ulaştırılmıştır. Takımının omuz çapı 14 mm, pim çapı 4 mm ve pim uzunluğu 2.35 mm olarak ayarlanmıştır.

Sürtünme karıştırma ekstrüzyon lehimlemesi (SKEL) yöntemi, üst tabakanın alt tabakadaki öncü deliğe ekstrüzyon yoluyla mekanik olarak kilitlemesini sağlayacak şekilde üst üste binen metal levhalar arasında bir ara tabaka kullanarak yapılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmeler, geleneksel ergitme kaynağı işlemleriyle üretilen bağlantılara göre düşük kalıntı gerilme, minimum distorsiyon ve yüksek bağlantı mukavemeti gibi çeşitli avantajlara sahiptir (Doğan, 2006). Birleştirme işleminin ekstrüzyon kullanılarak yapılması, birleştirilen bölgelerin dayanıklı mukavemeti için mekanik birleştirme ve iyi derecede bağlanmayı sağlamaktadır (Paidar, Ashraff Ali, Mohanavel, Mehrez, Ravichandran ve Ojo, 2021). Lehimleme de ise, iki veya daha fazla metalin bir dolgu metalinin bağlantı aralığına akıtılması ile bir araya getirildiği ve iş parçalarının eritilmediği bir birleştirme işlemidir. Lehimleme yöntemini kullanmanın başlıca avantajları katmanlar arası kontrollü atomik difüzyon ve malzemelerin kendiliğinden reaksiyona girmesi olarak sayılabilir (Sınmazışık, 1998).

Ara katman, reaktif olan ana metaller arasındaki reaksiyonu azaltmakta ve intermetalik fazların oluşumunu engellemektedir. Paidar ve diğerleri (2021), SKEL yöntemini kullanarak farklı AA2024-T3 ve bakır (Cu) alaşımlarının, çinko (Zn) ara katman kullanılarak birleştirilmesini incelemişlerdir. SKEL işleminde malzeme akışlı kaynak kusuru gözlenmez iken bu işlem Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında (SKNK) yapıldığında akış gerilmelerinde eşitsizlik meydana geldiği sonucuna varmışlardır. Haiyan ve Mehta (2020), AA5083 Al alaşımı ve 16 Mn çeliği ince bir Zn sert lehim (ara tabaka) ile birleştirmede çok katmanlı bir sürtünme karıştırmalı lehim tekniğini başarıyla kullanmışlardır. Bu yaklaşımın, güçlü metaller için mekanik bir kaynak yolu ve alüminyum alaşımları için metalurjik bir bağlama yolu oluşturduğunu bildirmişlerdir.

Paidar, Bokov, D., Mehrez, Nasution, Ojo ve Zain (2022), AA2024-T3 ve pirinç alaşımlarını çinko ara katman kullanarak Sürtünme Karıştırma Ekstrüzyon Nokta Birleştirmesi yöntemi ile birleştirmişlerdir. Destek plakası olarak bakır ve çelik kullanılmıştır. Destek plakalarının etkisi ile AA2024/Zn/Pirinç bağlantısının mikroyapı, mekanik ve kırılma davranışları incelenmiştir.

Bu çalışmada, AA2024-T3 ve AA5754-H22 alüminyum alaşımları SKEL yöntemi

miyle Zn ara katman kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirmelerde takım bekleme süresi değiştirilerek mekanik ve mikroyapı özellikleri değerlendirilmiştir.

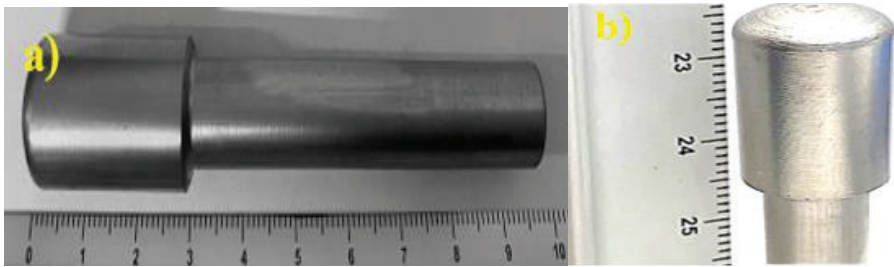
2. Materyal ve Yöntem

Deneysel çalışmalarda, AA5754-H22 alüminyum alaşımı levha 50x150x1.5 mm ara katman olarak kullanılan saf çinko (Zn) levha 54x100x0.5 mm ve AA2024-T3 alüminyum alaşımı levha 100x120x1.6 mm ebatlarında giyotin makas ile kesilerek birleştirme için hazır hale getirilmiştir. SKEL için kullanılan alüminyum alaşımı levhaların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri aşağıda verilen Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. AA2024-T3 Ve AA5754-H22 Levhaların Kimyasal Bileşimi ve Mekanik Özellikleri

Malzeme	Mekanik özellikler		Kimyasal Bileşim (%)								
	Çekme Mukavemeti	Uzama (%)	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
AA2024-T3	435 MPa	17	93.1	0.07	0.14	4.5	0.65	1.5	0.01	0.02	-
AA5754-H22	245 MPa	14	95.2	0.25	0.31	0.02	0.38	3.2	0.18	0.12	0.23

SKEL işleminde kullanılan probsuz (karıştırıcı uçsuz) takım 1.2343 sıcak iş çeliğinden imal edilmiştir. Daha sonra su verme işlemi ile 54- 56 HRC sertlik değerine ulaştırılmıştır. Kullanılan takımın omuz çapı 14 mm'dir. SKEL için kullanılan probsuz takımın resmi Şekil 1a ve 1b'de gösterilmiştir.



Şekil 1. a) SKEL Takımı b) Takım Omuz Görüntüsü

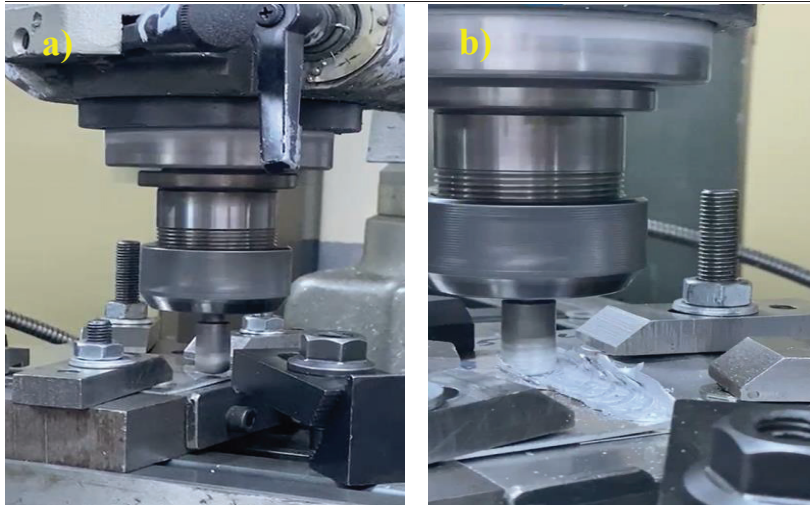
Kalınlığı 1,6 mm olan AA2024-T3 alüminyum alaşımı levha üstte olacak şekilde SKEL işlemi numerik kontrollü freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. SKEL işlemine başlamadan önce literatür taraması yapılmış ve birleştirme parametreleri

belirlenmiştir. Birleştirme parametrelerinde, bekleme süresinin değiştirilmesi mekanik özelliklere nasıl etki edeceği incelenmiştir. Tablo 2’ de birleştirme parametreleri verilmiştir.

Tablo 2. Birleştirme Parametreleri

Birleştirme No	Takım dönme hızı (dev./dk.)	Takım ilerleme hızı (mm/dk.)	Takım dalma derinliği (mm)	Bekleme süresi (s)
1	2080	45	2.6	50
2	2080	45	2.3	10

SKEL kalıbına, AA5754-H22 alüminyum alaşım levha üzerine Zn levha yerleştirildikten sonra AA2024-T3 alüminyum alaşım levha en üst kısma konarak baskı pabuçları ile sıkıştırılmıştır. Takım eksenine, birleştirmenin tam merkezine gelecek şekilde ayarlanıp parçanın son konumu belirlenmiştir. SKEL işlemine hazır hale gelen numuneler birleştirme parametrelerine bağlı olarak manuel bir şekilde birleştirilmiştir. 45 mm/dak takım ilerleme hızı ve takım bekleme süreleri 10 ve 50 s olarak belirlenmiştir. Birleştirme işleminin yapılmasına ilişkin resim Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2a’da SKEL’de daldırma işlemi öncesi, şekil 2b’de ise SKEL işlemi sırası gösterilmiştir.



Şekil 2. a) SKEL’de Daldırma İşlemi Öncesi b) SKEL İşlemi Sırası

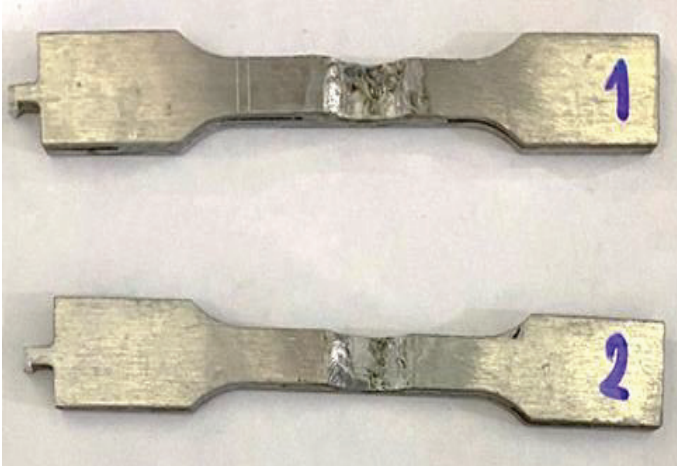
SKEL işlemi uygulanmış AA2024-T3/Zn/AA5754-H22 alüminyum alaşım ve ara

katman çinko metalleri çekme numuneleri hazırlamak için birleştirme bölgelerinden AWS C1.1 standardına (American National Standards Institute, 2019) uygun şekilde su jeti yöntemi ile kesilmiştir. (Şekil 3).



Şekil 3. Su Jeti ile Kesim

Su jeti ile kesildikten sonra çekme testi için hazır hale getirilmiş ve teste tabi tutulmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Çekme Testi Numuneleri

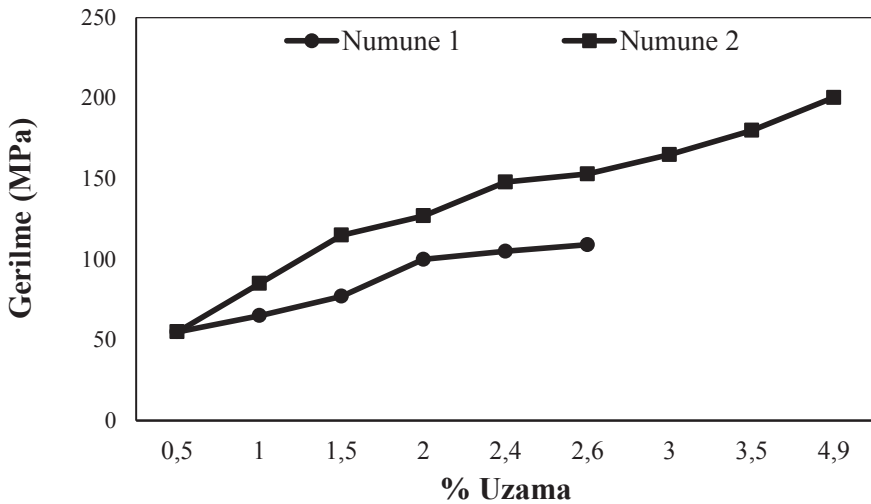
Birleştirilen malzemeler zımparalanmış ve metalografik inceleme için Keller reaktifi ile dağlanmıştır. Metalografik inceleme için hazırlanmış numuneler mikroyapı değerlendirmesi için optik mikroskopta incelenmiştir. Ayrıca, birleşme bölgelerinden HV mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. HV deneyi, 200 g yük ve 10 s'lik bir sürede gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Çekme Testi

SKEL yapılmış numunelerin gerilme-%uzama grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Grafikte bekleme süresi 10 s olduğunda elde edilen sonuçlar numune 1 olarak, bekleme süresi 50 s olduğundaki değerler ise numune 2 olarak gösterilmiştir. 1 numaralı numunenin çekme testi sonucunda 109.1 MPa değerinde en düşük çekme mukavemeti, 2 numaralı numunede 200.4 MPa değerinde en yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir.



Şekil 5. Numunelerin Gerilme-%Uzama Grafiği

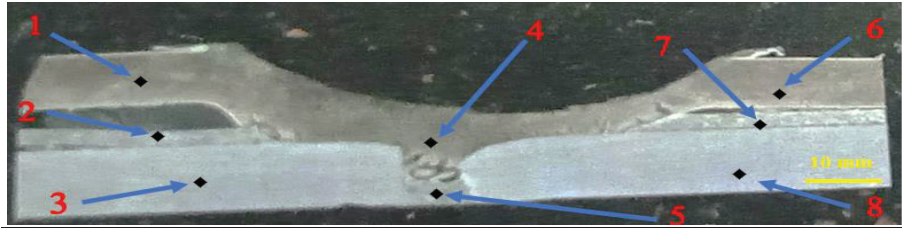
Şekil 5'deki değerlerin birbirinden farklı çıkmasının sebebi bazı bölgelerde yetersiz nüfuz etme, birleştirme bölgesindeki ısı girdisinin düşük olması, karıştırmanın yeterli ve tam olmaması sebebiyle bu bölgelerde çekme testinde farklı değerler elde edilmiştir. Bu olumsuzluklar giderilmesi uygun birleştirme şartları ve uygun takım dönme hızı ve bekleme süresiyle rahatlıkla giderilebileceği düşünülmektedir.

Lathabai, Painter, Cantin ve Tyagi (2006), ekstrüde edilmiş bir Al-Mg-Si alaşımının sürtünme noktası birleştirmesi olan çalışmalarında farklı takım dönme hızı ve bekleme süresi kullanmışlardır. Bunun sonucunda takım bekleme süresinin artışı çekme kuvvetini hep artırma yönünde sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

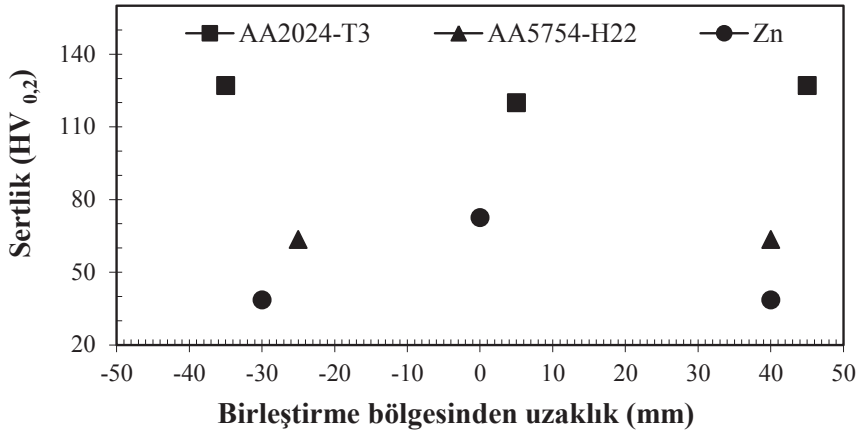
3.2 Mikrosertlik Testi

Birleşme bölgelerinden HV mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Şekil 6'da mikrosertlik ölçümü için hazırlanmış numunenin makro görüntüsü ve sertliğin hangi bölgelerden alındığı gösterilmiştir. Şekil 7'de farklı numunelerin mikrosertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

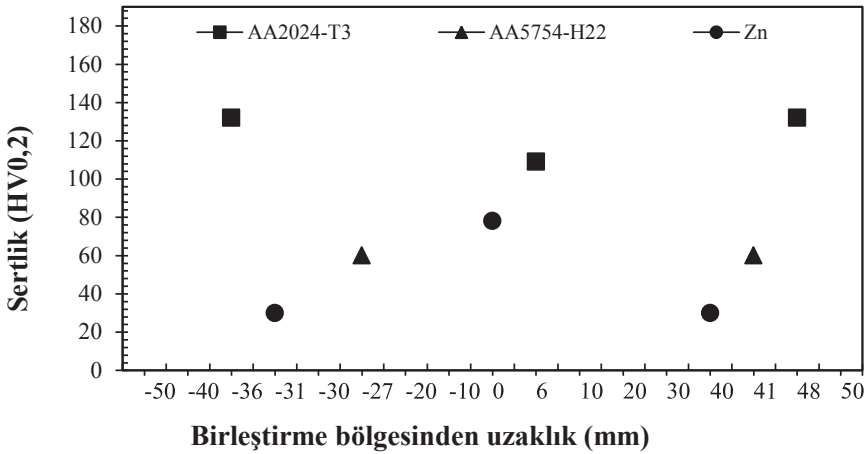
Şekil 6'de 1 ve 6 numaralı bölgeler Şekil 7 ve 8'de kare ile gösterilmekte olup AA2024-T3 alüminyum alaşımının ısıdan etkilenmiş bölgesinin (IEB) sertliğini vermektedir. İki grafikte de bu bölgede en yüksek sertliğe ulaşılmıştır. Bu değer yüksek olmasının sebebi AA2024-T3 alüminyum alaşımının, diğer alüminyum alaşımına göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmasından dolayıdır. En düşük sertlik değeri ise Şekil 6'da 2 numaralı bölgedir. Şekil 7 ve 8'de daire ile gösterilen saf Zn ara katmanının IEB kısmında meydana gelmiştir. Isıtma ve soğutma süreleri fazla olduğundan dolayı bu bölge deformasyona uğrayıp yeniden kristalleşme veya aşırı yaşlanma meydana gelmiştir. Şekil 6'da 3 ve 8 numaralı bölgeler olarak gösterilen bölgeler Şekil 7 ve 8'de de üçgen olarak gösterilip AA5754-H22 alüminyum alaşımının sertliğinin ölçüldüğü termo-mekanik olarak etkilenmiş (TMEB) bir geçiş bölgesini göstermektedir. Şekil 6'daki 5 numaralı bölge olan birleştirme bölgesinin ise saf çinko ve AA2024-T3 alüminyum alaşımının arasında bir değer olduğu saptanmıştır.



Şekil 6. Mikrosertlik Ölçümü İçin Hazırlanmış Numunenin Makro Görüntüsü Ve Sertlik Bölgeleri



Şekil 7. Bekleme Süresinin 10 s Olduğu Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları



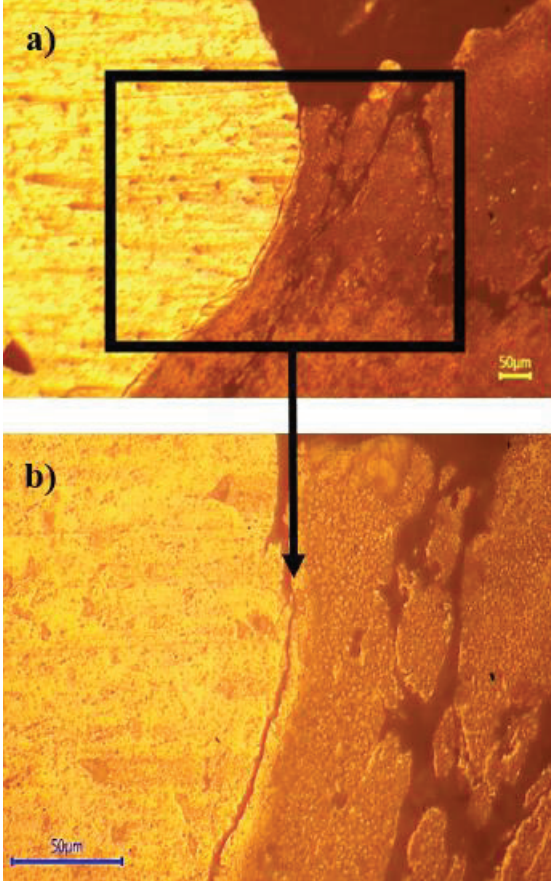
Şekil 8. Bekleme Süresinin 50 s Olduğu Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

3.3 Mikroyapı Sonuçları

SKEL yapılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Şekil 9' da takım bekleme süresinin değişime bağlı olarak mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Bekleme süresi 10 s alındığında AA5754-H22/Zn arasındaki bölgede bir birleşme görülmemiştir ve ısı girdisinden dolayı çatlak meydana gelmiştir (Şekil 9).

Isı girdisinin düşürülmesi malzemelerin iyi karıştırılamaması, kaynak bölgesinde boşlukların ve çatlakların görülmesi gibi nedenlerden dolayı olumsuz sonuçlar vermektedir. Ayrıca, takım dönme hızının (devir sayısının) düşürülmesi ısı girdisinin düşürülmesi için yapılan bir işlemdir. Bu işlem, intermetalik bileşiklerle-

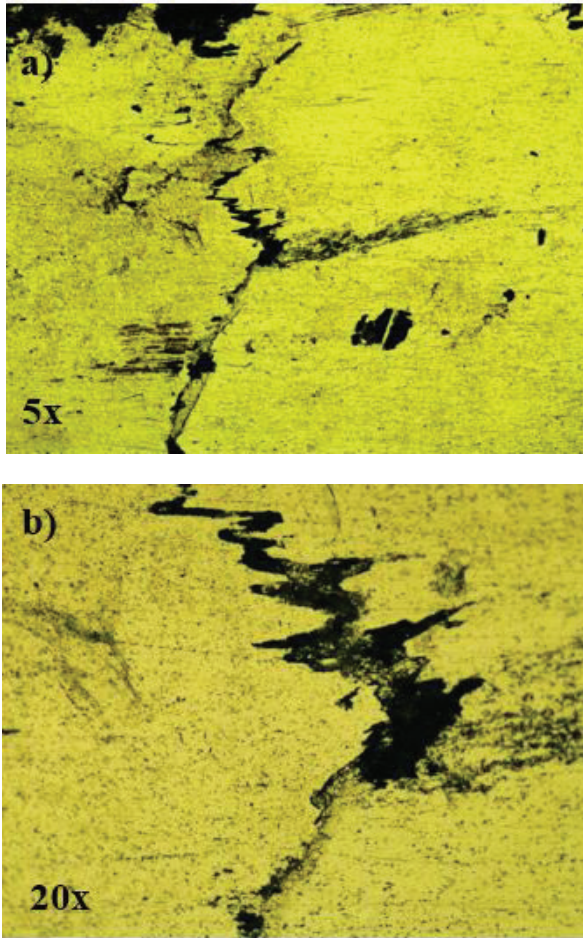
rin kötü bir şekilde dağılımına neden olarak mukavemeti de düşürmektedir (Bilgin, Karabulut ve Özdemir, 2017).



Şekil 9. Bekleme Süresi 10 s Olan a) AA5754-H22/Zn Mikroyapısı (100x) b) AA5754-H22/Zn Mikroyapısı (500x)

Bekleme süresi 50 s'ye çıkarıldığında ise düzgün birleşimli bir bölge oluştuğu gözlemlenmiştir. Ara katman olarak kullanılan Zn tabakasının bir bariyer görevi gördüğü, intermetalik fazları engellediği gözlenmiş ve mekanik dayanıklı kilitlenme elde edilmiştir (Şekil 10). Şekil 10 a' da AA5754-H22/Zn mikroyapısının 5x'de alınmış görüntüsüdür. Şekil 10 b' de ise AA5754-H22/Zn mikroyapısının 20x'de alınmış görüntüsü olup Zn'nin AA2024-T3 ve AA5754-H22 alüminyum alaşımlarının birbirlerine karışmasını engellediği görülmektedir. Zn, alüminyum alaşımları arasındaki difüzyon olayını engelleyip mekanik kilitlenme meydana getirmiştir.

Paidar ve diğerleri (2021), AA2024-T3 ve bakır alaşımlarının, çinko ara katman kullanılarak birleştirilmesini incelemişlerdir. Zn ara tabakasının bir bariyer görevi gördüğünü ve aslında Cu' nun Al' ye difüzyonunun ya da tam tersinin Zn ara tabakası tarafından sınırlandırıldığını belirtmişlerdir. Bu sonuç, birleştirme işlemi sırasında Al ve Cu reaksiyonunu sınırlamıştır.



Şekil 10. Bekleme Süresi 50 s Olan a) AA5754-H22/Zn Mikroyapısı (5x) b) AA5754-H22/Zn Mikroyapısı (20x)

4. Sonuçlar

AA2024-T3 ve AA5754-H22 alüminyum alaşımı levhaların Zn ara katman kullanılarak SKEL ile birleştirilmesinde bekleme süresinin mekanik özellikleri nasıl etkilediği aşağıdaki sonuçlarda belirtilmiştir.

1. Takım bekleme süresinin kaynak çekme kuvveti üzerinde en etkin parametrelere biri olduğu tespit edilmiştir. Bekleme süresi arttırıldığında çekme testi sonuçlarında olumlu artış elde edilmiştir.
2. Ara katman olarak kullanılan Zn tabakasının bir bariyer görevi gördüğü, intermetalik fazların oluşumunu engellediği gözlenmiş ve mekanik dayanıklı kilitlenme elde etmiştir.
3. Takım bekleme süresi arttıkça sertlik azalmıştır. Bunun nedeni, malzemeye aktarılan ısı girdisinin artması ve artan ısı girdisinin malzeme sertliğini azaltıcı etkisinin sebep olduğu düşünülmektedir.
4. 2080 dev/ dk takım dönme hızı, 45 mm/ dk takım ilerleme hızı ve takım bekleme süresi 10 s ile 50 s kullanılarak SKEL yöntemi ile AA2024-T3 alüminyum alaşımlı levha Zn ara tabaka kullanılarak AA5754-H22 alüminyum alaşımlı levha ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Bu kapsamda, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığına teşekkür ederiz.

Semboller ve Kısaltmalar

°C	Santigrat Derece
μm	Mikrometre
s	Süre
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
SKEL	Sürtünme Karıştırma Ekstrüzyon Lehimlemesi
IEB	Isıdan Etkilenmiş Bölge
TMEB	Termo Mekanik Olarak Etkilenen Bölge
dev/dak	devir/dakika
cal/g°C	kalori/gram.santigrat derece
N/mm ²	newton/milimetrekare
kPa/mm ²	Mukavemet
mm/dak	milimetre/dakika
gr/mol	gram/mol
HV	Vickers

Kaynakça

- American National Standards Institute (2019), *AWS C1.1M /C.1:2019 An American National Standard American Welding Society*, Baskı:6.
- Başer, T. A. (2012), Alüminyum Alaşımaları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendis ve Makina*, 53 (635), 51-58.
- Bilgin, M., Karabulut, Ş. Ve Özdemir, A. (2017), Alüminyum Magnezyum Alaşımalarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynak Edilebilirliğinin Değerlendirilmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, GU J Sci, Part C, 5 (2), 191-209.
- Bozkurt, Y., Salman, S. Ve Çam, G. (2013), Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 18(4), 337-345. Doi: <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000111>
- Boz, M. Ve Kurt, A. (2004), The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process, *Materials and Design*, 25, 343-347. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.11.005>
- Çevik, B., Özçatalbaş, Y. Ve Uygur, İ., (2012), 7075 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi, *International Conference on Welding Technologies and Exhibition 23-25 May 2012*, Ankara, Turkey.
- Doğan, S. (2006), AA 5754-H22 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Osmanğazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı*, Eskişehir.
- Günerhan, A. (2021), Havacılıkta Kullanılan AA2024-T3 Alüminyum Alaşımının Lazer İle Yüzey Özelliklerinin Değiştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı*, Kocaeli.
- Haiyan, Z. & Mehta, K.P. (2020), Effect Of Materials Positioning On Dissimilar Modified Friction Stir Clinching Between Aluminum 5754-O And 2024-T3 Sheets, *Vacuum*, 178, 109445. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109445>
- İpekoğlu G., Akçam Ö., ve Çam G., (2018), Farklı kalınlıktaki AA6061-T6 levhaların sürtünme karıştırma kaynağı için uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1), 324-335.
- Lathabai, S., Painter, M. J., Cantin, G. M. D., & Tyagi, V. K., (2006), Friction spot

joining of an extruded Al-Mg-Si alloy, *Scripta Materialia*, 55, 899-902. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.07.046>

Paidar, M., Ashraff Ali, K.S., Mohanavel, V., Mehrez S., Ravichandran M. & Ojo O.O. (2021), Weldability And Mechanical Properties Of AA5083-H112 Aluminum Alloy And Pure Copper Dissimilar Friction Spot Extrusion Welding-Brazing, *Vacuum*, 187, 110080. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110080>

Paidar, M., Bokov, D., Mehrez, S., Nasution, M.K.M., Ojo, O.O. & Zain, A.M. (2022), The influence of the backing plate materials on microstructure and mechanical properties of friction spot extrusion brazing of AA2024-T3 aluminum alloy and Brass sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 28-39. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.002>

Sarsılmaz, F. Ve Özdemir, N. (2008), AA1050/AA6061 Alüminyum Alaşım Çiftinin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Karıştırıcı Uç Profillerinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*.

Sınmazışık G. (1998), Metal Alaşımalarının Örtülü Lehim Yöntemi İle Birleştirilmesinde Kullanılan Değişik Revetmanların Lehim Hassasiyetine Etkileri Üzerine Araştırmalar, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, İstanbul.

Şık, A., Ertürk, İ. ve Önder, M. (2010), AA2024 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Farklı Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 139-147.

Turbaloğlu, K., İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Tekniği ile AA5754 Malzeme Üretimi, *Teknik Alüminyum San. A.Ş., İstanbul*.



A REVIEW ON LABORATORY SCALE MACHINES SUPPORTING R&D STUDIES USED IN FILAMENT YARN TECHNOLOGY

Selcen ÖZKAN HACIOĞULLARI^{1*}, Osman BABAARSLAN²

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana,
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-9124-5593>

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana,
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-1606-3431>

Keywords

Laboratory type filament spinning machines, filament yarn, technical properties of machine, production parameters, functional filament development studies

Abstract

Lots of R&D and P&D studies are carried out in the laboratory conditions with the low-capacity types of industrial machines. Laboratory type filament yarn machines are important in Textile Sector as they form the important infrastructure/facility for research and development studies and lots of studies are carried out in the textile sector about production of filament yarn and the development of its properties. In this study, laboratory type machines used in research studies on filament yarns have been investigated worldwide and their properties have been presented in detail. Then, the technical features and usage purposes of a laboratory type filament drawing machine developed with a new design in its field are explained. In addition, the features of this machine have been compared with another laboratory type machines.

¹ Sorumlu yazar; e-posta: selcenezkan@gmail.com
doi : [muhendismakina.1319131](https://doi.org/10.15013/muhendismakina.1319131)

FİLAMENT İPLİK TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN VE AR-GE ÇALIŞMALARINI DESTEKLEYEN LABORATUVAR ÖLÇEKLİ MAKİNALAR ÜZERİNE BİR İNCELEME

Anahtar kelimeler

Öz

Laboratuvar tipi filament iplik makineleri, filament iplik, makine teknik özellikleri, üretim parametreleri, fonksiyonel filament geliştirme çalışmaları

Sanayi tipi makinelerin düşük kapasiteli üretim yapan türleri sayesinde, laboratuvar ortamında birçok Ar-Ge ve Ür-Ge çalışması gerçekleştirilmektedir. Bu tür makinelerden biri olan laboratuvar tipi filament iplik makineleri, araştırma çalışmalarına zemin oluşturduğu için Tekstil Sektöründe önemli bir yere sahiptir ve Tekstil sektöründe filament iplik üretimi ve özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak birçok çalışma yapıldığı bilinmektedir. Bu çalışmada, filament ipliklere dair araştırma çalışmalarında kullanılan laboratuvar tipi makineler dünya genelinde araştırılmış ve özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Sonrasında, alanında yeni bir tasarımla geliştirilmiş olan laboratuvar tipi bir filament iplik makinesinin teknik özellikleri ve kullanım amaçları açıklanmıştır. Ayrıca, bu makinenin özellikleri diğer laboratuvar tipi makinelerin özellikleri ile kıyaslanmıştır.

Derleme Makalesi

Review Article

Başvuru Tarihi : 28.06.2022

Submission Date : 28.06.2022

Kabul Tarihi : 25.01.2023

Accepted Date : 25.01.2023

1. Introduction

Laboratory type (lab-type) machines have many advantages. These are low-capacity production, the lab-machine covers small area and has a small working surface, trial productions can be done rapidly, changing the production parameters as desired and quickly, etc. Many R&D studies are carried out with this type of machine. Hence, various lab-type machines are manufactured by different companies in the world.

Various original studies have been carried out with lab-type filament yarn machines and at the end of these studies, new functional filaments with improved properties can be produced. Some of these studies are improvement of yarn structural properties, improvement of yarn mechanical properties and unevenness, production of functional filaments (flammability, UV resistance, antibacterial, etc.), examination of production parameters and development of new production parameters (section shape, draft ratio, winding speed, etc.) listed as. As a result, lots of original studies have been carried out on these type machines and so, these machines have a significant contribution to R&D studies. It is known that these machines are generally used in university laboratories and R&D centers of companies. In this way, different R&D studies are carried out on these machines fastly.

In this article, the technical and general properties of the lab-type filament drawing machine developed with a new design and the other lab-type filament production machines used in this field were investigated in detail. Extensive literature research has been carried out and two main results have been reached. The first is, the lab-scale filament yarn production machines have been manufactured by various companies in the world (Fiber Extrusion Research&Pilot Machines for Homo&Bicomponent Laboratory Applications, 2022; Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester, 2022; Hacıoğulları Özkan 2014; Hacıoğulları Özkan and Baabaarslan, 2015; Laboratory Type Textile Machines Spintech, 2023; Line Types, Austrofil®, 2023; Multifilament Spin-Draw-Wind Lines Document, 2022; Spin-boy Machines, 2022; Spinning Tester Equipment for Laboratory and University College, 2022; Wide Wayne Lab Sheet Roll Stack, 2022) and secondly, lots of researches and studies have been carried out by using these type machines (Bourbigot and Devaux 2002; Hacıoğulları Özkan, 2014; Hojiyev and Ulcay 2021; Kara, Erdoğan and Erdem 2012; Kebabçı, 2015).

The aim of this paper is to investigate the technical features and using areas of lab-type filament yarn machines in worldwide and explain properties of a new type of lab filament drawing machine. In this way, more detailed information of this type machines was given.

This study is a Review Article; it gives general and specific information (techni-

cal properties, figures, etc.) about lab-type filament yarn machines. In addition, information of lab-type filament drawing machine (LabFil) which was developed with university-industry cooperation was also given in this study. Technical features of all machines were compared each other and the technical properties of all these machines were given as a table (Table-1).

2. History of Man-Made Fibers and Melt Spinning Process

2.1 History of Man-Made Fibers

Man-made fibers, one of the outputs of lab-type filament drawing machines, have a long history. It has been observed that there is a continuous improvement in technology of fiber production in this history. In this section, information about the history of synthetic fiber types and these production principles were presented.

Man-made fibers have a long history. Robert Hooke first brought up the idea to create silk-like fibers in 1665, followed by René-Antoine Ferchault de Réaumur, who actually produced the first artificial filaments from different kinds of varnish in 1734. In 1883 Joseph Swan injected dissolved nitro-cellulose into a coagulation bath and thus obtained filaments for light bulbs. In 1938 DuPont de Nemours (Wilmington, DE, USA) launched the production of Nylon® (PA 6.6), the first commercial melt-spun fiber, invented by Wallace Carothers. In the same year Paul Schlack developed Perlon® (PA 6). The first polyester fiber, Terylene® (PET), was created in 1941 by Imperial Chemical Industries (ICI). The commercial production of polyolefin fibers started in 1957, based on the Ziegler-Natta catalyst recognized by a Nobel Prize in 1963. Today, chemical fibers are spun by drawing a melt or solution of a polymer or an inorganic material from a spinneret into a medium (quenching or solvent removal by air/gas, water or coagulation bath) where it solidifies. Drawing can either be applied by godets (rollers) and winders, by a high-velocity air stream, or by an electrostatic or centrifugal force (Hufenus, Yan, Dauner, and Kikutani, 2020).

2.2 Melt Spinning Process

Various synthetic filament yarns can be produced in different raw materials (PP, PE, PES, PBT, etc.) on lab-type filament drawing machine and main production methods of filament yarn are melt spinning, wet spinning and dry spinning. Lab-type filament machines mostly work according to the melt spinning principle. Information about the melt spinning process was given in this section to support the importance of lab-type filament drawing machine.

Melt spinning is an important production method of synthetic filament yarn. The origin of the melt spinning process apparently dates to the 1845 English patent

of R. A. Brooman who conceived the basic concept as a method to produce filaments from gutta percha. But it was Carothers and Hill who first described the process in the modern era. The work of Carothers and his associates led to successful commercial application of melt spinning in 1939 as a process to produce polyamide 66 (“nylon”) filaments and yarn. In the last 100 years melt-spun fibers became by far the most important fibers for apparel, but even more so for technical textiles, where they spawned a myriad of novel applications (Salem, 2001).

The direct spin draw process was developed conventionally in the 1960s by coupling the spinning and drawing processes in series. As the demand for crimped yarn increased in the 1970s, the drawing and texturing processes were combined into one process, and a new spinning process was developed to produce Partially Oriented Yarn (POY) with a spinning speed of 3000-3500 m/min. to produce the fed stock for integrated draw-texturing (Salem, 2001).

The spinning speed increased as winder performance improved in the early 1970s, and this development encouraged the investigation of high-speed spinning. In 1983, the Association for Efficient Synthetic Fibre Technology was established in Japan with a scheme of conditional loans for research and development of innovative technologies under the Ministry of International Trade and Industry; its spinning section coordinated a project for high-speed spinning of polyester at 9000-14000 m/min. These investigations have revealed the optimum conditions for high-speed spinning and the mechanism of the fiber structure formation during the process. Today, high-speed spinning at 6000-8000 m/min is in commercial operation for the production of synthetic yarns such as nylon and polyester (Nakajima, 2000).

The melt spinning process involves melting and extrusion of the material to be processed through a multihole capillary die, called a spinneret, followed by cooling and solidification to form filaments that can be wound on a bobbin or otherwise processed (Salem, 2001).

A basic form of the melt spinning process is illustrated in Figure 1. Polymer, usually in the form of dried granules or pellets, is fed into an extruder where it is melted and conveyed to a positive displacement, metering pump. The metering pump controls and ensures a steady flow of polymer to the “spin pack” where the polymer is filtered and forced through the capillaries of a multifilament spinneret. The extruded filaments are drawn down to smaller diameters, i.e., finer deniers, by the action of a godet roll, while they are simultaneously being cooled (quenched) by air blowing across the filament bundle. The resulting filaments are either wound onto a bobbin or they are passed directly to another processing step such as “drawing” or “texturizing” (Salem, 2001).

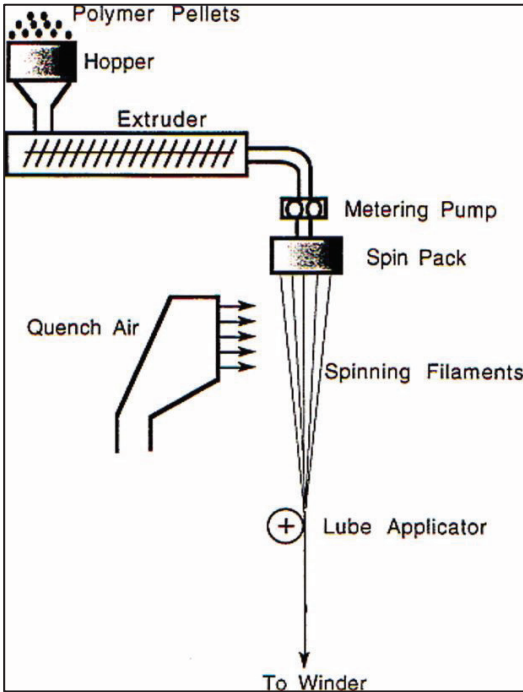


Figure 1. The Melt Spinning Process (Salem, 2001)

The major process variables for melt spinning are:

- Extrusion temperature,
- Mass flow rate of polymer through each spinneret hole,
- Take-up velocity of the wound-up or deposited filaments,
- The spinline cooling conditions,
- Spinneret orifice shape, dimensions and spacing, and
- The length of the spinline (Salem, 2001).

These variables are not entirely independent of each other. For example, the length of the spinline will generally be controlled by the efficiency of the cooling conditions along the spinline. More efficient cooling allows shorter spinline. Spinline cooling is largely controlled by the velocity, temperature, and distribution of the cooling air, but it is also affected by factors such as spinneret configuration, mass throughput and the specific design of the cooling system.

Figure-2 shows that yarn process flow diagram from melt spinning to fabrics. The end-use areas of the filament yarns which are produced by the melt spinning method were also shown with this figure. As can be seen in Figure-2, many different types of filament yarn (LOY, POY, FDY, BCF, etc.) can be produced with

the melt spinning method. In addition, these products are used in many different technical and conventional fields.

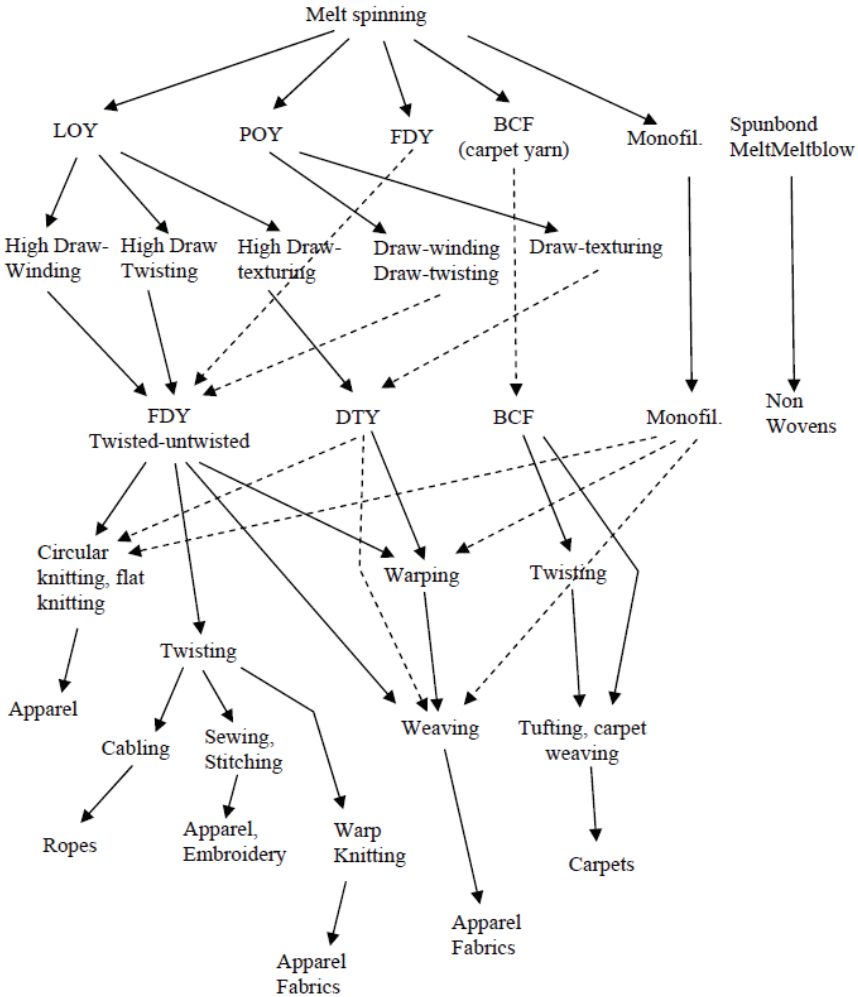


Figure 2. Yarn Process Flow Diagram from Melt Spinning to Fabrics (Mylläri, 2010)

When the filament yarn production amounts were investigated worldwide, it was seen that the filament yarn production amounts had increased. World filament yarn output in 2019 was up 6% to 55 million tonnes (Engelhardt, 2021). The filament yarns that make up this production output are divided into two technologically. These are regular filament yarns and functional filament yarns. In addition, R&D studies are carried out to improve the properties of regular filament yarns.

3. Various Laboratory Filament Drawing Machines and Their Properties

The laboratory filament yarn machines that are important for R&D studies and which have been manufactured around the world were described below.

The figure of Spinboy lab-type filament machines in Belgium was given below (Figure 3). The company (Busschaert Engineering) has three type machines as Spinboy I, Spinboy II and Spinboy II POY.



Figure 3. Spinboy Machines (Spinboy Machines, 2022)

Other lab-type filament machine was manufactured by Wayne Machine Company in the United States of America [2]. Production process of this machine is wet spinning, and this machine has horizontal operating plane (Figure 4).



Figure 4. Wayne Machine Lab-Type Filament Machine (Wide Wayne Lab Sheet Roll Stack, 2022)

Another lab-type filament drawing machine name is the Plantex-Libe Line which is Italian company (Figure 5).



Figure 5. Plantex Libe Line Machine (Hacıoğulları Özkan, 2014)

The Hills research and pilot fiber extrusion machines provide flexible performance with reliable operations. They are currently being used for simulation of production systems, color matching trials, polymer characterization, product development, process development, and the production of specialty yarns and trial lots. Each machine has the capability to convert melt-spinnable polymers into finished fibers (Fiber Extrusion Research&Pilot Machines for Homo&Bicomponent Laboratory Applications, 2022). Figures of Hills Machine were given in below.



Figure 6. Hills Lab-Type Filament Yarn Machine (Fiber Extrusion Research&Pilot Machines for Homo&Bicomponent Laboratory Applications, 2022)

Lofil group company has laboratory filament machine which name is Baby Lofil (Figure 7) and this is an Indian Company.



Figure 7. Baby Lofil HT Lab-Type Filament Yarn Machine (Multifilament Spin-Draw-Wind Lines Document, 2022)

SML's compact entry model is particularly well suited to small batch sizes of Fully Drawn Yarn (FDY) and Medium-Drawn Yarn (MDY) yarn, packing a persuasive punch with its high degree of flexibility and efficiency. This machine name is Austrofil MT/HT2x2/4E/75. This machine is bigger than other lab-type machines, nevertheless purpose of using of Austrofil MT/HT 2*2/4E/75-SML is to producing trial and R&D studies (Figure 8).



Figure 8. SML (Austrofil MT/HT 2*2/4E/75) Lab-Type Filament Yarn Machine (Line Types, Austrofil®, 2022)

Spintech lab-type machines are manufactured by Gülnar Machine company which is in Turkey. The company has three different lab-type machines as Spintech I, Spintech II and Spintech III (Laboratory Type Textile Machines Spintech, 2022). Images of machines were given in below (Figure 9).



Figure 9. Spintech Lab-Type Filament Yarn Machines (Laboratory Type Textile Machines Spintech, 2022)

Fourné Maschinenbau company has lab-type filament machine which name is Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester (Figure 10) and this is an German Company.

The well-known and proven technology of Fourné melt spintesters is especially suitable for:

- Testing of spinnability of polymer materials (chips or powder),
- Production of smallest amounts of filament yarns or fibers,
- Production of material samples,
- Development of new fiber materials for special applications (Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester, 2022).



Figure 10. Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester Lab-Type Filament Yarn Machine (Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester, 2022)

For these processes all the advantages of a Fourné melt spintester become apparent. These advantages are:

- Lowest raw material demand and minimized throughput with optimum homogeneity of the melt in Fourné spinning extruders,
- Retrofitting of side stream units for liquid or melted additives,
- Extendable for all kinds of bi-component and multi-component fiber production,
- Optional equipment available for production of hollow fibers,

- Reproduction of the production process in a small space,
- One-man operation possible.

Laboratory spintesters allow producing with material throughputs between 300 g and 5 kg per hour.

The standard spinning systems were designed for polymers with drawing temperatures up to approximately 350°C, suitable for PET, PA, PP, PE. Optionally Fourné can offer a high temperature system for spinning temperatures up to 500°C, so that drawing of polymers like PEEK or PPS become possible. Depending on the specification titers of 22-240 or 100 to 500 dtex are possible for multifilament, comprising a capillary fineness of 0.5 to 20 dtex. For monofilament diameters of approx. 0.01 to 0.15 mm are practicable (Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester, 2022).

Image of CF-1000 Melt Spinning lab-type machine was given in below (Figure 11). Various type thermoplastic materials which are (PP, PE, PTFE, PA, PET, PTT, PPS, PEEK, etc.) can be produced with this machine (Spinning Tester Equipment for Laboratory and University College, 2022).

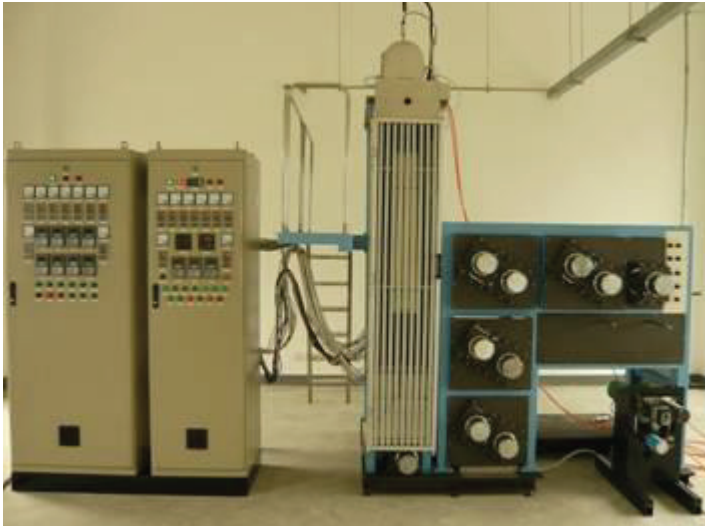


Figure 11. CF-1000 Melt Spinning Lab-Type Filament Yarn Machine (Spinning Tester Equipment for Laboratory and University College, 2022)

Lab-type filament drawing machines are used for similar purposes in generally universities and research centers. R&D studies are carried out on this type machines about especially polymer science, nanotechnology, improvement of structural and functional properties of flat and textured yarns, etc. Detailed technical properties of all these machines were given in Table-1 (Section-4).

4. A New Designed and Developed Laboratory Type Machine (Labfil)

In the previous section, information about lab-type filament drawing machines in worldwide was given. When literature was considered about this subject, it was seen that various and qualified scientific studies were carried out with lab-type filament production machines. In addition, the small volume of this type machines and the low working surface are also important advantages. Also, functional filament yarns (flammable, UV resistance, etc.) are produced on these lab-type machines. An important infrastructure/facility has been created with this machine for R&D studies, undergraduate and graduate studies. A basic technical drawing of LabFil and an image of this machine were given in Figure 12 and Figure 13.

In this section, information about a lab-type machine has been developed with a new design was presented. Then the technical properties of all these lab-type machines have been compared each other (Table-1).

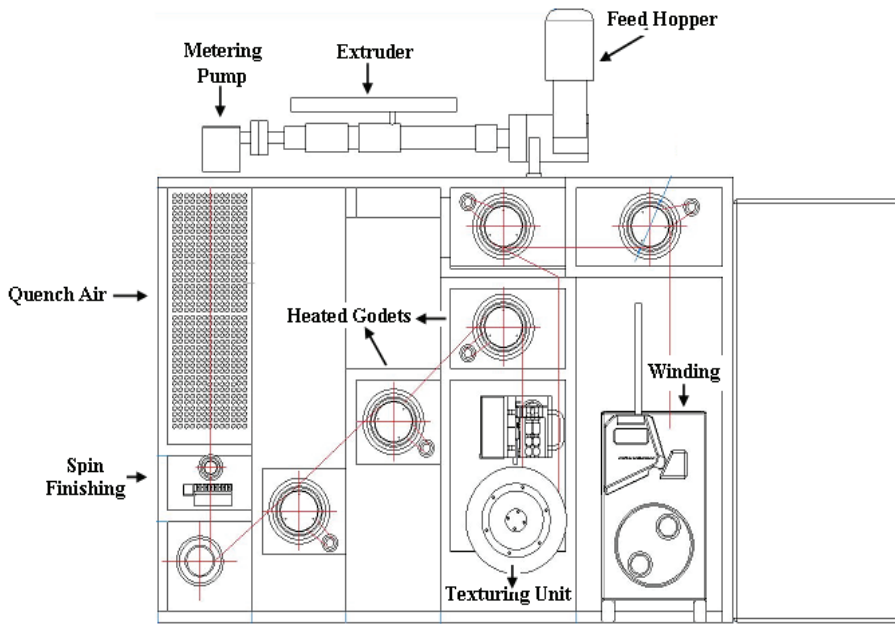


Figure 12. Technical Drawing of Developed Lab-Type Filament Drawing Machine (LabFil) (Hacıoğulları Özkan and Babaarslan, 2015)

Table 1. The Technical Properties of Lab-Type Filament Drawing Machines in the World

Machines												
Technical Properties	Labfil	Spinboy I	Spinboy II	Spinboy II POY	SML-Austrofil MT/HT 2*2/4E/75	Hills	Baby Lofil	CF-1000	Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester	Spintech I	Spintech II	Spintech III
Raw Material	PP, PE, PA, PET	PP, PES	PP, PA, PES	PP, PES, PA	PP, PA6	PP, NylonPES	PP, PE	PES, PP, PA, PBT	PET, PA, PP, PE, PEEK, PPS	PP, PA, PET, PBT	PP, PA, PET, PBT	PET, PBT
L/D or Screw Diameter (mm) and Extruder Type	27 mm Single	25-35 mm Single	45 mm Single	25-35 mm Single	28 L/D 75 mm Single	30 L/D Single	28 L/D Single	Extruder diameter:20 mm	25 L/D Single	25 mm 32 L/D Single	25 mm, 32 L/D Single	25 mm 32 L/D Single
Number of Spinneret	2	2	2	2	8	1	2	2	2	2	2	2
Texturizing Unit	Hot Air and Texturizing Drum	3D-Hot Airjet	Hot Air Open Jet	Hot Air Open Jet	Interm. Jet	There is not tex. unit	Interm. Jets	Airjet Interm. Unit	There is a texturing unit	Hot Air	Hot Air	Hot Air
Filament Yarn Type	Flat and Textured Yarn	Flat and Textured Yarn	Flat and Textured Yarn	Flat and Textured Yarn	FDY and MDY	Flat Yarn	Flat Yarn	Flat Yarn	Flat and Textured Yarn	Flat and Textured Yarn	Flat and Textured Yarn	Flat and Textured Yarn
Number of Filament Yarn	CF: 200-1500 denier BCF: 500-2500 denier				165-4400 dtex		600-2400 denier	20-80 denier	100-500 dtex	CF: 300-1200 dtex BCF: 400-3800 dtex	CF: 300-1200 dtex BCF: 400-3800 dtex	FDY: 200-500 dtex POY: 200-600 dtex
Capacity (max.)	72 kg/day	GH: 10 kg	GH: 20 kg	GH: 20 kg	110 kg/hour	MPC: 1,20 cc/rev	MC: 20 kg/hour	120 kg/day	4 kg to 50 kg per hour	4,5-5 kg/hour	4,5-5 kg/hour	4,5-5 kg/hour
Winding Speed (m/min-max)	2050	1500	2500	2500-3500	1000-3500		1200	1000	3000	1000	1000	4500
Dimensions (Iner for Height (H), Length (L), Width (W))	H: 3 L: 3,5 W: 1,6	H: 2,6 L: 2,6 W: 1,2	H: 2,8 L: 2,6 W: 1,4	H: 3,6 L: 3 W: 1,7	H: 6 L: 8,1 W: 7,2	H: 1,3 L: 1,1 W: 0,6	H: 4,5 L: 3,4 W: 3,4	H: 2,5-3 L: 2 W: 1,5	H: 2,65 L: 3,4 L: 3,7 W: 2,05	H: 2,65 L: 3,4 L: 3,7 W: 2,05	H: 2,95 L: 3,7 W: 2,37	H: 4,75 L: 5,1 W: 2,65
Installed Power of Machine	78,8 kW	IPM: 4 kW	40 kW	IPM: 25-30 kW	247 kW		45 kW			55 kW	60 kW	60 kW

*: Detailed research has been carried out about all lab-type machines. All technical properties of these machines are given in the Table-1. The technical specifications that could not be found were not given (Interm: Intermingling, MPC: Metering Pump Capacity, MC: Melt Capacity, GH: Granulate Hopper, IPM: Installed Motor Power).



Figure 13. Image of Developed Lab-Type Filament Drawing Machine (LabFil) (Hacıoğulları Özkan and Babaarslan, 2015)

LabFil and other machines have melt spinning principle (only Wayne machine is working on wet spinning principle). The detailed technical properties of these machines were presented in Table 1.

"Wayne Machine" works according to the wet spinning principle and has 24 L/D ratio. The other machine, Plantex Libe Line, works according to the melt spinning principle and has 30 L/D ratio. Information of Wayne Machine and Plantex Libe Line machine is not in Table-1 because sufficient technical properties about these machines could not be reached.

Also, scientific studies were carried out on this type machines such as development of the structural, mechanical, and functional properties of filament and textured yarns. One of the aims of this paper is to shed light on the scientific works that can be done in such machines. Also, it is an original table was prepared by researching the technical features of this type of machines in detail.

Table-1 shows that these machine features are generally similar to each other, and these technical properties effect the quality of filament yarn directly. Also, the structural and mechanical properties of the yarns produced on these machines should be similar to the first quality yarns produced in the industry. In this way, acceptable scientific study results will be obtained. In addition, the filament yarns produced on these machines should have sufficient structural and mecha-

nical properties (especially yarn tenacity, breaking elongation and unevenness).

As mentioned before, a wide variety of scientific studies can be carried out on these machines. Some of these study topics were listed below:

- Effects of production parameters on the structural, mechanical, and specific properties of flat filament or textured yarns,
- Development of production conditions/parameters of a lab-type machine,
- Filament yarns can be produced with different/various additive materials such as flame retardant, UV resistance, antimicrobial, etc. and then properties of these yarns can be examined,
- Functionalized filament yarns can be produced with different sized additive materials (micro and nano scale). Then, properties of these products can be examined,
- Studies can be performed for development of texturizing properties of filament yarns (Changing production parameters; spinneret configuration, drawing ratio, etc. Texturizing conditions; air pressure, air temperature, nozzle configuration, etc.),
- Filament yarns (CF and BCF) can be produced with newly features (by using new additive material),
- Properties of filament yarns (CF and BCF) can be developed (Hacıoğulları Özkan and Babaarslan, 2015).

5. Production Parameters of Lab-Type Filament Drawing Machine

Lab-type filament drawing machines provide the facility for trials of yarn production. This type machines have easily changeable production parameters and production types. In this way, lots of trial productions can be done quickly on these machines. PP, PE (Polyethylene), PLA (Polylactic Acid), PES (Polyester), PA (Polyamide) and PBT (Polybutylene Terephthalate) polymers are used mostly in these type machines (especially PP and PLA). PP polymer has easily productivity, widely end-used areas, large productive capacity, low cost, etc. Therefore, this polymeric material is mostly preferred.

There are many studies in the literature on filament yarns produced by the melt spinning process. Some of these studies are the effects of production parameters on filament properties (structural, mechanical and functional), productions of functional filament yarn, etc. (Ahmed, Shamey, Christie and Mather, 2006; Babaarslan and Özkan Hacıoğulları, 2013; Bagheri, Tavanai, Ghiaci, Morshed and Shamsabadi, 2019; Bhattacharya and Chaudhari, 2015; Chiu, Lin and Hong, 2011; Çelen and Koçer, 2022; Erdem, Cireli and Erdogan, 2009; Kalantari, Rahbar, Mojtahedi, Shoushtari and Khosroshahi, 2007; Kara, Üreyen, and Erdogan,

2016; Kılıç, Jones, Shim and Pourdeyhimi, 2016; Kim, Lin and Bhattacharyya, 2017; Maqsood, Langensiepen and Seide, 2020; Misra, Spruiell, Lu and Richeson, 1995; Ni, Li, and Chen, 2020; Özkan, 2008; Rangasamy, Shim and Pourdeyhimi, 2011; Subasinghe, Somashekar and Bhattacharyya, 2018). It is known that these process parameters of extruder should be determined correctly for quality production of filament yarns.

Technical properties of lab-type filament drawing machines (L/D ratio, texturizing unit, etc.) are so important for quality of products. The basic technical parameters that determining of the characteristics of laboratory type filament machines and the units of these machines were given in this section.

I. Screw Extruder:

In majority of commercial processes melting is done by continuous screw extruders. While the screw rotates, it heats, homogenizes, and transports the material forward. Screw extruders have three zones: Feeding, compression and metering. The goal is to make the material as homogenous as possible in a right temperature. Material is fed through a hopper and generally it flows by gravity to the extruder barrel which is annular space between the barrel and the screw. Polymer is heated with frictional and conduction heat. When polymer is moving forward friction between it and the metal barrel generates substantial amount of heat. The rest of the heat needed comes from barrel heaters by conduction. At the end of the screw, in the metering zone, polymer should be totally melted and homogenous (Mylläri, 2010).

Extruder parameters are ratio of L/D, temperature, pressure, etc. and there are various studies carried out in the literature about parameters of extruder (Arslan, 2016; Dulmalik, Chafidz, Fernandi and Ardianto, 2019; Kotek, Afshari, Avci and Najafi, 2017; Lewandowski and Wilczynski, 2022; Şahin, 2018; Şen, 2015; Vahabi, Laoutid, Formela, Saeb, and Dubois, 2022). These parameters were explained in below.

a. L/D Ratio of Extruder:

L/D ratio is one of the basic construction parameters of the extruder and this parameter determines as the characteristic of the extruder. L is the screw length and D is the screw diameter (Figure 14). L/D ratio must be chosen high value for the better mixing process and quality product; an increased L/D ratio creates the better mixing process and a more even distribution. For this purpose, value of the L/D ratio must be 27 or more.

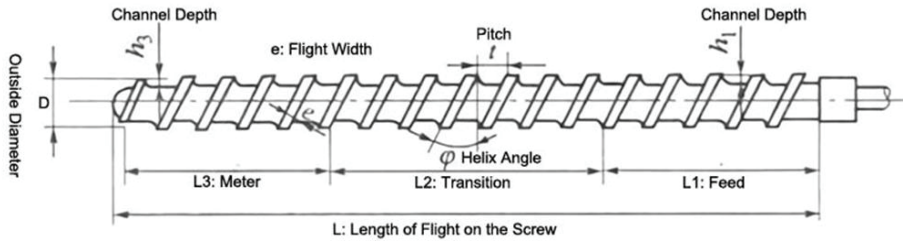


Figure 14. Single-Screw Extruder and The Main Parameters of Extruder (What Is L/D ratio in injection moulding machine, 2022)

b. Temperature:

The value of extrusion temperature must be chosen according to melting point of polymer type and homogeneity of melt flow temperature is a major factor which influences product quality. Otherwise, the material may not melt completely or may burn.

c. Pressure:

The pressure of the inside the extruder is set according to the screw rotation speed and this parameter is selected according to characteristic of polymeric material; as the screw rotation speed increases, the pressure also increases.

II. Metering Pump:

Capacity of metering pump unit is measured accurately the molten polymer and pumps to spinnerets. In this way, the desired filament fineness, filament unevenness and yarn quality can be obtained.

Metering pump capacity is important parameter, and this parameter is the amount of flowing melted polymer in one revolution of the metering pump. There are various studies in the literature about the importance of the metering pump and its effect on product properties (Chung, 2020; Shumpert, Padsalgikar, Ellison, Hosangadi and Henshaw, 1996; Turukmane, Shinde, Gulhane and Gupta, 2021; Vogel, Hatzikiriakos, Brüinig, Tändler and Golzar, 2003; Younes, Fotheringham, El-Dessouky and Haddad, 2011).

III. Quenching:

Filament starts to cool down, after the spinneret, take-up rolls are horizontally below the spinneret and before the filament touches them the material should be totally solidified. The spinning operation is characterized by the extrusion of molten polymer through small spinneret capillaries into an air quench cabinet where the individual streams attenuate and solidify to form filaments. There are

lots of studies in the literature about the importance of quenching and effect of the quenching parameters on product properties (especially fineness, unevenness, tenacity, etc.) (Arslan, 2016; Kim, 1986; Kothari, 2000 and Yıldırım, 2007; Kretzschmar and Furter, 2009; Mylläri, 2010; Ruckdashel and Shim, 2020).

IV. Fiber Cross-Sectional Shape

The fiber cross-sectional shape is an important structural/production parameter that effects directly the mechanical and functional properties of filament yarns (Babaarslan and Özkan Hacıoğulları, 2013; Çelen and Koçer, 2022; Kara, Erdoğan and Erdem, 2012; Hufenus, 2011; Kara, Üreyen and Erdogan, 2016; Karaca and Özçelik, 2007; Kebabçı, Babaarslan, Hacıoğulları Özkan and Telli, 2015; Özkan, 2008; Özkan Hacıoğulları and Babaarslan, 2018; Shin, Kim and Kim, 2005; Turukmane, Shinde, Gulhane and Gupta, 2021; Varshney, Kothari and Dhamija, 2011; Varshney, Kothari and Dhamija, 2014). Fiber cross-sectional shape is determined with shape of spinneret orifices. Mostly preferred filament cross-sectional shapes (round, trilobal, hexsa, etc.) were given in below (Figure 15).

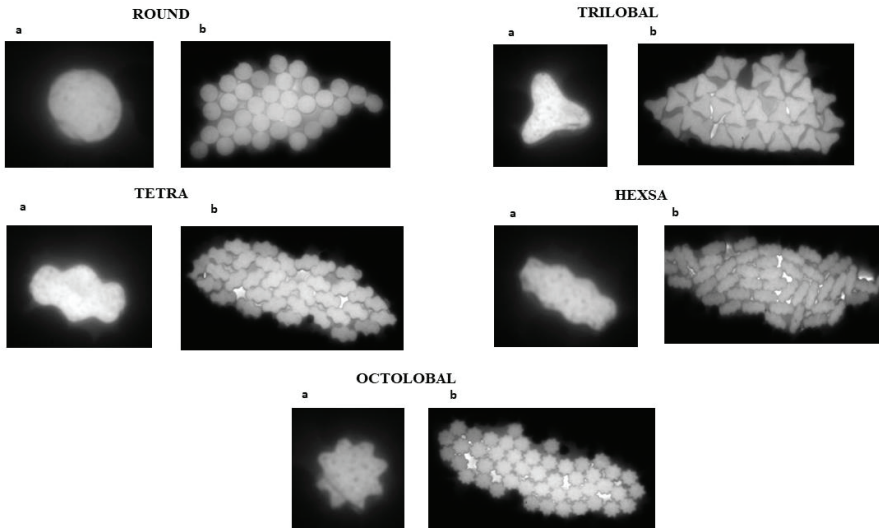









Figure 15. Some of Fiber/Filament Cross-Sectional Shapes (a: Monofilament, b: Multifilament) (Özkan, 2008).

Functional properties of filament yarns can be obtained by using different cross-sectional shapes. For instance, trilobal shape helps in altering hand and increasing the luster. The hexsa cross-sectional shape is a unique shaped construction with six channels that transport the moisture away from the skin and thus keep the wearer dry (Figure 15). Also, more specific cross-section shapes have been developed. Specialized cross-sectional shapes are used for giving various and

delicate luster, handle, and texture to the fabrics. In addition, specialized cross-sections are produced with special orifices, such as a slit, L-shape, T-shape, H, W, X or similar shape modified slits, combinations of circle and slit, and arranged plural circles (Nakajima, 2000). These specialized cross-sections were given in Table-2.

Table 2. Examples of Specialized Cross-Section (Nakajima, 2000)

Trade mark	Producer	Cross-section	Basic technology	Specialities of the product
Solo Sowaie®	Asahi Chemical Industries Ltd.		Hollow, triangular, thick and thin	Higher bending stiffness, mild color
Fontana µ®	Asahi Chemical Industries Ltd.		W-shaped, self-crimping	Bulky, crispy, dry and cool hand
Soielise N®	Kanebo Ltd.		Pentagonal cross section	Mild luster, dry hand and water-absorbent
Vivan®	Kanebo Ltd.		U-shaped cross-section, thick and thin.	Mild luster, dry, spun-yarn like and bending stiffness
Deforl®	Kuraray Ltd.		Flat cross-section, self-crimping	Deep color, bulky and higher bending stiffness
MSC®	Unitika Ltd.		Arrow-like cross-section.	Dry and cool hand
Mixy®	Unitika Ltd.		Random and multi-shaped cross-section	Dry hand, natural appearance, higher bending stiffness

V. Drawing Unit:

Complicated molecular chains are occurred because of transition suddenly of polymer from liquid to solid. Filament yarns are drawn for arrange this structure and increase of ratio of crystallin region. This process is carried out with the difference of speed of the godets in the drawing unit. With this process, the tenacity values of the filament yarns reach the required level. Parameters of drawing unit directly affect the mechanical properties (tenacity, breaking elongation) of filament (Castiglioni, 2008; Dabrowska, Fambri, Pegoretti, Slouf, Vackova and Kolarik, 2015; Gajjar, Stallrich, Pasquinelli and King, 2021; Gupta, Mondal and Bhuvanesh, 1997; Heuvel and Huisman, 1978; Kim, 1986; Salem,1992; Varma and Cameotra, 1973; Viková, Periyasamy, Vik and Ujhelyiová, 2017; Viková, Sakurai, Periyasamy, Yasunaga, Pechočiaková, and Ujhelyiová, 2021; Yuan, Mak, Kwok, Yung and Yao, 2001).

VI. Texturizing Unit:

Lab-type filament drawing machines generally have texturizing unit and textured yarns can also be produced on the machine with this unit and so, also can done lots of R&D studies can done about texturizing subject.

Several processing techniques have been developed to production of textured yarns such as mechanical/thermal (torsional crimping), chemical/ thermal or

mechanical alone. Textured yarns are more stretchable and have a higher capacity for moisture absorption and moisture transport, better tenacity and lower breaking elongation. Generally, hot air texturizing unit is used on lab-type filament drawing machines. Lots of studies have been done about this subject (Bagheri, Tavanai, Ghiaci, Morshed and Shamsabadi, 2019; Çirkin, 2006; Pal, Gandhi and Kothari, 1996; Tavanai, Morshed and Hosseini, 2003).

VII. Take-Up

Melt spinning is a process where melt polymer passes through a spinneret, solidifies rapidly and forms a fiber structure. The polymer has to be melted and preferably mixed which is normally done with a screw extruder. Extruder is normally used in commercial applications because it ensures sufficient throughput. After melting granulates, the mass goes through a hole or multiple holes. The number of holes can vary from one to many hundreds (Mylläri, 2010). The final process of the filament yarn production machine is the winding process. The aim of winding unit is to create a well bobbin without changing the properties of filament yarn. The important parameters of the winding unit are winding speed, winding tension and winding shape (straight or cross winding), etc (Abbasi, Mojtahedi and Khosroshahi, 2007; Bansal and Raichurkar, 2016; Feldman, 2008; Gajjar, Stallrich, Pasquinelli and King, 2021; Ho, Kim, Jin and Park, 2010; Morgan, 2006; Nakajima, 2000; Pelzer, Vad, Becker, Gries, Markova and Teplyakov, 2021; Raichurkar and Ramachandran, 2015; Ramirez, Bashir, Luo and Liu, 2009; Turukmane, Gulhane and Kakde, 2020). In this type of machines, fully automatic or semi-automatic winders can be used. The winding speed is generally 1000-3500 m/min. Modern take-up machines include not only a winding unit but also yarn guiding, yarn cutting, aspirators, godets (rotating rolls that transport, stretch or thermally treat yarns), heating system and different kind of sensors, etc. In addition, friction drives are the most common type but also tension-controlled and surface speed-controlled machines have been manufactured.

6. Advantageous and Superior Properties of Labfil Machine

In the previous sections, information about the basic technical features and units of lab-type machines were given. In addition, the technical properties of all lab-type machines were presented in Table-1 (Section-4).

Studies of design and developing LabFil machine (Optimal selection of machine sizes, determination of machine units, etc.) has been carried out in detail. The superior features of the LabFil machine compared to other lab-type machines were given below.

- Many different raw materials can be used in LabFil machine. In this way, R&D

studies can be carried out with various raw materials on LabFil machine.

- If the L/D ratio is high, a good and homogeneity polymer mixing can be done. Hence, L/D value must be 27 or more. L/D ratio of LabFil is 27.
- Textured yarn is an important type of synthetic yarn imitating natural fibers. LabFil machine has hot air texturizing unit and high-quality textured yarns can be produced on this machine. Hence, R&D studies about these yarns can be done successfully.
- The LabFil machine has many godets. In this way, various types of filament yarns (MOY, POY, FOY, HOY, Textured yarns, etc.) can be produced on Lab-Fil machine.
- LabFil machine has lots of advantages about machine sizing such as low volume and optimum working surface.
- LabFil machine has been developed and manufactured with university-industry cooperation. This project has been provided a significant contribution to science and technology. In addition, lots of R&D studies are still carried out on this machine.

LabFil machine has advantageous features. Thus, various R&D and P&D studies can be done on this machine.

Another important issue is that the basic structural and mechanical properties of these filament yarns produced by using these machines should be similar to the first quality yarns produced in the industry because the results of scientific studies should be acceptable.

Research and publication ethics were complied with in this study.

7. Conclusions

Lab-type filament yarn production machines have lots of advantages such as low volume and optimum working surface, easily changeable production parameters, etc. In this way, many scientific studies can be carried out by using these type machines. These scientific studies are generally carried out about polymer science, filament yarn production and properties, and nanotechnology. Thus, the using of lab-type machines is important for the developing innovative products and production processes.

The doctoral thesis is named "Design and Manufacture of Laboratory Type Filament Yarn Machine and Development of Original Product" has been the source of this paper. In this doctorate thesis, a lab-type filament production machine (LabFil) was developed a newly design and then various functional yarns (flat filament and textured yarn) were produced by using LabFil. Information about this machine is also given in this paper. In addition, such lab-type machines have

been researched around the world and the technical properties and production parameters of all these machines were given in this paper. In this study, information about the important units of lab-type filament drawing machines was also presented and an extensive literature was given. The aim of this study is contributed to the researchers in this field.

Acknowledge

This work was financial supported by the “Turkey Ministry of Science, Industry and Technology” within the research program called SAN-TEZ, Project Number: 00428.STZ.2009-2.

References

- Abbasi, M., Mojtahedi, M. R. M., & Khosroshahi, A. (2007). Effect of spinning speed on the structure and physical properties of filament yarns produced from used PET bottles, *Journal of Applied Polymer Science*, 103, Issue 6, pp. 3972-3975. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.25369>.
- Ahmed, S. I., Shamey, R., Christie, R. M., & Mather, R. R. (2006). Comparison of the performance of selected powder and masterbatch pigments on mechanical properties of mass coloured polypropylene filaments, *Coloration Technology*, 122(5), 282-288. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2006.00042.x>
- Arslan, Z. (2016). *Investigation of process parameters affecting quality of polyamide 6 POY and textured yarn production*, (MSc. Thesis), Namık Kemal University Institute of Natural and Applied Sciences, Tekirdağ/Turkey.
- Babaarslan, O., & Özkan Hacıoğulları, S. (2013). Effect of fibre cross-sectional shape on the properties of POY continuous filaments yarns, *Fibers and Polymers*, 14(1), 146-151. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12221-013-0146-z>.
- Bagheri, G., Tavanai, H., Ghiaci, M., Morshed, M., & Shamsabadi, A.S. (2019). An investigation on the effect of pigments on the texture-ability and mechanical properties of polypropylene BCF yarns, *Journal of the Textile Institute*, 111(9), 1308-1317. Doi:10.1080/00405000.2019.1694824.
- Bansal, S., & Raichurkar, P. (2016). Review on the manufacturing processes of polyester-PET and nylon-6 filament yarn, *International Journal on Textile Engineering and Processes*, 2(3), 23-28.
- Bhattacharya, S. S., & Chaudhari, S. B. (2015). Study on structural and thermal properties of polypropylene silica nanocomposite filaments, *International Journal of Textile and Fashion Technology (IJTFT)*, 5(1), 15-22.
- Bourbigot, S., & Devaux, E. (2002). Flammability of polyamide-6/clay hybrid na-

nanocomposite textiles, *Polymer Degradation and Stability*, 75(2), 397-402.
Doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00245-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00245-2).

Busschaert Engineering. (2022). Spinboy Machines. Retrieved from: <http://www.busschaert-eng.be/English/HomeEnglish.htm>.

Castiglioni, M. (2008). Control and stability in velocity of individually driven drawing godets for thermoplastic filament yarns (PhD Thesis), ETH Zurich, Switzerland.

ChinaFiber XinLun Co., Ltd. (2022). Spinning Tester Equipment for Laboratory and University College, Melt Spinning Machine Trial Production Line, Pilot Plant for Melt Spinning. Retrieved from: <http://www.chinafiber.com/tester/>.

Chiu, C-W., Lin, C-A., & Hong, P-D. (2011). Melt-Spinning and thermal stability behavior of TiO₂ nanoparticle/polypropylene nanocomposite fibers, *Journal of Polymer Research*, 18(3), 367-372. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10965-010-9426-0>.

Chung, C. I. (2020). Extrusion of Polymers Theory & Practice 3rd Edition, Munich: Hanser Gardner.

Çelen, O., & Koçer, H. B. (2022). The effect of cross section on poly (L -Lactic Acid) filament yarn properties, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 27(1), 375-388. Doi: <https://doi.org/10.17482/uumfd.1017015>.

Çirkin, S. (2006). Effect of the texturing variables on the yarn properties during false-twist texturing process (MSc Thesis), Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana.

Dabrowska, I., Fambri, L., Pegoretti, A., Slouf, M., Vackova, T., & Kolarik, J. (2015). Spinning, drawing and physical properties of polypropylene nanocomposite fibers with fumed nanosilica, *eXPRESS Polymer Letters*, 9(3), 277-290. Doi: 10.3144/expresspolymlett.2015.25.

Dulmalik, A Chafidz, R Fernandi, & Ardianto. (2019). Partially Oriented Yarn (POY) produced from semi-dull via melting spun using an extruder: Effect of die extruder temperature on elongation of the POY, *Journal of Physics: Conference Series*, 1295, The 3rd International Conference of Chemical and Materials Engineering, Semarang, Indonesia.

Engelhardt, A. W. (2021). Global development of spun and filament yarns, The Fiber Year 2021 Report.

Erdem, N., A. Cireli, A., & Erdogan, U. H. (2009). Flame retardancy behaviors and structural properties of polypropylene/nano-SiO₂ composite textile fila-

- ments, *Journal of Applied Polymer Science*, 111(4), 2085-2091. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.29052>.
- Feldman, D. (2008). Polymer History, *Designed Monomers and Polymers*, 11(1), 1-15. Doi: <https://doi.org/10.1163/156855508X292383>.
- Fiber Extrusion Research&Pilot Machines for Homo&Bicomponent Laboratory Applications. (2022). Retrieved from: <http://www.hillsinc.net/assets/pdfs/pilot-equipment.pdf>.
- Fourné Maschinenbau. (2022). Fourné Laboratory and Pilot Melt Spintester. Retrieved from: <https://fournemaschinenbau.de/en/pilot-schmelzspintester-2/>.
- Gajjar, C. R., Stallrich, J. W., Pasquinelli, M. A., & King, M. W. (2021). Process-property relationships for melt-spun poly(lactic acid) yarn, *ACS Omega*, 6, 15920-15928. Doi: 10.1021/acsomega.1c01557.
- GM Gülnar. (2023). Laboratory Type Textile Machines Spintech. Retrieved from: <https://www.gulnarmakina.com/eng/urunler.aspx?kat=1>.
- Guangzhou Guanxin Machinery Limited. (2022). What Is L/D ratio in injection moulding machine. Retrieved from: <https://guanxin-machinery.com/what-is-l-d-ratio-in-injection-moulding-machine>.
- Gupta, V.B., Mondal, S.A., & Bhuvanesh, Y.C. (1997). Spinning speed-throughput rate relationships for polyester, nylon, and polypropylene fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 65(9), 1773-1788. Doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970829\)65:9<1773::AID-APP14>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970829)65:9<1773::AID-APP14>3.0.CO;2-O).
- Hacıoğulları Özkan. S. (2014). *Design and manufacture of laboratory type filament yarn machine and development of original product* (PhD Thesis). Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, Turkey. Retrieved from: <http://libra.cu.edu.tr/libra.aspx?IS=DETAY&KN=9994>.
- Hacıoğulları Özkan S. & Babaarslan, O. (2014). Structural analysis and mechanical properties of polypropylene filament yarns containing flame retardant additive, *15th Romanian Textiles and Leather Conference-CORTEP-2014*, 25-30, Poiana Braşov, Romania.
- Hacıoğulları Özkan S. & Babaarslan, O. (2015). Design, manufacturing of a new laboratory type filament yarn drawing machine and featured yarn development studies, *Marmara Journal of Pure and Applied Sciences, Special Issue-1*, 27(5), 53-57. Doi: <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1136513>
- Hacıoğulları Özkan, S. & Babaarslan, O. (2018). An investigation on the properties of polyester textured yarns produced with different fiber cross-sectional shapes, *Industria Textila*, 69(4), 270-276. Doi: <http://doi.org/10.35530/IT.069.04.1281>.

- Heuvel, H. M. and Huisman, R. J. (1978). Effect of winding speed on the physical structure of as-spun poly(ethylene terephthalate) fibers, *Including Orientational-Induced Crystallization*, 22(8), 2229-2243. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.1978.070220815>.
- Ho, Y. S., Kim, H. Y., Jin, F. L., & Park, S. J. (2010). Effects of spinning conditions on properties of polyester yarn prepared using an ultra-high-speed melt spinning technique equipped with a steam chamber", *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 31(11), 3252-3258. Doi: <https://doi.org/10.5012/bkcs.2010.31.11.3252>.
- Hojiyev, R., & Ulcay, Y. (2021). Polyester yarns reinforced by nanoclays, *Polymer Science Series A*, 63(3), 318-333. Doi:10.1134/S0965545X21030068
- Hufenus, R. (2011). Fiber Development by Multicomponent Melt-Spinning, 11th World Textile Conference AUTEX, 8-10 June 2011h, Mulhouse/France.
- Hufenus, R., Yan, Y., Dauner, M., and Kikutani, T. (2020). Melt-Spun fibers for textile applications, *Materials*, 13(4298), 2-32. Doi: 10.3390/ma13194298.
- Kalantari, B., Rahbar, R. S., Mojtahedi, M. R. M., Shoushtari, S. A. M., & Khosroshahi, A. (2007). Production and characterization of polypropylene fiber upon addition of selective peroxide during melt spinning and comparison with conventional polypropylene fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 105(4), 2287-2293. Doi: 10.1002/app.26255.
- Kara, Ş., Erdoğan, Ü. H., & Erdem, N. (2012). Effect of polypropylene fiber cross sectional shapes on some structural/mechanical fiber properties and compressibility behaviour of plain knitted fabrics, *Fibers and Polymers*, 13(6), 790-794. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12221-012-0790-8>.
- Kara, Ş., Üreyen, M. E., & Erdogan, U. H. (2016). Structural and antibacterial properties of PP/CuO composite filaments having different cross sectional shapes, *International Polymer Processing XXXI*, 31(4), 398-409. Doi: <https://doi.org/10.3139/217.3159>.
- Karaca, E., & Özçelik, F. (2007). Influence of the cross-sectional shape on the structure and properties of polyester fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 103(4), 2615-2621. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.25350>.
- Kebabçı, M., Babaarslan, O., Hacıoğulları Özkan, S., & Telli, A. (2015). The effect of drawing ratio and cross-sectional shapes on the properties of polypropylene CF and BCF yarns, *Journal of Textiles and Engineer*, 22(100), 47-53. Doi: <http://dx.doi.org/10.7216/1300759920152210006>
- Kılıç, A., Jones, K., Shim, E., & Pourdeyhimi, B. (2016). Surface crystallinity of meltspun isotactic polypropylene filaments, *Macromolecular Research*, 24(1), 25-30. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-016-4011-y>.

- Kim, S. L. (1986). Effects of spinning speed and quench air temperature on the characteristics of melt spun poly(ethylene terephthalate) yarn, *Textile Research Journal*, 56(11), 697-704. Doi: <https://doi.org/10.1177/004051758605601108>.
- Kim, N. K., Lin, R. J. T., & Bhattacharyya, D. (2017). Flammability and mechanical behaviour of polypropylene composites filled with cellulose and protein based fibres: A comparative study, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 100, 215-226. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.05.017>.
- Kotek R., Afshari M., Avci H., & Najafi M. (2017). Production of Polyolefins, United States: Woodhead Publishing, Elsevier.
- Kothari, V.K. (2000). *Progress in Textiles: Science and Technology*, New Delhi/India: Hardbound, IAFL Publications.
- Kretzschmar, S. D., & Furter, R. (2009). *Process Optimization in a Filament Yarn Plant*, *Pakistan Textile Journal*, Uster Technologies AG., Uster, Switzerland.
- Lewandowski, A., & Wilczynski, K. (2022). Modeling of Twin Screw Extrusion of Polymeric Materials, *Polymers*, 14(274), 2-28.
- Lohia Corp Limited. (2022). Multifilament Spin-Draw-Wind Lines Document. Retrieved from: <https://www.lohiagroup.com/baby-lofil>.
- Maqsood, M., Langensiepen, F., & Seide, G. (2020). Investigation of melt spinnability of plasticized polylactic acid biocomposites-containing intumescent flame retardant, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(1), 305-318. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08405-3>.
- Misra, F.-M., S., Spruiell, Lu, J., & Richeson, E. G. C. (1995). Influence of molecular weight distribution on the structure and properties of melt-spun polypropylene filaments, *Journal of Applied Polymer Science*, 56(13), 1761-1779. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.1995.070561307>.
- Morgan, P. W. (2006). Brief history of fibers from synthetic polymers, *Journal of Macromolecular Science: Part A-Chemistry*, 15(6), 1113-1131. Doi: <https://doi.org/10.1080/00222338108066456>.
- Mylläri, V. (2010). *Production of filament yarns made of PEEK* (Master of Science Thesis). Tampere University of Technology, Finland.
- Nakajima, T. (2000). Advanced fiber spinning technology. Wiltshire, England: Woodhead Publishing.
- Ni, H., Li, Y., and Chen, Z. (2020). Study on preparation and properties of luminescent polyamide fiber doped with graphene, *6th Annual International Work-*

- shop on Materials Science and Engineering: Journal of Physics Conference Series*, 1-7, Jinan, Shandong, China. Doi: 10.1088/1742-6596/1622/1/012038.
- Özkan, S. (2008). *The effect of filament cross sectional shape, number and linear density on POY and textured yarn properties*, (Msc. Thesis), Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana/Turkey.
- Pal, S.K., Gandhi, R.S., & Kothari, V.K. (1996). Draw-Texturing of microfiber polyester yarn, *Textile Research Journal*, 66(12), 770-776. Doi: <https://doi.org/10.1177/004051759606601205>
- Pelzer, M., Vad, T., Becker, A., Gries, T., Markova, S., & Teplyakov, V. (2021). Melt spinning and characterization of hollow fibers from poly(4-methyl-1-pentene), *Journal of Applied Polymer Science*, 138(1), 1-12. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.49630>
- Raichurkar, P., & Ramachandran, M. (2015). Recent trends and developments in textile industry in India, *International Journal on Textile Engineering & Processes*, 1(4), 47-49.
- Ramirez, M. I., Bashir, S., Luo, Z., & Liu, J.L. (2009). Green synthesis and characterization of polymer-stabilized silver nanoparticles, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 73(2), 185-191. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.col-surf.2009.05.015>.
- Rangasamy, L., Shim, E., & Pourdeyhimi, B. (2011). Structure and tensile properties of nanoclay-polypropylene fibers produced by melt spinning, *Journal of Applied Polymer Science*, 121(1), 410-419. Doi: 10.1002/app.33619.
- Ruckdashel, R., & Shim, E. (2020). Effects of melt spinning parameters on polypropylene hollow fiber formation, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1-11. Doi: <https://doi.org/10.1177/1558925019899680>.
- Salem, D. R. (1992). Development of crystalline order during hot-drawing of poly(Ethylene Terephthalate) film: Influence of strain rate, *Polymer*, 33(15), 3182-3188. Doi: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90232-L](https://doi.org/10.1016/0032-3861(92)90232-L).
- Salem, D. R. (2001). *Structure formation in polymeric fibers: Structure formation during melt spinning*. Princeton, USA: Hanser Gardner Publication.
- Shin, K.I., Kim, S.H., & Kim, I-J. (2005). Image analysis of the luster of fabrics with modified cross-section fibers, *Fibers and Polymers*, 6(1), 82-88. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02875578>.
- Shumpert, B. B., Padsalgikar, A. D., Ellison, M. S., Hosangadi, G. S., & Henshaw, I. (1996). Gear pump performance in polypropylene filament yarn uniformity, *International Polymer Processing*, 11(4), 347-351. Doi: <https://doi.org/10.3139/217.960347>.

- SML Maschinengesellschaft mbH. (2022). Line Types, Austrofil®. Retrieved from: <https://www.sml.at/multifilament-lines/austrofil-fdy-mdy-poy#austrofil-ht-2x2-4-e-75>.
- Subasinghe, A., Somashekar, A. A., & Bhattacharyya, D. (2018). Effects of wool fibre and other additives on the flammability and mechanical performance of polypropylene/kenaf composites, *Composites Part B: Engineering*, 136(1), 168-176. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.034>.
- Şahin, R. (2018). Investigation of the dyeability properties of polypropylene non-woven surfaces with amorf silic", (MSc. Thesis), *Erciyes University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Kayseri/Turkey.
- Şen, S. C. (2015). *Synthesis of polymer films at different ratios by using twin screw extruder and investigation of their biodegradability under controlled composting conditions*, (MSc. Thesis). Hacettepe University Graduate School of Science and Engineering, Ankara/Turkey.
- Tavanai, H., Morshed, M., & Hosseini, S. M. (2003). Effects of On-line melt blending of polypropylene with polyamide 6 on the bulk and strength of the resulting BCF yarn, *Iranian Polymer Journal*, 12(5), 421-430.
- Turukmane, R., Gulhane, S. S., & Kakde, M. V. (2020). Effect of take-up speed on the final performance of fully drawn yarn (FDY), *Man-Made Textiles in India*, 48(1), 12-14.
- Turukmane, R., Shinde, S., Gulhane, S., & Gupta, K. K. (2021). Effect of spinneret shapes on the properties of polyester filament, *Chemical Fibers International*, 71(3), 130-131.
- Vahabi, H., Laoutid, F., Formela, K., Saeb, M. R., & Dubois, P. (2022). Flame-Retardant polymer materials developed by reactive extrusion: Present status and future perspectives, *Polymer Reviews*, 62, 919-949. Doi: <https://doi.org/10.1080/15583724.2022.2052897>.
- Varma, D. S., & Cameotra, S. S. (1973). Effect of draw ratio on moisture sorption, dyeability, and mechanical properties of cold-drawn nylon 6 filament, *Textile Research Journal*, 43(12), 745-747. Doi: <https://doi.org/10.1177/004051757304301210>.
- Varshney, R. K., Kothari, V. K., & Dhamija, S. (2011). Influence of polyester fibre fineness and cross-sectional shape on low-stress characteristics of fabrics, *Journal of the Textile Institute*, 102(1), 31-40. Doi: <https://doi.org/10.1080/00405000903453661>.
- Varshney, R. K., Kothari, V. K., & Dhamija, S. (2014). Influence of polyester fibre shape and size on the hairiness and some mechanical properties of yarns, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 39, 24-32.

- Viková, M., Periyasamy, A. P., Vik, M. and Ujhelyiová, A. (2017). Effect of drawing ratio on difference in optical density and mechanical properties of mass colored photochromic polypropylene filaments, *The Journal of The Textile Institute*, 108(8), 1365-1370. Doi: <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1251290>.
- Viková, M., Sakurai, S., Periyasamy, A. P., Yasunaga, H., Pechočiaková, M., & Ujhelyiová, A. (2021). Differential scanning calorimetry/small-angle X-ray scattering analysis of ultraviolet sensible polypropylene filaments, *Textile Research Journal*, 92(17-18), 3142-3153. Doi: <https://doi.org/10.1177/00405175211053394>.
- Vogel, R., Hatzikiriakos, S. G., Brüning, H., Tändler, B., & Golzar, M. (2003). Improved spinnability of metallocene polyethylenes by using processing aids, *International Polymer Processing XVIII*, 18(1), 67-74. Doi: <https://doi.org/10.3139/217.1722>.
- Yıldırım, K. (2007). Determination of Degree of Production Parameters Influences to the Crystallinity Ratio on the PET Yarn (PhD Thesis), *Uludağ University Graduate School of Natural and Applied Science*, Bursa/Turkey.
- Younes, B., Fotheringham, A., El-Dessouky, H., & Haddad, G. (2011). Factorial optimization of the effects of melt-spinning conditions on as-spun aliphatic-aromatic copolyester fibers I. spin draw ratio, overall orientation and drawability, *International Journal of Polymeric Materials*, 60(5), 316-339. Doi: <https://doi.org/10.1080/00914037.2010.531804>.
- Yuan, X., Mak, A. F. T., Kwok, K. W., Yung, B. K. O., & Yao, K. (2001). Characterization of poly(L-lactic acid) fibers produced by melt spinning, *Journal of Applied Polymer Science*, 81, 251-260. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.1436>.
- 8.5" Wide Wayne Lab Sheet Roll Stack. (2022). Retrieved from: <https://www.arlingtonmachinery.com/product-detail/18478/85quot-wide-wayne-lab-sheet-roll-stack/>.



TERSANELERDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİNİN GÖSTERGELER ÜZERİNDEN İRDELENMESİ

Tuncay AYVAZ^{1*}, Osman Alpaslan ERGÖR²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği ABD, İzmir,
ORCID No : 0000-0002-5421-0041

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Dahili Tıp Bilimleri Bölümü, İzmir,
ORCID No : 0000-0002-8654-4994

Anahtar kelimeler

Öz

Tersane, gemi inşa, bakım ve onarım, iş sağlığı ve güvenliği, risk yönetimi, öncül gösterge, ardıl gösterge, uyum göstergeleri, iş kazası, meslek hastalığı

İnşaat sektöründe yer alan iş yerleri, iş kazalarının en sık gerçekleştiği iş yerleri olmaları ve gerçekleşen iş kazalarının telafisi güç sonuçlar doğurmaları nedeniyle, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) mevzuatında “çok tehlikeli” iş yerleri olarak kodlanmışlardır. Kara yapıları sabit zemine atılan bir temel üzerine inşa ediliyorken, yüzer unsurların hareketli bir zemin üzerinde ve temelsiz bir yapılanmayı gerektirmesi, gemi sanayisini inşaat sektörünün özel bir alanı haline getirmektedir. Gemi inşa, bakım ve onarım faaliyetlerinin yürütüldüğü ve bu bakımdan gemi sanayisinin ana omurgasını oluşturan tersaneler, yürütülen faaliyetlerden dolayı insan ve çevre sağlığına yönelik “kabul edilemez riskler” barındırması nedeniyle, İSG disiplini açısından irdelenmesi kritik öneme haiz olan iş yerleridirler. Bu çalışmada, tersanelerde İSG uygulamalarının tanımlanan göstergeler üzerinden irdelenmesi, olası İSG uygunsuzluklarına yönelik alınması

¹ Sorumlu yazar; e-posta: tuncay.ayavaz@ogr.deu.edu.tr
doi : [muhendismakina.1319144](https://doi.org/10.1501/1319144)

gereken tedbirlere referans olunması ve bu suretle iş kazası ve meslek hastalıklarının önlenmesine yönelik bir süreç kılavuzu oluşturulmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için çalışmada; doküman analizi yöntemi uygulanmış, veri toplama işlemi "gözlem" ve "literatür taraması" şeklinde gerçekleştirilmiştir. İSG disiplininde bir ilk olacak şekilde öncül, uyum ve ardıl göstergeler tanımlanmak suretiyle, tersanelerdeki iş süreçleri, bu göstergeler eşliğinde entegre bir şekilde irdelenmiştir.

EXAMINATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN SHIPYARDS BASED ON INDICATORS

Keywords

Shipyards, shipbuilding, maintenance and repair, occupational health and safety, risk management, leading indicator, compliance indicators, lagging indicator, work accident, occupational disease

Abstract

Workplaces in the construction industry are coded as "very dangerous" workplaces in the OHS legislation, as they are the workplaces where work accidents occur most frequently and work accidents cause irreparable results. While land structures are built on a foundation laid on a fixed ground, the fact that floating elements require a structuring on a movable ground and without a foundation makes the ship industry a special area of the construction sector. Shipyards, where shipbuilding, maintenance and repair activities are carried out, and in this respect, which form the main backbone of the ship industry, are workplaces that are critically important to examine in terms of occupational health and safety discipline, since they contain "unacceptable risks" for human and environmental health due to the activities carried out. In this study, it is aimed to examine the occupational health and safety practices in shipyards through the defined indicators, to refer to the measures to be taken for possible occupational health and safety non-compliances, and thus to contribute to the creation of a process guide for the prevention of work accidents and occupational diseases. In order to achieve this aim, in the study; the document analysis method was applied and the data collection process was carried out in the form of "observation" and "literature review". As a first in the occupational health and safety discipline, the business processes in the shipyards were analyzed in an integrated way, by defining the leading, compliance and lagging indicators.?

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 24.11.2022

Kabul Tarihi : 15.02.2023

Research Article

Submission Date : 24.11.2022

Accepted Date : 15.02.2023

Extended Abstract

Examination of Occupational Health and Safety in Shipyards Based on Indicators

Introduction: Activities for the construction, maintenance and repair of ships are carried out in the shipyards. When the statistics are examined; It is observed that the problems regarding the follow-up, detection, recording and notification of work accidents and occupational diseases that occur in Turkey still continue and work accidents and occupational diseases are still not under control. In the literature, it is observed that the effectiveness of occupational health and safety (OHS) practices in the workplaces is tried to be measured only with statistical data based on the number of work accidents and/or occupational diseases. Considering the misleading share of statistics created from data that do not fully reflect the truth, this situation emerges as a problematic point of view in terms of raising safety awareness for preventive measures in workplaces. In this study; leading, compliance and lagging indicators were emphasized in a way that would allow the devices of OHS practices in workplaces. Thus; It is considered that it will be possible to reveal the effectiveness of OHS practices in a healthier way by considering, monitoring and examining OHS practices over these indicators.

Purpose of the Study

In this study, it is aimed to examination of OHS practices in shipyards over defined indicators, referencing the measures to be taken for possible OHS non-compliances and thus contributing to the creation of a process guide for the prevention of work accidents and occupational diseases. In order to achieve this aim, in the study; as a first in the OHS discipline, the business processes in the shipyards were analyzed in an integrated manner with these indicators, by defining leading, compliance and lagging indicators.

Scope and Method of the Study: Although the current study has been handled specifically for shipyards, which are critical workplaces in terms of OHS, it is certain that it will also include inputs that will form the infrastructure of a model that can be applied in all workplaces subject to OHS legislation. Data collection process in the study was carried out by "observation" and "literature review". Descriptive research method based on comprehensive literature review was used in the analysis of the data, and document analysis method was used in the analysis of the sources and the evaluation of the obtained data.

General Operation of Shipyards: Activities in different branches are carried out within the shipyards, which are intertwined with heavy industry on a sectoral basis. This situation requires that all these activities in shipyards be carried out with an understanding of communication, coordination and cooperation. In the present study, the general organization of the shipyards and the activities carried out are defined under the headings of "boat-deck", "machinery" and "electrical-electronic-automation".

OHS in Shipyards

There are difficult working conditions in which dangerous materials are used in shipyards and a serious manpower is needed for this. In this respect, shipyard processes involve a wide variety of activities with high risks in terms of OHS. In order to have more detailed information about the risk factors within the scope of OHS in shipyards, it would be useful

to take a special look at critical processes that pose high risk. OHS practices carried out in accordance with national and international legislation should be handled with an OHS organization in which critical activities that pose a high risk in shipyards are defined and all actors are involved in the process with an understanding of effective communication, coordination and cooperation.

OHS Indicators

Leading and lagging indicators are tools used to evaluate the strengths and weaknesses that arise with the implementation of a system and to determine the performance of the system. Compliance indicators, which we recommend for the OHS discipline in the study, are among the other two types of indicators. These indicators provide information about the current situation with a real-time functionality. In the current study, shipyard processes are examined by matching the pre-hazard situation with the leading indicators, the post-hazard - pre-risk situation compliance indicators, and the post-risk situation with the lagging indicators. In this direction, the indicators in terms of OHS in shipyards are suggested as follows: Leading Indicators: OHS Policy, Communication-Coordination-Cooperation, OHS System, Risk Management, Preventive Measures, OHS Trainings, Emergency Management, Explosion Protection Plan, Working Hours, Location and Placement, Professional Competence, Employment Contracts, Unionization, Periodic Maintenance System. Compliance Indicators: OHS Board, Employee Health, Suitability for Work, Environmental Surveillance (Inspection), Corrective Action Implementation, Special Processes, Work Permit and Work Plan, Work Intensity, Incentive and Reward System, OHS Equipment. Secondary Delayed Indicators: Near Miss, Occupational Accident, Occupational Disease, Incapacity for Work, Environmental Damages, Loss of Production, Criminal Disciplinary Processes, Loss of Image / Reputation, Social Protection Expenditures, Loss of Earning Power in the Profession, Lawsuits and Compensation.

Conclusion: In this study; It has been shown that OHS indicators can be defined in the form of leadings, compliance and lagging indicators. Thus, it will be possible to examine the activities carried out in the workplaces in the light of these indicators. In addition, with the risk assessment to be made by focusing on the leading and compliance indicators, and the preventive actions to be taken accordingly, the undesirable lagging indicators will be minimized.

1. Giriş

Tersanelerde gemilerin inşası ile bakım ve onarımlarına yönelik faaliyetler yerine getirilmektedir (National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2020). Bu faaliyetler kapsamında gerçekleştirilen özellikle taşıma, kaldırma, depolama, kazıma, boyama, kesme, bükme, kaynak, montaj, taşlama ve elektrik işleri, iş kazaları açısından yüksek potansiyel tehlike taşıyan işler olarak ön plana çıkmaktadır (Akın, Eren, Oral ve Heperkan, 2020; Adalı, 2010).

Türkiye’de tersanelerde hemen hemen tüm projelerde işin önemli bir kısmı alt işverenlere (taşeron) verilmektedir. Bu nedenle tersanelerdeki çalışanların farklı iş yerlerinin çalışanları olması iletişim, koordinasyon ve iş birliği sorunlarını karmaşık hale getirmekte ve ortaya çıkan bu sorunların çözülememesi durumunda çalışanların, işlerin ve tersanelerin sağlık ve güvenliği olumsuz yönde etkilebilmektedir (Barlas, 2012; A. İ. Yılmaz, F. Yılmaz ve Çelebi, 2015; Karadeniz, 2012). Bu durum aynı zamanda sendikalaşmanın ve dolayısıyla tersanelerdeki çalışma koşullarının iyileştirilmesine katkı sağlanmasının önünde kritik bir engel oluşturmaktadır (Tutar, S. Nam ve D. Nam, 2019).

Bilindiği üzere iş sağlığı ve güvenliği (İSG) disiplini, Türkiye’de özellikle gemi sanayisinde yaşanan iş kazalarının da etkisiyle, 2012 yılından itibaren müstakil bir kanun olarak organize edildi ve halihazırda alt mevzuatı ile beraber tüm çalışanları da kapsayacak şekilde uygulanmasına devam edilmektedir. Özellikle 2008 yılında “Gemi İnşa Sanayisindeki İş Güvenliği ve Çalışma Şartları Sorunlarının Araştırılarak Alınması Gereken Önlemlerin Belirlenmesi” amacıyla kurulan Meclis Araştırması Komisyonu’nun hazırladığı Tuzla Raporu” (TBMM, 2008) ile 2009 yılında “Cumhurbaşkanlığı Devlet Denetleme Kurulu’ nun Hazırladığı Tersanecilik Sektörü ile İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Tuzla Tersaneler Bölgesinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi Hakkında Araştırma ve İnceleme Raporu” (Cumhurbaşkanlığı Devlet Denetleme Kurulu, 2009), Türkiye’de İSG disiplininin müstakil bir kanun olarak organize edilmesinde belirleyici rol oynamıştır. Bahse konu raporlarda tersanelerdeki kurumsallaşma, alan darlığı ve yoğunluk, kapasite kullanımı, mevzuat, alt yapı sorunları, alt işveren uygulaması, yetmişmiş işgücü, çalışma saatleri, eğitim, güvenlik kültürü, kişisel koruyucu donanımlar, sendikal sorunlar, çevre, teknolojik altyapı, barınma yerleri ve sosyal tesisler, sağlık birimleri ve hizmetleri ile İSG hizmetleri gibi konulardaki tespitlere yer verilmiştir. Yine tersanelerde İSG kapsamındaki önlemlerin etkin bir şekilde yerine getirilmesinde, iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesinde, üretim ve verimliliğin artırılmasında katkı sağlayacağı değerlendirilen yapısal sorunlara, çalışma koşulları ve organizasyona, sendikalaşmaya, barınma ve sosyal tesislere, eğitime, itfaiye teşkilatına ve hastane kurulmasına yönelik çözüm önerileri getirilmiştir.

Bu bağlamda, Türkiye’de İSG disiplininin müstakil bir kanun olarak organize edilmesi ile oluşan mevcut durumu izlenebilir ve önenebilir bir bakış açısıyla

irdelenerek etkinliğinin ortaya konulması ve sürekli gözden geçirilmesi de önem arz eden bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle tersanelerin üst seviyede iletişim, koordinasyon ve iş birliği gerektiren karmaşık süreçler içermesi ve bu bakımdan zaman zaman ciddi yaralanmalı hatta ölümlü iş kazalarının ve meslek hastalığı risklerinin söz konusu olduğu “çok tehlikeli” iş yerleri olması, İSG uygulamalarının etkinliğinin tersaneler üzerinden irdelenmesine uygun bir arka plan oluşturmaktadır.

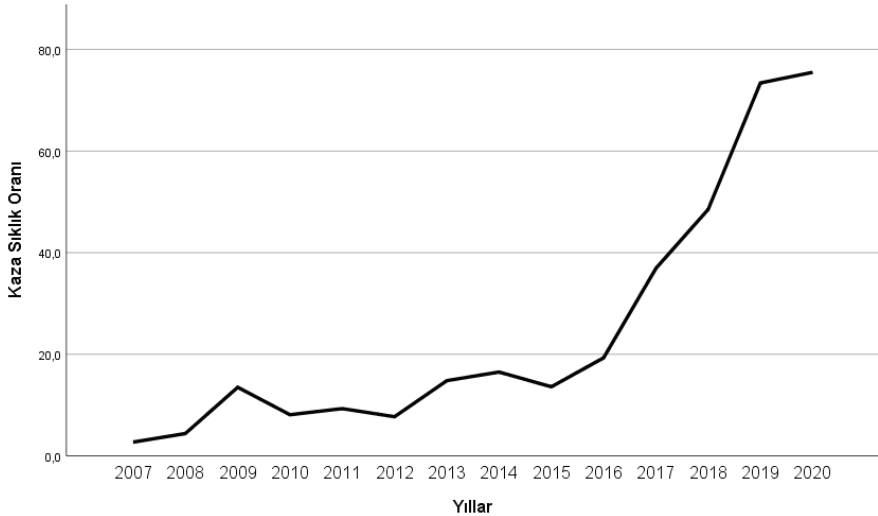
Türkiye’ de iş kazaları ve meslek hastalıklarının tespiti ve bildirimine yönelik sorunların halen devam ettiği dikkate alındığında; İSG uygulamalarının etkinliğinin sadece bildirilen iş kazaları ve meslek hastalıkları üzerinden ele alınmasının yeterli olmayacağı, bu anlamda “Kaza Sıklık Oranı” ve “Kaza Ağırlık Oranı” gibi çalışan sayısı ve/ veya iş göremezlik gün sayısı gibi bağlantılı parametrelerin irdelenmesinin de önemli olduğu değerlendirilmektedir. Bu kapsamda Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) (SGK, 2022) ile Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı istatistiklerinden (İstanbul ve Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz Bölgeleri Deniz Ticaret Odası, 2021) yola çıkarak; gemi inşa sanayisinde 2007-2012 yılları arasında gerçekleşen iş kazalarına ait derlenen istatistikler Tablo 1’ de, 2013-2020 yılları arasında gerçekleşen iş kazalarına ait derlenen istatistikler Tablo 2’ de; gemi inşa sanayisinde kaza sıklık oranının 2007-2020 yılları arasındaki dağılımı Şekil 1’ de, kaza ağırlık oranının 2013-2020 yılları arasındaki dağılımı Şekil 2’ de, kaza ağırlık oranı ile kaza sıklık oranının 2013-2020 yılları arasındaki kıyaslamalı dağılımı Şekil 3’ te belirtilmiştir.

Tablo 1. 2007-2012 Yılları Arasında Türkiye’ de Gemi Sanayisinde Gerçekleşen İş Kazalarına Ait İstatistikler

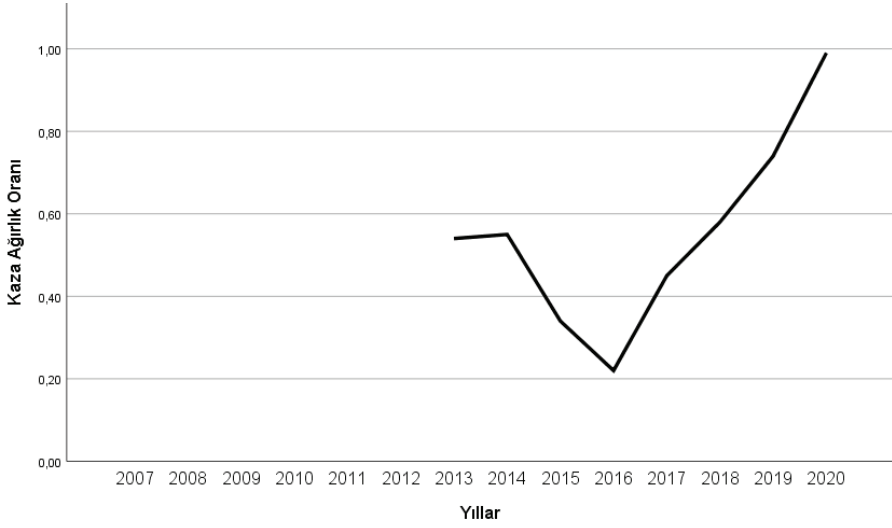
Yıl	Kaza Sayısı	Kayıp Gün Sayısı	Ölüm	Gemi İnşa Üretim Tesisleri/ Tersanelerin İstihdam Durumu (kişi), (İstanbul ve Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz Bölgeleri Deniz Ticaret Odası, 2021)	Kazalardan Dolayı Oluşan Sürekli İş Göremezlik Gün Sayısı	Kaza Sıklık Oranı (1.000.000 iş saatine karşılık düşen kaza sayısı)	Kaza Ağırlık Oranı (1.000 iş günü başına oluşan kayıp gün sayısı)
2007	227	-	12	33.480	-	2,7	-
2008	293	-	28	26.910	-	4,4	-
2009	658	-	15	19.719	-	13,5	-
2010	432	-	11	21.449	-	8,1	-
2011	480	-	3	20.560	-	9,3	-
2012	439	-	8	23.000	-	7,7	-

Tablo 2. 2013-2020 Yılları Arasında Türkiye’de Gemi Sanayisinde Gerçekleşen İş Kazalarına Ait İstatistikler

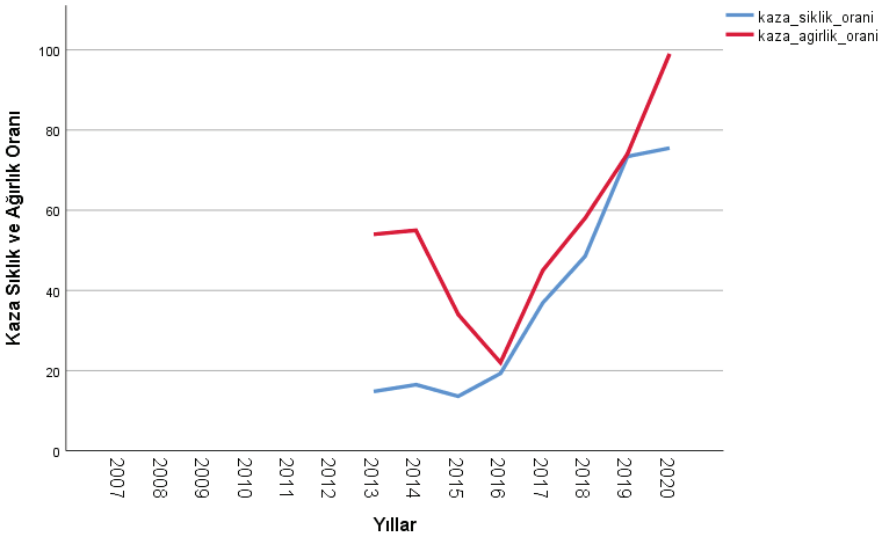
Yıl	Kaza Sayısı	Kayıp Gün Sayısı	Ölüm	Gemi İnşa Üretim Tesisleri/ Tersanelerin İstihdam Durumu (kişi), (İstanbul ve Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz Bölgeleri Deniz Ticaret Odası, 2021)	Kazalardan Dolaylı Oluşan Sürekli İş Göremezlik Gün Sayısı	Kaza Sıklık Oranı (1.000.000 iş saatine karşılık düşen kaza sayısı)	Kaza Ağırlık Oranı (1.000 iş günü başına oluşan kayıp gün sayısı)
2013	848	8.610	3	23.000	-	14,8	0,54
2014	877	6.899	3	21.332	-	16,5	0,55
2015	1.009	10.416	2	29.699	-	13,6	0,34
2016	1.413	16.334	0	29.324	-	19,3	0,22
2017	2.502	23.307	1	27.189	-	36,9	0,45
2018	3.675	14.272	4	30.300	-	48,5	0,58
2019	5.951	37.735	3	32.450	-	73,4	0,74
2020	6.785	43.855	6	36.021	-	75,5	0,99



Şekil 1. Gemi İnşa Sanayisinde Kaza Sıklık Oranının Yıllara Göre Dağılımı (2007-2020)



Şekil 2. Gemi İnşa Sanayisinde Kaza Ağırlık Oranının Yıllara Göre Dağılımı (2013-2020)



Şekil 3. Gemi İnşa Sanayisinde Kaza Ağırlık Oranı İle Kaza Sıklık Oranının Yıllara Göre Kıyaslamalı Dağılımı (2013-2020)

Çalışmada kullanılan “Kaza Sıklık Oranı”, iş yerlerinde çalışılan 1.000.000 iş saatine karşılık kaç adet kazası olduğunu göstermektedir ve bir takvim yılı içeri-

sinde, çalışma sırasında meydana gelen iş kazalarının toplam sayısının, aynı yıl içerisindeki çalışanların çalışma saatlerinin toplamına bölünmesiyle elde edilen değerin 1.000.000 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır.

“Kaza Ağırlık Oranı” ise, her 1.000 çalışma günü başına oluşan kayıp gün sayısını göstermektedir ve bir takvim yılı içerisinde iş kazalarından dolayı oluşan toplam kayıp gün sayısının, aynı yıl içerisinde referans grupta yer alan çalışanların çalışma saatlerinin toplamına bölünmesiyle elde edilen değerin 1.000 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Bu oranın hesaplanması sırasında eğer ölümlü iş kazası veya sürekli iş göremezlik durumu mevcut ise, kazalardan dolayı toplam kayıp gün sayısına, her ölümlü ve/veya sürekli iş göremezlik olayı için ayrı ayrı 7500 gün eklenmesi gerekmektedir.

Bu hesaplamalar yapılırken bir çalışanın yılda (resmi tatiller çıkartılarak) ortalama 250 gün iş yerine geldiği kabul edilmiş, günlük çalışma süresi ise çalışanların iş/ iş yerleri ile illiyet bağı içinde oldukları durumlar (servislerde, iş yeri dışı görevlendirmelerde, öğlen dinlenme aralarında geçen süreler vb.) da dikkate alınarak günde ortalama 10 saat olarak alınmıştır.

Tablo 1 ve Tablo 2’de derlenen istatistikler ile Şekil 1, Şekil-2 ve Şekil-3’teki grafiksel gösterimlerden yola çıkarak; gemi sanayisinde gerçekleşen iş kazalarından dolayı oluşan kayıp gün sayısının 2012 yılından sonra istatistiki veri olarak işlenmeye başlandığı, dolayısı ile 2012 yılına kadar gemi sanayisine yönelik olarak kaza ağırlık oranı tespiti yapılmadığı, 2008 yılından sonra gemi inşa sanayisinde yaşanan daralmanın da etkisiyle istihdam azalmasına rağmen kaza sıklık oranı ile kaza ağırlık oranının her yıl sürekli olarak artış göstermekte olduğu, gemi sanayisinde gerçekleşen iş kazalarının 2012 yılına kadar gemi inşa, bakım veya onarım ayrımı yapılmaksızın tek bir parametre altında raporlandığı, 2012 yılından sonra ise “gemi inşa” ile “gemi bakım ve onarım” şeklinde iki ayrı parametre olarak raporlanmaya başlandığı gözlemlenmektedir. İş sağlığı ve güvenliği disiplininin müstakil bir kanun olarak organize edildiği 2012 yılından sonra, kaza sıklık ve ağırlık oranları önceki yıllara göre sürekli artış gösteriyorsa da; bu durum, 2012 yılından önce de var olan fakat bildirim yapılmadığı için kayıtlara geçmeyen iş kazalarının artık kayıt altına alınmaya başlandığının da bir göstergesi olması ve dolayısıyla 2012 yılından sonra SGK istatistiklerinin daha planlı ve sorumlu bir bakış açısıyla ele alınmaya başlandığını göstermesi bakımından dikkate değerdir (Tutar ve diğ., 2019).

SGK’ nın yıllık olarak yayımladığı sigortalı ve işyeri istatistikleri raporlarında gemi inşa sanayisinde istihdam edilen çalışan sayısı ile gerçekleşen iş kazalarından kaynaklı sürekli iş göremezlik sayılarının açık şekilde yer almaması, gemi sanayisindeki kaza sıklık ve ağırlık verilerinin hesaplanmasında zafiyet oluşturmaktadır. Yine; Deniz Ticaret Odası’ nın her yıl yayımladığı Denizcilik Sektör

Raporu' nda yer alan ve Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı verilerine dayanılarak raporlanan gemi inşa üretim tesisleri/ tersanelerin istihdam durumu istatistiklerinde; Tablo 1 ve Tablo 2'de yer alan 2020 ve önceki yıllarına ait istatistikler (İstanbul ve Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz Bölgeleri Deniz Ticaret Odası, 2021) ile Tablo 3 te yer alan ve 2022 yılında yayımlanan 2021 ve önceki onbir yıla ait istatistikler (İstanbul ve Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz Bölgeleri Deniz Ticaret Odası, 2022) arasında format olarak farklıklar bulunduğu ve verilerin yıllık olarak kıyaslanmasında da zorluklar söz konusu olmaktadır.

Tablo 3. 2022 Yılında Yayımlanan Gemi İnşa Üretim Tesisleri/ Tersanelerin 12 Yıllık İstihdam Durumu

Yıl	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
İstihdam Durumu (kişi)	37.479	37.006	37.786	39.847	46.356	44.657	42.622	46.680	53.158	66.696	76.319	79.886

Gerçeği tam olarak yansıtmayan verilerden oluşturulan istatistiklerin yanıltma riski de dikkate alındığında, iş kazaları ve meslek hastalıklarının takip/ tespiti, kayıt altına alınması ve bildirilmesi ile ilgili olarak halihazırda olunması gereken seviyeye gelinememesinin yanında (Karadeniz, 2012), iş yerlerindeki İSG uygulamalarının etkinliğinin sadece iş kazaları ve/ veya meslek hastalıkları sayısına dayanan istatistik verilerle ölçülmeye çalışılması da, iş yerlerinde önleyici tedbirlere yönelik güvenlik bilincinin tesisi açısından sorunlu bir bakış açısı olarak karşımızda durmaktadır.

Bu bağlamda, mevcut çalışmayla; iş yerlerinde iş sağlığı ve güvenliğinin uygulama şeklinin izlenebilmesine olanak sağlayacak şekilde, İSG disiplini bir ilk olarak öncül, uyum ve ardıl göstergeler tanımlanması ve İSG uygulamalarının bu göstergeler üzerinden ele alınması, izlenmesi ve irdelenmesi ile İSG uygulamalarının etkinliğinin daha kıyafetli bir şekilde ortaya konulabilmesinin mümkün olacağı üzerinde durulmuştur.

Çalışmada; öncelikli olarak çalışmanın amacı, kapsamı ve yöntemi belirtilecektir. Sonrasında tersane yapılarının genel işleyişi ile tersanelerde İSG' nin yeri ve önemi, İSG açısından yüksek risk oluşturan kritik faaliyetler ile İSG mevzuatı ve organizasyonu üzerinde durulmak suretiyle aktarılacaktır. Devamında çalışmaya esas teşkil eden öncül, uyum ve ardıl gösterge kavramları tanımlanacak, bu göstergelerin İSG disiplini içerisinde ele alınma şekli üzerinde durulacak, akabinde tersanelerde İSG açısından öncül, uyum ve ardıl göstergeler tek tek sıralanmak suretiyle bahse konu göstergelerin tersane süreçleri ile nasıl bir entegrasyon içinde ele alınacağı irdelenecektir. Son bölümde de; öncül, uyum ve ardıl göstergelerin risk değerlendirme çalışmalarına ile örnek risk değerlendirme yöntemlerine etkisi ve katkısı başta olmak üzere, çalışma ile ilgili sonuç, tartışma, öneri ve değerlendirmelere yer verilecektir.

2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, tersanelerde İSG uygulamalarının tanımlanan göstergeler üzerinden irdelenmesi, olası İSG uygunsuzluklarına yönelik alınması gereken tedbirlere referans olunması ve bu suretle iş kazası ve meslek hastalıklarının önlenmesine yönelik bir süreç kılavuzu oluşturulmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için çalışmada; İSG disipliniinde son dönemlerde yer vermeye başlanan öncül ve ardıl göstergelerin yanında, literatürde bir ilk olacak şekilde uyum göstergeleri kavramı önerilmek suretiyle, tersanelerdeki iş süreçleri, tek tek belirlenen bu göstergelerle entegre bir şekilde irdelenmiştir.

Bu süreç kılavuzu ile tersanelerle ilgili olarak;

- a. Tersanelerdeki İSG disiplininin yasal mevzuat kapsamındaki uygulama şekli daha net bir şekilde ortaya çıkabilecek,
- b. Tek tek belirlenen öncül göstergelere odaklanılarak, faaliyetler öncesinde alınacak önleyici tedbirlerle İSG' nin önleme esaslı temel yaklaşımı daha kıfayetli bir şekilde hayata geçirilebilecek,
- c. İlk kez önerilen ve tek tek tanımlanan uyum göstergelerine odaklanılarak, faaliyetler devam ederken ortaya çıkan uygunsuzluklara yönelik düzeltici tedbirler alınabilecek,
- ç. Ardıl göstergeler ortaya konularak, faaliyetler sonrası ortaya çıkabilecek risklerin kabul edilemez seviyelere ulaşmasının engellenmesi için öncül ve uyum göstergelere odaklanılarak belirlenen önlemlerin alınması gerekliliği pekiştirilebilecek,
- d. Çalışanlar ve yöneticiler İSG konusunda daha da bilinçlendirilerek yürütülen faaliyetlerin daha planlı, daha programlı ve daha emniyetli bir şekilde yerine getirilmesi ve kaynakların daha etkin kullanılabilmesi sağlanabilecek; İSG tedbir ve talimatları daha kıfayetli şekilde belirlenebilecek ve bu suretle faaliyetler esnasında iş kazası ve meslek hastalığı meydana gelme olasılığı ile can ve mal kayıpları azaltılabilecektir.

3. Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi

Mevcut çalışma, iş kazası ve meslek hastıkları riskini kombine bir şekilde içinde barındıran ve bu bakımdan İSG açısından kritik öneme haiz iş yerleri içerisinde yer alan tersanelere odaklanılarak hazırlanmıştır. Ancak; bunun yanında, tersanelerde çalışma kapsamında önerilen hususlar dikkate alınmaya başlandığında ve bu suretle çalışma uygulanabilirlik açısından belli bir seviyeye ve olgunluğa ulaştığında, İSG mevzuatına tabi tüm iş yerlerinde uygulanabilir bir modelin alt-yapısını oluşturmaya yönelik girdileri de içereceği muhakkaktır. Bu bakımdan çalışmanın kapsamını İSG mevzuatına tabi olan tüm iş yerleri olarak ele almak da mümkündür.

Çalışmada veri toplama işlemi, “gözlem” ve “literatür taraması” yolu ile gerçekleştirilmiştir. Gözlem kapsamında; tersanelerin doğal çalışma ortamında, ortama ilişkin herhangi bir yapısal karar almaksızın, araştırmaya katılarak basit gözlemlerde bulunulacak şekilde alan çalışması yapılmıştır. Literatür taraması sürecinde Mevzuat Bilgi Sistemi ile Yükseköğretim Kurumu (YÖK) Başkanlığı Ulusal Tez Merkezinin ve üniversitelerin okuyucu erişimine açık olan veri tabanları kullanılmıştır. Bu kapsamda gemi inşa, bakım ve onarım konuları başta olmak üzere İSG ile alakalı bilimsel yayınlar, ulusal ve uluslararası düzenlemeler, ülkemizde gemi sanayisinde İSG ile ilgili olarak yaşanan gelişmeler, üretilen çalışmalar ve raporlar irdelenmiştir.

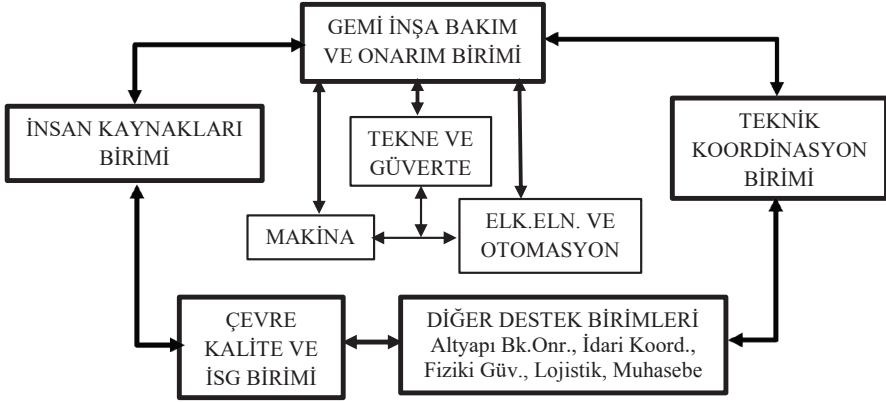
Verilerin çözümlenmesinde kapsamlı literatür taramasına dayanan betimsel araştırma yöntemi, kaynakların incelenmesinde ve elde edilen verilerin değerlendirilmesinde ise doküman analizi yöntemi kullanılmıştır. Gri literatür de dahil olmak üzere, literatüre dayalı belgeler gözden geçirilmiş, daha sonra tersane organizasyonu İSG açısından bölümlere ayrılmış ve her bölümün öncül, uyum ve ardıl göstergeler açısından nasıl izlenebileceği, uygun bir şema üzerinde belirtilmiştir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Tersanelerin Genel İşleyişi

Sektörel bazda ağır sanayi ile iç içe olan tersanelerin bünyesinde farklı branşlarda faaliyetler gerçekleştirilmektedir. Bu durum, tersanelerde tüm bu faaliyetlerin iletişim, koordinasyon ve iş birliği anlayışı içinde yerine getirilmesini gerektirmektedir. Mevcut çalışmada, tersane işverenleri veya işveren vekilleri yönetimindeki tersanelerin genel organizasyonu ve gerçekleştirilen faaliyetler Şekil 4. üzerinden irdelenmiştir.

Bu faaliyetler içinde yer alan teknik/ idari koordinasyon, personel, muhasebe, çevre, kalite, İSG gibi birimlerin faaliyetleri genel olarak beyaz yaka faaliyetleri olarak adlandırılabilir. İş sağlığı ve güvenliği açısından iş kazası ve meslek hastalığı riski yüksek olan faaliyetler işçilik faaliyetleri olup, tersanelerde bu faaliyetler içinde işin büyük ve kritik kısmını, kaldırma/ taşıma/ depolama, ön imalat, profil hazırlama, raspa/ boya, kesme/ eğme/ montaj/ kaynak/ taşlama, tesisat/ elektrik/ donatım, boya ve diğer kaplamaların temizlenmesi ve çıkarılması, kimyasal ve yakıtkalıntılarının temizlenmesi, motor, ahşap/ polyester, havuzlama/ kızaklama gibi faaliyetler oluşturmaktadır (Adalı, 2010; Barlas ve İzci, 2018; Bakacak, 2007; Çetinkaya, 2014). Bu faaliyetler mevcut çalışmada genel olarak, “tekne-güverte”, “makine” ve “elektrik-elektronik-otomasyon” üst başlıkları altında tanımlanmıştır (Topaktaş, 2011; Tari, 2014).



Şekil 4. Tersanelerin Genel Organizasyonu

Genel olarak kesim ve kaynak gerektiren korozyon ve deformasyona meyilli ana mukavemet elemanları, sızdırma riski taşıyan kapak vb. yapıların mekanik aksanları, yaşam mahallindeki ve güverte üzerindeki tüm lumbuz, salmastra ve kaportalar ile filika metaforası ve demir ırgatları gibi mekanik sistemler ile tüm kesim, kaynak, boya, raspa ve marangozluk faaliyetleri “Tekne ve Güverte” üst başlığı altında irdelenmiştir.

Deniz araçlarının tüm boru sistemleri, pompaları, valfleri, acil kumandaları, tankları ve üzerindeki teçhizatları, ana makinası, şanzımanı, jeneratörleri, pervaneleri/ şaftları ve dümenleri ile bunların motorları, yardımcı makinaları, soğutma ve havalandırma sistemleri, tüm dahili haberleşme sistemleri ile tüm torna, tesviye ve freze faaliyetleri “Makina” üst başlığı altında irdelenmiştir.

Deniz araçlarının elektrik kabloları, devrelerin açma-kapama elemanları, acil sistemlerin bileşenleri, sevk sistemi, uzaktan kumanda mekanizmaları, izleme teçhizatı ve makina donanımının otomasyonlu elemanları “Elektrik, Elektronik ve Otomasyon” üst başlığı altında irdelenmiştir.

Uygulamada birtakım farklılıklar bulunsa da “gemi inşası” ile “gemi bakımı ve onarımı” birbirinin benzeri süreçler içerir. Gemi bakımı ve onarımı, gemi inşasına nazaran daha düşük teknoloji gerektiren fakat daha emek yoğun bir süreçtir. Gemi bakım ve onarım sürecini gemi inşa sürecine nazaran daha emek yoğun yapan faaliyetlerin başında ; geminin kuru/ yüzer havuza alınması, gemi yüzeyinin pas, yağ ve benzeri maddelerden arındırılması için su/ grit raspası yapılması, astar ve son kat boya vurulması, pervane/ dümen sisteminin bakımı, makina ve teçhizatla gerekli kontrol ve bakım faaliyetleri gelmektedir.

5. Tersanelerde İSG

Tersanelerde tehlikeli maddelerin kullanıldığı zorlu çalışma koşullarında çalışıl-

maktadır ve bunun için de büyük bir insan gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (A. İ. Yılmaz ve diğ., 2015). Bu bakımdan tersane süreçleri, İSG açısından çok çeşitli ve yüksek riskler barındıran faaliyetler içermektedir. Ülkemizdeki tersanelerde gerçekleşen kazalara ait kayıtlar ve istatistikler incelendiğinde; özellikle yüksekte düşme, elektrik çarpmasına maruz kalma, yangın ve patlama, cisimlerin çarpması, cisimler arasına sıkışma veya ezilme şeklinde gerçekleşen kazalarda azımsanmayacak kadar ciddi yaralanmalı ve ölümlü sonuçlarla karşılaşıldığı anlaşılmaktadır (Kavi ve Koçak, 2011). Bu bakımdan tersanelerde kazaların ve meslek hastalıklarının önlenmesi maksadı ile söz konusu risklerin bilimsel yöntemlerle değerlendirilip yönetilmesi hayati öneme sahiptir.

5.1 Tersanelerde İSG Kapsamında Yüksek Risk Oluşturan Kritik Faaliyetler

Tersanelerdeki İSG kapsamındaki risk faktörleri hakkında daha detaylı bilgi sahibi olabilmek adına, yüksek risk oluşturan kritik süreçlere özel bir bakış sergilemek faydalı olacaktır. Bu süreçler, havuzlama/ kızaklama, iskele kurulumu, raspa ve boya, kesim ve kaynak, torna/ tesviye ve freze, izolasyon, ağaç işleri, döküm ve lastik işleri şeklinde sıralanabilir. Bu süreçlerde özellikle; yüksekte yapılan çalışmalardan kaynaklı riskler, çalışma ortam şartlarından kaynaklı riskler (iş yerlerinin tertip ve düzeni, dar alan, kaygan zemin, ulaşım yolları vb.), kapalı mahallerde yapılan çalışmalardan kaynaklı riskler, elektriksel çalışmalardan kaynaklı riskler, iş makinelerinin kullanımından kaynaklı riskler ile bu faaliyetler yerine getirilirken ortaya çıkan fiziksel, kimyasal ve ergonomik risk etmenleri (özellikle çalışanların sağlığı ile ilgili olarak yüksek meslek hastalığı riski içeren gaz, toz, asbest, gürültü, titreşim, termal konfor vb.) önemli bir yer işgal etmektedir (Adalı, 2010; Çetinkaya, 2014).

5.2 Tersanelerde İSG Mevzuatı

İş sağlığı ve güvenliği disiplini; İnsan Hakları Evrensel Beyannamesi (17, 23 ve 24 ncü maddeleri) ile T.C. Anayasası (17, 49, 50, 51, 53, 54, 55 ve 56 ncı maddeleri)'nda yer alan yaşama hakkı, eşit muameleye tabi tutulma hakkı, çalışma hakkı, çalışma şartları ve dinlenme hakkı, sendika kurma hakkı, toplu sözleşme ve grev hakkı ve ücrette adalet hakları gibi hakların bileşkesi üzerinde yer alan bir disiplindir. Ülkemizde İSG ile ilgili yasal mevzuat daha önce 4857 Sayılı İş Kanunu'nun içinde bir madde olarak yer alırken (Madde 81 - (Mülga: 20/6/2012-6331/37 md.), 30 Haziran 2012 tarihinden itibaren yürürlüğe konulan 6331 Sayılı İSG Kanunu ve bu kanuna bağlı olarak çıkartılan yönetmelik ve tebliğler, halihazırda ülkemizde çalışma yaşamında iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ile ilgili olarak ulusal bazdaki temel yasal mevzuatı oluşturmaktadır (Bakır, Şerbetçioğlu, Gümüş ve Sağlam, 2014). Bunların yanında; bahse konu ulusal mevzuatın uluslararası düzeydeki ILO Sözleşmeleri, AB Direktifleri, AB İlerleme Raporları ve İSG

Bu organizasyonda, yasal mevzuata uygun bir İSG Kurulunda, organizasyonun dış halkasında görüleceği üzere, işveren veya vekili, iş güvenliği uzmanı, iş yeri hekimi, çalışan temsilcisi, formen ve insan kaynakları görevlisi bulunmakta iken; çalışanlar, destek elemanları ve birim sorumluları da risk değerlendirme ekipleri içinde yer alarak birbirleri ve İSG Kurulu ile çift yönlü iletişim içinde olacak şekilde organizasyona dahil edilmişlerdir. Böylelikle yasal mevzuat gereği görev, yetki ve sorumlulukları belirli olan işverenler (veya vekilleri), çalışanlar ve İSG profesyonellerinin (iş yeri hekimleri, iş güvenliği uzmanları ve iş yeri hemşireleri) yanında, kendilerine verilen görevlerle sınırlı olmak üzere işveren vekili sayılan birim amirleri ile çalışanların içinden görevlendirilen destek elemanları (arama-kurtarma-tahliye elemanı, yangınla mücadele elemanı ve ilk yardımcı) da çalışanlar ile işverenler arasındaki bu iletişim, koordinasyon ve iş birliği ağında etkin rol almış olmaktadır. Ayrıca, işveren veya vekilleri tarafından çalışan temsilcisi aynı zamanda sendika temsilcisi olan çalışanlar içinden seçilmek suretiyle, sendika ile çalışanlar arasında İSG bilincinin sağlanması bakımından sürekli bir iletişim ağı tesis edilerek işverenlerin de bu bakımdan yükümlülüklerinin yerine getirilebilmesine olanak sağlanması hedeflenmektedir (Bakır ve diğ., 2014; Güner, 2015).

6. Öncül, Uyum ve Ardıl Göstergeler

Öncül ve ardıl göstergeler, bir sistemin uygulanmasıyla ortaya çıkan kuvvetli veya zayıf tarafları değerlendirmek için kullanılan araçlardır. En basit hali ile öncül göstergeler, sistem işletilmeye başlanmadan önce değişir. Bunun tam tersine ardıl göstergeler ise geçmiş hareketlere dayanır ve sisteme dair veriler hakkında iç görü sunar. Diğer bir deyişle, öncül göstergeler hareketler oluşmadan önce tahmine yönelik sinyaller verirken, ardıl göstergeler ise halihazırda gerçekleşmiş hareketlere dayanan sinyaller yaratırlar. Bu iki tür gösterge, teknik analizden faydalanan araştırmacılar tarafından sıkça kullanılmaktadır. Bunun dışında öncül ve ardıl göstergeler sistem performansını belirlemek için de kullanılır. Bu durum bahse konu göstergeleri İSG araştırmalarında da bir hayli kullanışlı kılmaktadır. Mevcut çalışmada, İSG açısından çalışanların tehlikelerle karşılaşmadıkları durumdaki göstergeler öncül, risklerle karşılaştıktan sonraki göstergeler ise ardıl göstergeler olarak tanımlanmıştır (Fragiadakis ve diğ., 2014; Pawlowska, 2015; Sheehan, Donohue, Shea, Cooper ve De Cieri, 2016).

Çalışmada İSG disiplinine yönelik önerdiğimiz, üçüncü bir tür gösterge daha söz konusudur. Uyum göstergeleri diğer iki gösterge türünün arasında yer alır. Bu göstergeler gerçek zamanlı bir işlevsellikle mevcut durum hakkında bilgi sağlar. Örneğin, bir çalışan grubunun çalışma saatleri veya belirli bir sanayi piyasasının üretim oranları ölçülerek bir uyum göstergesi oluşturulabilir. Özetle uyum göstergelerini, İSG açısından çalışanların tehlikelerle karşılaştıkları fakat risklerle

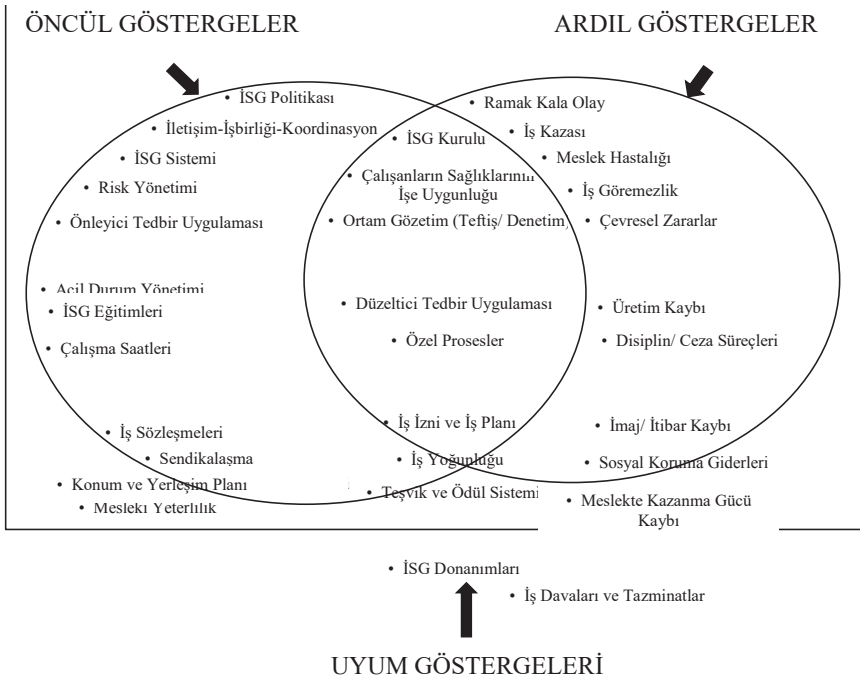
henüz karşılaşmadıkları durumdaki göstergeler olarak tanımlamak mümkündür.

Mevcut çalışmada tersanelerde tehlike öncesi durum öncül göstergelerle, tehlike sonrası - risk öncesi durum uyum göstergeleri ile ve risk sonrası durum ardıl göstergelerle eşleştirilmek suretiyle tersane süreçleri İSG açısından irdelenmektedir.

Bu aşamada kritik bir hususu öncelikli olarak belirtmemiz gerekmektedir. Burada; bahse konu göstergelerin sınırlarının net çizgilerle çizilemeyeceği, özellikle öncül ve ardıl göstergelerin uyum göstergelerine girişken olabilecekleri akılda tutulması gereken önemli bir unsurdur. Zira öncül, ardıl ve uyum göstergelerini konumlandırmamızdaki maksat, bu göstergelerin İSG açısından keskin çizgilerle birbirlerinden ayrılmış olduklarını göstermekten ziyade, İSG disiplininin tersanelerdeki uygulama performansının gözlenmesi ve bu göstergeler üzerinden irdelenmesine katkı sağlanmasıdır.

Yine bilindiği üzere risk değerlendirme, en nihayetinde analizi yapan kişinin öznel değerlendirmesini kaçınılmaz şekilde barındıran bir süreçtir. Ancak bu durum, analizcinin öznel hareket etmesi gerektiği şeklinde algılanmamalıdır. Analizcinin uygun sentezlere ulaşabilmesi, yapmış olduğu analizdeki öngörüsünün yanında, analizini nesnel ve bilimsel gerçek ve gerekçelere dayandırmasında yatmaktadır. Bu bakımdan öncül, uyum ve ardıl göstergelerinin belirlenmesi sürecinde de belirleyicinin öznel değerlendirmesinin etkisi olabileceğini kabullenmek gerekecektir. Ancak, çalışma ilerleyen aşamalarda, tartışıldıkça detaylandıkça, geliştikçe, uygulamadaki karşılığı ve etkinliği ortaya çıktıkça eksik tarafları da tamamlanabilecektir. Bu aşamada tersaneler açısından önerdiğimiz öncül, uyum ve ardıl göstergeler Şekil 6'da belirtildiği gibidir:

Şekil 6.'dan anlaşılacağı üzere; uyum göstergelerinin bir kısmının öncül, bir kısmının da ardıl göstergelere yakın olabilmesi mümkündür. Bu durum, yukarıda da belirttiğimiz gibi, tehlikelerin riske dönüştüğü alanların, yani uyum göstergelerinin ortaya çıktığı alanların gri alanlar olmasından kaynaklıdır. Örneğin; yüksekte çalışmak tehlikelidir. Çünkü düşme, yaralanma ve ölüm riski barındırmaktadır. Bu durumda her ne kadar önleyici tedbir olarak, yüksekte çalışmayı ortadan kaldırmak riski ortadan kaldırıyor gibi gözükse de, "yüksek" kavramının İSG disiplininde keskin çizgilerle belirlenmiş bir tanıımı yapılmadığından, risklerin ortadan kaldırıldığı kabulü, iş sahalarında karşımıza çıkan öngörmediğimiz çukur veya tümseklerden kaynaklı risklerin de sıfırlandığı anlamına gelmemektedir. Bu durumda, anılan örnekte yüksekte çalışma öncül bir gösterge olan önleyici tedbir kapsamında ele alınırken, öngörülemeyen tümsek veya çukurlardan kaynaklı risklerden dolayı uyum göstergesi olarak konumlandırılan düzeltici tedbir kapsamına dönüşebilmektedir.



Şekil 6. Tersaneler İçin Önerilen Öncül, Uyum ve Ardıl Göstergeler

Yine benzer şekilde, örneğin uyum göstergeleri her ne kadar, tehlikenin riske dönüştüğü fakat riskin gerçekleşmediği durum olarak tanımlansa da, gerçekleşen fakat gözlemlenemeyen ramak kala olayların varlığı, aslında ardıl bir gösterge olarak tanımlanan bu ramak kala olayların, henüz riske dönüşmeyen bir uyum göstergesiymiş gibi ele alınabilmeleri yanlıgısını doğurabilmektedir. Bu bakımdan göstergeler arasındaki geçişlerin birbirlerine girişimli olabileceği dikkatlerden kaçmamalıdır.

6.1 Tersanelerde İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Öncül Göstergeler

6.1.1 İSG Politikası: Tersane yönetimleri tarafından, gemi inşa, bakım ve onarım aşamalarının sağlıklı ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi hedefini ve bu doğrultuda gerekli olan korunma politikalarını içerecek bir İSG politikası belirlenmelidir (Adalı, 2010), Kayabaşı, 2019). Bu politikanın varlığı ve içeriği tersanelerin İSG yaklaşımını ortaya koyan kritik bir öncül göstergedir.

6.1.2. İletişim, Koordinasyon ve İş Birliği: Ekip çalışması gerektiren her çalışmada olduğu gibi, İSG disiplininin de iş yerlerinde kifayyetli bir şekilde tesis edilmesinde iletişim, koordinasyon ve iş birliği anlayışının üst seviyede olması son

derece önemlidir. Özellikle farklı branşlardaki faaliyetlerin bir arada gerçekleştirildiği tersanelerde, birbirini tamamlayan (kesim, montaj, kaynak) ya da birbirini engelleyen (boya, elektrik) faaliyetler söz konusu olabilmektedir. Bu faaliyetleri yürütenler ve yönetenler arasında sağlıklı bir iletişim, koordinasyon ve iş birliği anlayışı var olmadığı takdirde gri alanlardan kaynaklı riskler ölümcül iş kazaları ve meslek hastalığı olarak tezahür edebilecektir. Yine tersane işverenleri tarafından, İSG disiplininin tesisi bakımından sürece müdahil durumdaki tüm aktörlerin (çalışanlar, birim sorumluları, İSG profesyonelleri vb.) yanında destek pozisyonunda yer alan (sendika, baro, üniversite, oda, hastane, belediye vb.) kurum/ kuruluşlarla da organizasyonun her aşamasında sürecinde sürekli bir iletişim, koordinasyon ve iş birliği anlayışı geliştirilmeli ve idame ettirilmelidir (Eser, 2020), (Çevi ve İlkbahar, 2018).

6.1.3 İSG Sistemi: İş yerlerinde İSG disiplininin hedefe odaklı ve sistematik bir şekilde tesis edilmesi ve geliştirilmesi; görev ve sorumlulukların, uygun bir organizasyon yapısında ve “kimin, neyi, ne zaman, nasıl, neden ve nerede yapacağını net olarak içerecek şekilde” tanımlanması suretiyle tesis edilen etkin bir İSG sistemi ile mümkündür. İSG sistemi; politika belgesi eşliğinde İSG alanında izlenecek strateji ve hedeflerin ortaya konulması, organizasyonun oluşturulması, planlama ve stratejinin hayata geçirilmesi, uygulamanın değerlendirilmesi ve sonuçlara göre yeni tedbirlerin alınması şeklinde işlevselleştirilmelidir. Bu bakımdan tersanelerde İSG sisteminin varlığı kritik öneme haiz öncül bir göstergedir (Adalı, 2010; Tutar ve diğ.,2019; Bakacak, 2007; Zaman, Baheramsyah ve Ashari, 2020).

6.1.4 Risk Yönetimi: Risk yönetimi, risklerin kontrol edilmesi ve belirli bir hiyerarşi içerisinde alınacak önlemlerin belirlenen her risk için değerlendirilmesini içerir. Bu sürecin amacı, tehlikelerin belirlenmesi aşamasında toplanan verilerin irdelenmesi ve risklerin kontrolüne yönelik stratejik kararların alınmasıdır. Bu bakımdan tersaneler gibi “Çok Tehlikeli” olarak kodlanan iş yerleri başta olmak üzere, iş yerlerinde risklerin analizi ve değerlendirilmesini içeren bir risk yönetiminin varlığı önemli bir öncül gösterge olmaktadır (Adalı, 2010; Bakacak, 2007; Fragiadakis ve diğ., 2014).

6.1.5 Önleyici Tedbir Uygulaması: Temel amacı iş yerlerinde sıfır kaza ve sıfır meslek hastalığı olan İSG disiplinde önleyici yaklaşım en temel yaklaşımdır. Bu yaklaşıma göre tehlikeler öncelikli olarak kaynağında tespit edilip önlenmelidir. Bu bakımdan, iş kazası ya da meslek hastalığı meydana geldikten sonra zararın giderilmesi için önlem alıp uygulamak yerine, zarar meydana gelmeden önce koruyucu ve önleyici İSG düzenlemelerinin öngörülmesi, iş yerlerinde önleyici tedbirlerin öncül bir gösterge olarak ele alınmasını gerektirmektedir. Tersaneler mütemadiyen ramak kala olayların yaşanabildiği iş yerleri olmaları bakımından,

önleyici tedbirler İSG disiplininin sağlanması ile ilgili olarak kritik öneme haiz olmaktadır. Bunun için tersanelerin işverenleri, çalışanları ve İSG profesyonelleri tarafından, risk yönetimi ile bağlantılı uygun bir önleyici tedbir yaklaşımı ortaya konulmalı ve belirlenen önleyici tedbirler uygun formlarla kayıt altına alınarak uygulamaya sokulmalıdır (Bakır ve diğ., 2014).

6.1.6 İSG Eğitimleri: Çalışanların, yöneticilerin ve İSG profesyonellerinin mesleki eğitimlerinin yanında, tersanelerdeki tüm aktörlerin belirlenen İSG politikası ile İSG sistemi ve riskleri hakkında bilgilendirilmiş olmalarının yasal bir zorunluluk olduğu (Bakır ve diğ., 2014) gerçeğinin yanında; İSG eğitimleri, İSG bilincinin ve kültürünün oluşmasında ve böylelikle öncül göstergelerin istenilen seviyede gerçekleşebilmesinde başat bir faktör olması nedeniyle, mevcut çalışmada öncül bir gösterge olarak ele alınmıştır (Karadeniz, 2012; Eser, 2020).

6.1.7 Acil Durum Yönetimi: İş sağlığı ve güvenliği disiplini açısından acil durumlar, işin doğasından kaynaklanmayan, öngörülmesi zor fakat sonuçları ağır olaylar şeklinde tanımlanmaktadır. İş yerlerinde acil durum planlarının hazırlanması, önleme, koruma, tahliye, yangınla mücadele, ilk yardım ve benzeri konularda görevlendirilecek çalışanlar ile bu konularda gerçekleştirilmesi gereken çalışmaların belirlenmesi ve acil durumların güvenli olarak yönetilmesi hususları ilgili yasal mevzuatlarla düzenlenmiştir (Bakır ve diğ., 2014). İş yerlerinde acil durumların, iş yeri içi (iş kazası, yangın, patlama vb.) veya iş yeri dışı (deprem, sel, sabotaj vb.) durumlardan kaynaklanabilmesi ve öngörülmesi zor fakat sonuçlarının ağır olması nedeniyle, acil durumlara özel bir önleyici yaklaşım sergilenmeli ve acil eylem planı içeren bir acil durum yönetimi benimsenmelidir. Acil eylem planı, destek elemanlarının varlığı ve görevlendirilmesinden tutun, acil durumlarda görev dağılımının açık ve net bir şekilde yapılmasına kadar, işlerliği tatbikatlarla teyit edilen uygulanabilir bir plan olmalıdır. İlk yardım, yangınla mücadele, doğal afet gibi olağanüstü koşullar için tersanelerin taşıdığı özel tehlikeleri dikkate alarak bu konuda eğitilmiş, uygun donanıma sahip, yeterli sayıda personel görevlendirilmelidir.

6.1.8 Patlamadan Korunma Planı: Patlayıcı ortamlar, belirli bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilen ve patlama riskinin söz konusu olduğu ortamlardır. Tersanelerde ve gemilerde özellikle LPG/ mazot tankları ile boya ambarlarının varlığı ve kesim/ kaynak işçiliğinde asetilen tüplerinin yoğun kullanımı patlama riskini artıran unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda tersanelerde yürütülen faaliyetlerden dolayı ortaya çıkabilen tehlikeli gaz, toz ve buharların sınırlandırılmış bir kapalı mahal içerisinde yakıcı (oksijen) ve tetikleyici (elektrik, ısı, kıvılcım, yıldırım vb.) unsurlarla uygun miktarlarda bir araya gelmesiyle patlama riski ortaya çıkabilmektedir. Bu bakımdan patlayıcı ortamların tehlikelerinden çalışanların korunması amacıyla, yerine getirilen faaliyetlerin doğasına

uygun olan teknik ve organizasyonel önlemleri içeren bir patlamadan korunma planının (dokümanının) varlığı önemlidir ve patlama riskinin bulunduğu mahallerde uygun ekipman ve teçhizatın sağlanması ve çalışanların patlamadan kaynaklı risklere karşı bilgilendirilmeleri gerekmektedir (Bakır ve diğ., 2014).

6.1.9 Çalışma Saatleri: Çalışanların günlük/ haftalık çalışma süreleri tabi oldukları personel kanunlarında (iş kanunu, devlet memurları kanunu vb.), normal çalışma süresinden daha kısa çalışma gerektiren işler ise İSG mevzuatında belirtilmiştir. Bu kapsamda; işin niteliğine göre faaliyetlerin başlangıç ve bitiş saatleri konusunda, yasal mevzuat çerçevesinde işverenlere birtakım inisiyatifler de tanınmıştır. Öyle ki; günün yirmidört saati ihtiyaç duyulan işler vardiya sistemi tesis edilerek yerine getirilebilmekte veya fazladan çalışma, fazla çalışma, mesai kaydırması ve denkleştirme uygulamaları ile çalışma saat ve sürelerinde birtakım düzenlemeler yapılabilmektedir (Bakır ve diğ., 2014). Özellikle çalışma başlangıç ve bitiş saatlerinin sürekli değişkenlik göstermesinin çalışanlar üzerinde oluşturabileceği psikososyal risklerin yanında; çalışma saatlerinden dolayı iletişim, koordinasyon ve iş birliği gerektiren süreçlerin bütünlüğünün bozulması ve bu suretle çalışanların işin ve iş yerlerinin sağlık ve güvenliğinin riske edilmemesi kapsamında tersanelerde ana kıstasları belli bir çalışma saati yaklaşımının varlığı öncül bir gösterge olarak ele alınmıştır.

6.1.10 Konum ve Yerleşim Planı: Bazı tersaneler son derecede rahat ve geniş alanlara sahip olmakla birlikte, bazıları da çok sıkışık ve dar alanlarda konumlandırılmıştır (Adalı, 2010). Bir tersanenin kuruluş aşamasında, elverişli ve gelişmeye açık bir sahaya sahip olup olmadığı, su derinliği, dalga etkisi, kıyı çizgisi ve uzunluğunun mevcut durumu, enerji ihtiyacı, karayolu ulaşımı, yan sanayiye ulaşma durumu, deniz trafiğinin durumu, yasal kısıtlayıcı alanlar içinde olması gibi kriterler göz önüne alınmalıdır (TBMM, 2008). Ayrıca tersane içinde ihtiyaç duyulan sarf malzeme ve/ veya hammaddelerin depolanması maksadıyla uygun koşulların sağlandığı açık/ kapalı ambarların var olması, iş makinelerinin bahse konu sarf malzeme ve/veya hammaddeler ile imalat süreçlerinde ortaya çıkan yan ürünlerin, iskelelerde, kızak mahallerinde ve/ veya çekek yerlerinde yürütülen gemi inşa, bakım ve onarım noktalarına aktarılması için uygun yollar tanımlanmalıdır. Bu önlemler yoğunluklu olarak tersaneler kurulmadan önce alınması gerektiği için, mevcut çalışmada “konum ve yerleşim planı” öncül bir gösterge olarak tanımlanmıştır.

6.1.11 Mesleki Yeterlilik: Çalışanlara mesleki yeterliliklerine göre iş gördürülmesi yasal bir zorunluluktur. Öyle ki; mesleki eğitim alma zorunluluğu bulunan tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işlerde, yapacağı işle ilgili mesleki eğitim aldığını belgeleyemeyen çalışanlar çalıştırılmamaktadır (Bakır ve diğ., 2014). Bu kapsamda mevcut çalışmada işe alım süreçlerinde mesleki yeterlilik kriterle-

rinin uygulanıp uygulanmadığı, zaman içinde ortaya çıkan mesleki yeterlilik kriterlerine yönelik önleyici tedbir alınıp alınmadığı hususlarını da içerecek şekilde mesleki yeterlilik kriteri öncül bir gösterge olarak ele alınmıştır (A. İ. Yılmaz ve diğ., 2015; Kavi ve Koçak, 2011).

6.1.12 İş Sözleşmeleri: İş sözleşmeleri bir tarafın bağımlı olarak iş görmeyi, diğer tarafın (işveren) da ücret ödemeyi üstlenmesinden oluşan bir sözleşme türüdür. Süresi bir yıl ve daha fazla olan iş sözleşmelerinin yazılı şekilde yapılması zorunludur. İş sözleşmeleri belirli veya belirsiz süreli yapılırlar (Karadeniz, 2012; Eser, 2020). Çalışanlarla, alt işverenlerle veya İSG profesyonelleri ile yapılan sözleşmelerin varlığı ve niteliği, sözleşme hukukuna uygunluğu, risk yönetiminin ve İSG sisteminin kifayetsiz bir şekilde işletilebilmesi bakımından öncül bir gösterge olarak ele alınmıştır.

6.1.13 Sendikalaşma: Sendikalar, örgütlendikleri iş yerlerindeki pazarlık güçleri ve lobi etkilerinin yanında, demokratik kitle örgütleri olarak toplumu harekete geçirme kabiliyetleri sebebiyle, işverenlerin ve çalışanların İSG nin disiplinini sağlanması için yönlendirilebilmeleri anlamında ciddi potansiyel barındırmaktadırlar (Eser, 2020). Bundan dolayı, tersanelerde işverenler tarafından çalışanlara sendikacı olmalarından dolayı baskı ve mobbing uygulanmaması, çalışan temsilcilerinin sendika temsilcileri içinden belirlenmesi, gerek çalışanlarla gerekse de çalışanların üyesi olduğu sendikalarla iletişim, koordinasyon ve iş birliği anlayışı içinde bulunulması, sendikalaşmaya verile önemin bir göstergesidir ve bu açıdan "sendikalaşma" İSG disiplininde öncül bir gösterge olarak ele alınmaktadır.

6.1.14 Periyodik Bakım Sistemi: Tersanelerde korunma politikalarının bir gereği olarak, tehlikelere yönelik kaynağında tedbir alınabilmesi amacıyla iş ekipmanlarına (Adalı, 2010; Çetinkaya, 2014) yönelik etkin, önleyici ve periyodik bir bakım sistemi tanımlanmalı ve uygulanmalıdır. Böyle bir sistemin varlığı da etkin bir yönetim anlayışının göstergesi olması bakımından öncül bir gösterge olarak ele alınmayı gerektirmektedir.

6.2. Tersanelerde İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Uyum Göstergeleri

6.2.1 İSG Kurulu: Tersanelerde faaliyetler devam ederken ortaya çıkan tehlike ve risklere karşı alınacak tedbirlerin belirlenmesi amacıyla, ilgili yasal mevzuat gereği (Bakır ve diğ., 2014) kurulması ve her ay toplanması gereken İSG Kurullarında alınan kararlar, bu kararların hayata geçirilmesi ve ilerleme durumlarının takibi, çalışanların karşı karşıya oldukları tehlikelerin risklere dönüşmesini engelleyebileceği gerçeğinden hareketle; İSG kurullarının varlığı ve işlevinin öncül ve ardıl gösterge arasında bir uyum göstergesi kriteri olarak ele alınmasının daha uygun olacağını göstermektedir (Karadeniz, 2012).

6.2.2 Çalışanların Sağlıklarının İşe Uygunluğu: Çalışanların sağlık durumları

ve sağlık durumları açısından işe uygunlukları; işe alım sürecinin başlangıcından itibaren, iş süreçlerinde ve işten ayrıldıktan sonra dahi gözetilmesi gereken bir husustur. İSG politikasının, iş süreçlerinden kaynaklı tehlikelerin riske dönüşmesini engelleme taahhüdünü içermesi gerektiği gerçeğinden hareketle, çalışanların sağlık durumlarının yapmış oldukları işe engel teşkil etmesi ve/ veya yapmış oldukları işin sağlık durumlarını tehlikeye düşürecek nitelikte olması, iş süreçlerinde yeterli tedbirlerin alınmadığının bir göstergesi olması bakımından çalışanların sağlık gözetiminin öncül ve ardıl göstergeler arasında bir uyum göstergesi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Adalı, 2010; Zaman, Pitana ve Septianto, 2019).

6.2.3 Ortam Gözetimi (Teftiş/ Denetim): Ortam gözetimleri, İSG organizasyonunda yer alan tüm aktörlerin iletişim, koordinasyon ve iş birliği anlayışı içinde yerine getirildiği takdirde tehlikelerin riske dönüşme oranında ciddi bir azalma olacağı değerlendirilmektedir. Bu bakımdan; çalışanların, işin ve iş yerinin İSG politikasına, İSG sistemine ve risk yönetimine uygun şekilde idame ettirilip ettirilmediği kontrol edilerek ve gerektiğinde ölçüm ve analiz yaptırılmak suretiyle raporlanarak istenmeyen ardıl göstergelerin ortaya çıkmasının engellenmesi kapsamında, ortam gözetimi bir uyum göstergesi olarak ele alınmıştır (Karadeniz, 2012; Zaman ve diğ., 2019).

6.2.4 Düzeltici Tedbir Uygulaması: Çalışanların, çalışma ortamı ve iş süreçlerinden kaynaklı olarak ortaya çıkan tehlike ve risklere maruziyetleri durumunda, gerek saha/ sağlık gözetimleri gerek kontrol/ teftiş/ denetim, gerekse de ölçüm/ analiz sonucunda tespit edilen eksik/ aksaklıkların makul bir sürede giderilebilmesi kapsamında düzeltici tedbirler bir uyum göstergesi olarak ele alınmıştır. Özellikle tersanelerdeki karmaşık iş süreçlerinin varlığı nedeniyle, faaliyetler esnasında düzeltici tedbire ihtiyaç duyulan birçok aksaklık ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, İSG organizasyonunda yer alan aktörlerin ortam gözetimi uygulamasını etkin bir şekilde hayata geçirmeleri ile belirlenen düzeltici tedbirlerin en kısa sürede raporlanması ve giderilmesi tersaneler açısından kritik öneme haiz bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır.

6.2.5 Özel Prosesler: Tersanelerde havuzlama/ kızaklama, iskele kurulumu, raspa ve boya, kesim ve kaynak, torna tesviye ve freze, izolasyon, ağaç işleri, dökm, lastik vb. kritik faaliyetler ile bu faaliyetler esnasında özellikle yüksekte yapılan çalışmalardan kaynaklı riskler, çalışma ortam şartlarından kaynaklı riskler (iş yerlerinin tertip ve düzeni, dar alan, kaygan zemin, ulaşım yolları vb.), kapalı mahallerde yapılan çalışmalardan kaynaklı riskler, elektriksel çalışmalardan kaynaklı riskler, iş makinelerinin kullanımından kaynaklı riskler ile bu faaliyetler yerine getirilirken ortaya çıkan fiziksel, kimyasal ve ergonomik risk etmenleri içinde çalışanların sağlığına yönelik yüksek meslek hastalığı riski içeren gaz, toz,

asbest, gürültü, titreşim ve termal konfor vb. risk etmenleri üzerinde hassasiyetle durulmalı ve bu risklerin bileşke etkisi de dikkate alınmalı, önleyici tedbirlerin yanında bu risklere yönelik olarak çalışma alanlarında ortam gözetimleri yapılarak düzeltici tedbirler belirlenecek, raporlanacak ve uygulanacak şekilde özel önlemler alınmalıdır. (Adalı, 2010; Çetinkaya, 2014).

6.2.6 İş İzni ve İş Planı: İş izni süreci, güvenlik önlemlerinin alınarak işe başlanmasını sağlamak ve bu suretle tehlikeleri yönetmek için kullanılan ve çalışanları, destek elemanlarını, İSG profesyonellerini ve birim amirlerini/ yetkili yöneticileri de kapsayan iş yerine ait resmi belgelenmiş bir süreçtir. Bu kapsamda; yüksekte çalışma, kapalı mahalde çalışma gibi özel izin gerektiren iş süreçlerinin tanımlanması ve çalışanların özel izin gerektiren işlerde görevlendirilmeden önce gerekli sağlık ve güvenlik tedbirlerinin alınması önem arz etmektedir (Zaman ve diğ., 2019). Ayrıca, İSG disiplini açısından yüksek risk içeren özel prosesler başta olmak üzere, faaliyetlerin bileşke etkisi dikkate alınarak planlama yapılması da iş yerlerinde İSG bilincinin ve kültürünün bir ölçütüdür.

6.2.7 İş Yoğunluğu: Emek yoğun bir yapıya sahip olan tersanelerde çalışanların dikkatsizliği, aceleciliği ve dalgınlığı, kaza/ olayların gerçekleşmesine önemli miktarda etki eden bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle işverenlerin çalışanlarında, yoğun ve yorucu işler nedeniyle, İSG bilinci zafiyete uğrayabilmekte, işin güvenlikten daha öncelikli olduğu algısı oluşabilmekte, bu durum dar ve yeterince havalandırılmamış alanlarda yapılan çalışmaların da etkisiyle yoğun stres ve iş baskısını beraberinde getirebilmekte ve çalışanlar, yapılan iş ve iş yeri yüksek derecede riske maruz hale gelebilmektedir (TBMM, 2008; Barlas ve İzci, 2018; Zaman ve diğ., 2019).

6.2.8 Teşvik ve Ödül Sistemi: Teşvik ve ödül sistemi, güçlü bir güvenlik kültürünü tesis edilmesinde kritik hususlardan biridir. Güvenlik bilinci ve kültürü çalışanların öncelikli olarak kendi sağlık ve güvenliklerini sağlamaları için sorumluluk sahibi olmaları ile ilgilidir. Dolayısı ile güvenlik kültürü iş yerlerinde tüm çalışanların inanç, değer ve çalışma değerlerine dayalı, paylaşılan ve içselleştiren bir zemin üzerine inşa edilmelidir. İşverenlerin iş yerlerinde güvenlik kültürünün ana kriterlerinin belirlenmesinde ve uygun uygulama planı çerçevesinde rol modeli oluşturulmasında, çalışanların beklentilerine cevap verilebilmesinde, onların yetkilendirilmesi, değerlerin geliştirilmesi ve içselleştirilebilmesinde kültürel teşvik ortamı oluşturma sorumlulukları kaçınılmazdır. Aynı zamanda çalışanların hayat boyu öğrenme ilkesine uygun olarak kendilerini geliştirmeleri ve meslekte ilerlemelerinin teşvik edilerek ilerleme imkanları ile ilgili bilgilendirilmeleri de İSG bilinci ve kültürünün sağlanmasında önemli unsurlardır. Bu kapsamda işverenler tarafından oluşturulacak bir teşvik ödül sistemi ile güvenli davranışlar teşvik edilmeli, tehlikeli görülen durum ve davranışların belirlen-

mesinde aktif rol alan çalışanlar ödüllendirilmelidir (Tutar ve diğ., 2019; TBMM, 2008).

6.2.9 İSG Donanımları: “Risk kontrol adımları uygulanırken toplu korunma önlemlerine, kişisel korunma önlemlerine kıyasla öncelik verilmesi ve uygulanacak önlemlerin yeni risklere neden olmaması (Bakır ve diğ., 2014)” kriteri kapsamında, önleme ve kontrol tedbirleri hiyerarşisinde “çalışanların risklere maruziyetlerinin engellenmesi sürecinin son aşaması” olarak ele alınan toplu ve kişisel koruyucu donanımların varlığı, yapılan işe uygun donanım seçimi ve kullanımı iş yerlerinde önem arz eden bir husustur. Bu bakımdan; İSG donanımlarının varlığı ve kullanımı, çalışanların risklerle karşı karşıya olmasını tam olarak engelleme potansiyeli taşımadıkları için bir uyum kriteri olarak ele alınmıştır.

6.3 Tersanelerde İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Ardıl Göstergeler

6.3.1 Ramak Kala Olay: Ramak kala olay, İSG açısından, tehlikenin riske dönüştüğü fakat çalışanların sağlığına halihazırda olumsuz bir etkide bulunmadığı durum olarak tarif edilmektedir (Bakır ve diğ., 2014). Ramak kala olaylara karşı alınacak tedbirler, maruziyetin etkilerinin daha kritik sonuçlara yol açmaması için son dönemeç olduğu düşünüldüğünde; ramak kala olaylar, ardıl göstergelerin görünürde en hafif hali gibi gözükmeyle beraber, özellikle tersanelerdeki faaliyetlerden kaynaklanan bileşke risklerin varlığı da dikkate alındığında, önlem almak için son uyarı olarak değerlendirilmelidir.

6.3.2 İş Kazası: İş kazaları ve meslek hastalıkları çalışma hayatındaki çalışma koşulları ve iş süreçlerinden kaynaklı tehlike ve risklere yönelik yeterli önlemin alınmadığının en kritik ardıl göstergeleridir. Dünyada özellikle gelişmekte olan ülkelerde söz konusu olan göç, düşük eğitim seviyesi, olumsuz çalışma koşulları ve denetim yetersizliği gibi hususlar nedeniyle iş kazası ve meslek hastalığı sayısında artışlar gözlenmektedir (Karadeniz, 2012). İş kazaları sonucunda, bir yandan çalışanlarının sağlıkları olumsuz etkilenmekte, diğer yandan da iş kazalarının gerçekleşmesinde sorumluluğu olanlar kazanın mali ve hukuki sonuçlarına maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle iş kazaları, İSG disiplininin en temel yaklaşımlarından biri olan insan faktörünün iş yerlerinde yeterince dikkate alınmadığı durum olarak kodlanmalı ve tersane işverenleri ile İSG profesyonellerinin ciddi ve kalıcı önlemler öngörmelerini ve hayata geçirmelerini gerektiren kritik öneme haiz bir gösterge olarak ele alınmalıdır. Tersanelerde meydana gelen iş kazalarının analiz edilmesi, risklerin doğru tespit edilmesi, iş yerlerinde İSG faaliyetlerinin planlı ve sistemli bir şekilde yürütülmesi ve ileride meydana gelebilecek kazaların önüne geçilmesi açısından önemlidir. İş kazası geçiren veya meslek hastalığına yakalanan çalışanlara işe başlamadan önce, söz konusu kazanın veya meslek hastalığının sebepleri, korunma yolları ve güvenli çalışma yöntemleri ile

ilgili ilave eğitim verilmelidir. Ayrıca, herhangi bir sebeple altı aydan fazla süreyle işten uzak kalanlar çalışanlar, tekrar işe başlatılmadan önce geçirmiş oldukları iş kazasına veya tespit edilen meslek hastalığına odaklı İSG yenileme eğitimine tabi tutulmalıdırlar (A. İ. Yılmaz ve diğ., 2015).

6.3.3 Meslek Hastalığı: “Çalışanların kullanılan ekipman, malzeme ve çevresel etkilerden dolayı uğramış oldukları geçici veya kalıcı olabilen hastalık, sakatlık veya psikolojik arıza durumları...” şeklinde tanımlanabilen (Menteşe, İnce ve Özcan, 2017)” meslek hastalığı, tersanelerdeki çalışma koşulları ve iş süreçlerinden kaynaklı tehlike ve risklere yönelik yeterli önlemin alınmadığının en kritik ardıl göstergelerinden bir diğeridir (Karadeniz, 2012). Meslek hastalıkları genelde; tozlar dahil, fiziksel, kimyasal ve biyolojik etmenlerin sebebiyet verdiği ve vücudun solunum sistemi, sindirim sistemi, boşaltım sistemi, kas/iskelet sistemi, kan hücrelerinin oluşumu ile ilgili hematopoetik sistemi ve çoklu organ etkileşimi şeklinde gerçekleşen ve kimyasal maddelerle oluşan hastalıklar, deri hastalıkları, pnömokonyoz ve diğer mesleki solunum hastalıkları, mesleki bulaşıcı hastalıklar ve fiziki etkenlerle olan hastalıklar şeklinde sınıflandırılırlar. Bu kapsamda emeğe dayalı yoğun istihdamın söz konusu olduğu ve farklı branşlarda faaliyetlerin bir arada yürütüldüğü tersanelerde, kullanılan makina ve maddeler ile çalışanlardan ve çevreden kaynaklı diğer risk faktörlerinin de etkileşimi ile meslek hastalığı oluşturan/ tetikleyen durumlarla sıklıkla karşılaşılabilir (Menteşe ve diğ., 2017; Şenol, Barlas ve Özdemir, 2020). Özellikle semptomlarının uzun süre içerisinde ortaya çıkabilmesi nedeniyle onlarca yıla varan maruziyet sürelerinin söz konusu olması ve çalışanların işten kaynaklı olmayan sağlık durumları ile de karşılıklı olarak etkilenebileceği/ tetiklenebileceği gerçeği, bizi meslek hastalıklarının İSG disiplininin en kritik ardıl göstergelerinden biri olduğu sonucuna ulaştırmaktadır.

6.3.4 İş Göremezlik: Her yıl dünya çapında milyonlarca iş kazası meydana gelmekte ve bu kazalar, ölümlü veya kalıcı/ kısmi iş göremezlik oluşturmaları nedeniyle yüzbinlerce çalışana ve yakınlarını etkilemektedir (TBMM, 2008). İş kazası ve meslek hastalıkları sonrasında oluşan iş göremezlikler, çalışanların kaza ve hastalık risklerinden etkilenme derecesini göstermeleri bakımından ve bu süre zarfında sağlık süreçlerinde ortaya çıkan iş göremezlik ödeneği veya geliri şeklindeki sosyal koruma giderleri, iş yerinde ortaya çıkan işgücü açığı ve iş göremezlik oluşturan tehlike ve risklere yönelik alınması gereken tedbirlerin bedeli ile beraber değerlendirildiğinde, iş göremezlik derecesi İSG açısından kaza ağırlık oranına da etki eden kritik bir ardıl gösterge olarak ortaya çıkmaktadır (SGK, 2022).

6.3.5 Çevresel Zararlar: Tersanelerde yürütülen faaliyetlerden kaynaklı olarak ortaya çıkan katı, sıvı ve gaz formundaki kirleticiler, doğrudan ve/veya dolaylı olarak karada, denizde ve havada çeşitli çevresel zararlara yol açmakta ve hem

çevre hem de insan sağlığını olumsuz şekilde etkileyebilmektedir. Tersaneler, farklı yan sanayi kolları içermesi ve birçok sektör için öncü konumda olması nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından önemli riskler içermektedir. Mevcut çalışmada, tersanelerde yürütülen faaliyetlerden kaynaklı olarak ortaya çıkabilen çevresel zararlar bir ardıl gösterge olarak ele alınmış olup, bu zararlar içinde en önemlileri boyama ve raspalama kaynaklı emisyonlar ve uygulama yöntemleri, gemilerden kaynaklı evsel nitelikli atık sular, sintine atıkları ve atık yağlar olarak özetlenebilir. Tüm vatandaşlar gibi tersane süreçlerinde görev yapan çalışanların temiz ve sağlıklı bir çevrede yaşama haklarının T.C. Anayasası'nda hem bir hak hem de bir sorumluluk olarak yer aldığı göz önünde bulundurularak, tersanelerde modern ve çevre dostu üretim tekniklerinin kullanılması, çevre ile ilgili yasal düzenlemelere uyulması, işverenlerin katı, sıvı ve gaz atıkların çevreye zarar vermeyecek şekilde bertarafını sağlamaları ve çevre bilincinin yerleşmesi/ gelişmesi için çalışanlarına gerekli eğitimleri aldırarak üretimde uluslararası kriterlere ulaşılması kritik öneme haizdir (TBMM, 2008).

6.3.6 Üretim Kaybı: Kaynakların hızlı bir şekilde tükenmeye yüz tuttuğu günümüz dünyasında kalıcı bir büyümenin idame ettirilebilmesi için İSG politikalarına öncelik verilmesi gerektiği gerçeğinden hareketle, İSG ile üretim kalitesi ve verimliliğin sıkı bir etkileşim içinde olduğu ve güvenli iş süreçleri sayesinde sürdürülebilirlik ve verimlilik artırılırken iş gücü ve iş günü kayıplarının azaltılabileceği tartışılmaz bir gerçekliktir. İSG uygulamaları ve problemleri iş gücü yönetimi ve verimlilik açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Öyle ki, İSG zafiyetlerinden kaynaklı olarak ortaya çıkan maddi hasar, kalıcı/ kısmi iş görmezlik, çalışanlarda oluşabilecek psikososyal risk etmenleri ve ölümün yanında üretim kaybı da üretim kesintisi ve iş yeri verimliliği bakımından tüm aktörleri derinden etkileyen sonuçlar içerisinde yer almaktadır. Dolayısıyla iş yerlerinde verimlilik kayıplarını oluşturan etmenler değerlendirilirken, sık sık üretim kayıplarının yaşanmasına sebebiyet veren İSG zafiyetlerinin ortadan kaldırılması gerektiği üzerinde de durulmalıdır (Yılmaz, 2014).

6.3.7 Ceza Disiplin Süreçleri: İş sağlığı ve güvenliği açısından yaptırımların yetersizliği, tersanelerde yaşanan iş kazalarının nedenleri arasında sayılmaktadır. 2012 yılından sonra İSG ile alakalı cezalar kanunla ağırlaştırılmakla beraber, bu durumun iş kazalarında dikkate değer bir azalmaya yol açmadığı da aşıkardır (Barlas ve İzci, 2018). İş yerlerinde güvenlik bilinci ve kültürünün tesis edilebilmesi için, tüm aktörlerin öncelikli olarak kendi sağlık ve güvenliklerini sağlamaları için sorumluluk sahibi olmaları gerektiği gerçeğinden hareketle; ceza ve disiplin süreçlerinin de teşvik ve ödül sistemi gibi güçlü bir güvenlik kültürünün tesis edilmesinde etkili alanlardan biri olduğu söylenebilir. Ancak, her ne kadar cezalandırma ödüllendirmeye beraber çalışanlar üzerinde oluşturduğu moral etki anlamında ortaklaşa da, ödüllendirmenin teşvik edici, cezalandırmanın ise

yaptırımlarla ıslah edici özelliği nedeniyle, teşvik ve ödül sistemi, tehlikeli davranış gerçekleşmeden önce aktive olan bir uyum göstergesi olarak konumlandırılmışken, ceza ve disiplin süreçleri ise, tehlikeli davranış gerçekleştikten sonra aktive olan bir ardıl gösterge olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, güvensiz davranışların belli oranlarda önlenmesinin sağlanabilmesi amacıyla, İSG mevzuatının öngördüğü yaptırımların işlevselliği sağlanmalı ve bu yaptırımların yanında işverenler tarafından oluşturulacak bir ceza disiplin sistemi ile tehlikeli görülen durumların oluşmasında aktif rol alanlara yönelik ceza ve disiplin süreçleri işletilmelidir. İş yerlerinde ödül ve ceza sistemini kullanarak İSG uygunsuzluklarının bildirilmesini sağlayan mekanizmalar geliştirmelidirler (Tutar ve diğ., 2019; TBMM, 2008).

6.3.8 İmaj/ İtibar Kaybı: Modern dünyada artık, kaza sıklık ve ağırlık oranları ülkelerin gelişmişlik düzeyinin de bir göstergesi konumuna gelmiştir ve iş kazaları, kazaların büyük oranda önlenabilir olduğu gerçeği de dikkate alındığında kabul edilemez olaylar olarak ele alınmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği konusunda alınan tedbirler iş yerlerinin imajını ve itibarını geliştirebileceği gibi, gerekli önlem ve yatırımlardan kaçınılması, personel ve malzeme kayıplarının yanında, ülkenin, sektörün ve iş yerinin toplumsal imajının olumsuz yönde etkileyebilmekte, itibar ve iş potansiyeli kayıpları gibi olumsuz sonuçlar doğurabilmekte ve sektöre yatırım yapmaktan kaçınılması veya yapılan yatırımların geri çekilmesi gündeme gelebilmektedir (Yılmaz, 2014). Özellikle tersanelerdeki kaza sıklık ve kaza ağırlık oranlarının yüksek olması, ciddi yaralanmalı ve çoklu ölümlü iş kazalarının yaşanması ve tersanelerin İSG bakımından ismi ilk anılan iş yerleri olarak olumsuz bir imaja sahip olmaları, ülkemizde gemi sanayinin itibarının sarsılmasına yol açmış ve sektörün zor günler yaşamasına sebebiyet vermiştir. Bu nedenle tersanelerde iş ile ilgili zararların azaltılması amacıyla aksaklıkların tespiti ve gerekli önlemlerin alınması kritik öneme haiz olup, tersanelerde yaşanan iş kazalarının daha detaylı incelenmesi sayesinde, İSG alanında ciddi iyileştirmeler sağlanabileceği ve İSG tedbirlerinin alındığı bir iş yerinde çalışmanın iş yerine duyulan güveni artıracacağı, iş yerinin prestijini olumlu yönde etkileyeceği değerlendirilmektedir (Tutar ve diğ., 2019; Ceylan, 2016).

6.3.9 Sosyal Koruma Giderleri: Sosyal koruma; bireylerin yaşamlarında karşılaştıkları gelir azaltan ve/ veya gider arttıran sosyal risklere karşı koruyucu bir sistemler bütünü olarak tanımlanabilir (Karadeniz, 2012). Çalışma yaşamında sosyal koruma; bir yandan, sosyal devlet anlayışına sahip siyasal iktidarların yetki ve sorumluluğunda işlevselleşen sosyal güvenlik sistemini öncelikleyen bir gösterge olmasının yanında, diğer yandan da bahse konu sosyal güvenlik sisteminin iş yerlerinden kaynaklı olarak meydana gelen risklerin gelir telafisi yoluyla azaltılması şeklinde işlevselleşen ardıl bir gösterge olarak da karşımıza çıkmaktadır. Sosyal koruma programlarının önleme ve korumayı içeren boyu-

tu siyasal iktidarların yetki ve sorumluluğu altında olması nedeniyle, mevcut çalışmada tersanelerde işverenlerin sorumluluğunda meydana gelen risklere yönelik olarak ortaya çıkan sosyal koruma giderleri ardıl bir gösterge olarak ele alınmıştır.

6.3.10 Meslekte Kazanma Gücü Kaybı: Çalışanlar iş yerlerinde maruz kaldıkları İSG risklerinden dolayı meslekte kazanma güçlerinin tamamını ya da bir kısmını kaybederek sürekli veya geçici iş göremez duruma düşebilmektedirler. Buna göre, iş kazası sonucunda meslekte kazanma gücünü kaybeden bir çalışan, olayda tam kusurlu değilse, meslekte kazanç kayıp oranı % 10 ve daha çok ise, sürekli iş göremezlik gelirin hak kazanabilmektedir (Çulha ve Hüseyinli, 2020). Tersanelerde yapılan çalışmalardan dolayı sürekli iş göremez duruma düşerek meslekte kazanma gücünü kaybedenlerin sayısı azımsanmayacak kadar çoktur (Tanrıverdi, 2019). Meslekte kazanma gücü kaybı, iş kazası ve/veya meslek hastalıkları sonucunda çalışanların sağlığında ortaya çıkan geçici ve/veya kalıcı etkilerin göstergesi olması bakımından ardıl bir gösterge olarak ele alınmaktadır.

6.3.11 İş Davaları ve Tazminatlar: Mesleki risklerin artmasına paralel olarak hastalık ve iş kazalarının sayısındaki artış, diğer istenmeyen sonuçlarına ilave olarak, işverenlerin hatta çalışanların dahi aleyhine maddi ve manevi tazminatlara varan sonuçlara da neden olabilmektedir (Fragiadakis, Tsoukalas ve Papazoglou, 2014; Bilgin ve Ergör, 2020). Ancak, tazminat miktarlarında işveren tarafında çok daha ağır bir tablo söz konusudur. Zira tazminatların büyük kısmı, çalışma ortamından kaynaklanan ve çalışanların sağlığını bozan, sakatlanmalarına ve/veya ölümlerine sebebiyet veren iş kazası veya meslek hastalıkları iddiasıyla çalışanların ve sendikaların yargı süreçlerine başvurusu sonucunda ortaya çıkmaktadır (Güner, 2015; Tansoy, 2017; Akkaya, 2013). Tersanelerde İSG süreçlerinden kaynaklı olarak yargı mercilerine intikal eden durumlar; bu süreçlerde alınması gereken önleyici ve düzeltici tedbirlerin, süreçlerin çalışanların sağlık ve güvenliklerine yönelik yeterli korumayı sağlamadığının ve sürecin işveren, çalışan ve İSG profesyonellerinin müdahale alanının dışına çıktığı durumlar olmaları bakımından dikkate değer ardıl göstergelerdir.

6.4 Öncül, Uyum ve Ardıl Göstergelerin Tersane Süreçlerine Yansıtılması

Yukarıda önerilen öncül, uyum ve ardıl göstergelerin, yürütülen faaliyetler önce-sindeki organizasyon aşamasından itibaren, iş süreçlerine, bu süreçlerdeki potansiyel tehlikelere ve faaliyetler sonucunda gerçekleşen risklere kadar tersane organizasyonuna yansıtılmış bir özeti Şekil 7' de gösterildiği gibidir.

Tersane organizasyonunun planlama aşamasında gözlemlenebilen göstergeler öncül göstergeler ile işler planlandıktan sonra başlayan ve İSG ile ilgili herhangi bir kaza/ olay vb. istenmeyen durum meydana gelmeden önceki göstergeler

TERSANE ORGANİZASYONU	YAPILAN İŞ	TEHLİKE	RİSK
Gemi İnşa Bakım/ Onarım	Tekne ve Güverte Makina Elektrik-Elektronik-Otomasyon	Fiziksel Kimyasal Biyolojik Psikososyal Ergonomik	İş Kazası Meslek Hastalığı
ÖNCÜL GÖSTERGELER	UYUM GÖSTERGELERİ		ARDIL GÖSTERGELER

Şekil 7. Öncül Uyum ve Ardıl Göstergelerin Tersane Süreçlerine Yansıtılması

uyum göstergeleri ile kaza/ olay veya istenmeyen durum meydana geldikten sonraki göstergeler ardıl göstergeler ile eşleştirilmiştir.

Bu eşleştirme yapılırken tersanelerde “gemi inşa” ve/ veya “bakım ve onarım” faaliyetleri yürütüldüğü dikkate alınarak, öncül göstergeler “gemi inşa” ve/ veya “bakım ve onarım” işlevlerine odaklanarak önerilmiştir.

Yine tersanelerde fiili olarak gerçekleştirilen faaliyetlerin tekne ve güverte, makina ve/ veya elektrik- elektronik-otomasyon ana branşları altında yapılan işler olduğu ve çalışanların bu işler yapılırken potansiyel tehlike kaynaklarından ortaya çıkan fiziksel, kimyasal, biyolojik, psikososyal ve ergonomik risk etmenlerine maruziyetlerinin söz konusu olduğu dikkate alınarak uyum göstergeleri yapılan işlere ve maruziyet risklerine odaklanarak önerilmiştir.

Son olarak da ardıl göstergeler, faaliyetler sonucunda ortaya çıkan ve/ veya faaliyetler devam ederken işin durdurulmasını gerektiren istenmeyen durumlara odaklanarak önerilmiştir.

6.5 Öncül, Uyum ve Ardıl Göstergelerin Risk Değerlendirme Yöntemleri İle Beraber İrdelenmesi

6.5.1 Literatürdeki Tersanelere Yönelik Risk Değerlendirme Çalışmalarına Genel Bir Bakış

İSG disiplininde temel amaç iş yerlerindeki çalışma koşullarından kaynaklanan her türlü sağlık ve güvenlik risklerini çalışan sağlığını etkilemeyecek seviyeye indirmektir. Risk değerlendirmesi İSG disiplinin bu temel amacına yönelik en kritik önleyici faaliyeti teşkil etmektedir ve iş yerlerinde İSG’ ye yönelik risk değerlendirmesi yapılması, işverenlerin öncelikli sorumluluğudur. Bu bakımdan; risk değerlendirmesinden beklenen verimin elde edilebilmesi için; tehlikeler ile risklerin en doğru şekilde tanımlanıp belirlenmesi, analiz edilip gerekli önlemlerin alınması ve bunun için en uygun analiz yöntemlerinin uygulanması önem arz etmektedir (Adalı, 2010; Çetinkaya, 2014).

Hemen hemen bütün risk değerlendirme yöntemlerinde tehlikelerin tanımlanması ve risklerin belirlenmesi suretiyle istenmeyen sonuçların meydana gelme olasılığı ile çalışanların bu istenmeyen sonuçlardan etkilenme derecesinin azaltılması en temel yaklaşımdır. Yapılan işe uygun tüm tehlikelerin tanımlanmasının ve tanımlanan tehlikelerin kaynağında tespit edilip yok edilmesinin İSG önlem hiyerarşisinin en temel işlevi olduğu gerçeğinden hareketle; tehlikelerin öncül göstergelere odaklanılmak suretiyle tanımlanması ve uyum göstergelerine odaklanılarak kaynağında önlem alınması, istenmeyen sonuçların meydana gelme olasılığını azaltması bakımından, İSG disiplinin temel amacının gerçekleştirilmesine yönelik en kritik eşiği oluşturmaktadır. Yine, çalışanların istenmeyen sonuçlara maruziyet derecesini azaltmak için, uyum göstergelerinin yanında ardıl göstergelere de odaklanılmak suretiyle düzeltici tedbirlerin alınması da ikincil kritik eşiği oluşturmaktadır.

İş yerlerinde kullanılan ve sadece olasılık ile şiddet skorlarını içeren sınırlı değerlendirmeye dayanan risk değerlendirme yöntemleri, öngörülen tedbirlerin tam olarak benimsenmemesine ve bu nedenle çözüm uygulamalarının gecikmesine, hatta gerçekleşmemesine sebebiyet verebilmektedir (Akın ve diğ., 2020). Bu bakımdan; tersaneler gibi karmaşık süreçler içeren ve iletişim, koordinasyon ve iş birliğinin kaçınılmaz olduğu çok tehlikeli iş yerlerinde; “Zararın Gerçekleşme Olasılığı” ile “Riskin Şiddeti” parametrelerinin yanında, “Fine-Kinney Yöntemi” nde yer alan “Tehlikeye Maruz Kalma Sıklığı”, “Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA)” nde yer alan “Zarar Meydana Getirecek Durumun Keşfedilmesinin Zorluk Derecelendirilmesi” veya “X Tipi Matris Yöntemi” nde yer alan “Önceden Gerçekleşmiş Bir Olayın/ Kazanın Tekrarlanma Olasılığı” ile “Önceden Gerçekleşmiş Bir Olayın/ Kazanın Etkilediği Personel Sayısı” veya “İş Güvenliği Analizi Yöntemi” nde yer alan “İşlere Yönelik Görevlerin Tanımlanması” gibi ilave parametrelerin varlığı, bahse konu yöntemlerin kullanılmasını risk değerlendirmesinin hassasiyeti ve başarısı bakımından tercih sebebi haline getirmektedir.

6.5.2 “Fine-Kinney Yöntemi” nin Göstergeler Üzerinden İrdelenmesi: Bu yöntemde; “Zararın Gerçekleşme Olasılığı”, “Tehlikeye Maruz Kalma Sıklığı” ve “Riskin Şiddeti” olarak sıralanan üç faktörün bileşkesi şeklinde tanımlanan bir “Risk Öncelik Değeri” söz konusudur ve alınacak önlemin seviyesine bu değere göre karar verilmektedir (Akın ve diğ., 2020; Tansoy, 2017).

Fine Kinney Yöntemi” nin özgün tarafı, tehlike meydana geldiğinde kaza/ hasarın olasılığı ile, tehlikenin ne sıklıkla (frekans) meydana geldiği arasına koyduğu ayırımı yatmaktadır. Bahse konu olasılık ve frekans arasında net ve objektif bir ayırım konulamamasından kaynaklı birtakım güçlükler söz konusudur. Bu faktörlerin “Risk Öncelik Değeri” ni doğrudan etkilediği ve alınacak tedbirlerde öncelik sırasının belirlenmesinde kritik öneme sahip oldukları için, bahse konu güçlüklerin azaltılması gerekmektedir. Bunun için tehlikeler tek tek belirlenerek, olasılık

ve frekans atamasının daha anlaşılır şekilde yapılması sağlanmaya çalışılsa da, bu durum tehlikelerin bileşke etkisinin değerlendirmesindeki güçlüğü ortadan kaldırmamaktadır (Birgören, 2017).

Bu durumda, “Zararın Gerçekleşme Olasılığı” nın yanında “Tehlikeye Maruz Kalma Sıklığı”nın öncül göstergelerden başlamak suretiyle, göstergeler üzerinden irdelenerek belirlenmesi, daha net ve objektif sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

6.5.3 “FMEA Yöntemi” nin Göstergeler Üzerinden İrdelenmesi: FMEA yönteminin temeli; herhangi bir sistemin tamamı veya bölümlerinin ele alınıp, bunlardaki kısımlar, aletler ve bileşenlerde ortaya çıkabilecek arızalardan nasıl etkilenebileceğine ve ortaya çıkabilecek sonuçların analiz edilmesine dayanmaktadır (Tansoy, 2017). Yöntemde “Her Bir Zarar Modunun Oluşma Olasılık Değeri”, “Zararın Ne Kadar Önemli Olduğunun Değeri” ve “Zarar Meydana Getirecek Durumun Keşfedilmesinin Zorluk Derecelendirilmesi” faktörlerinin bileşkesinden oluşan bir “Risk Öncelik Sayısı” sözkonusudur. “Risk Öncelik Sayısı” nın en büyük değerinden başlanarak tedbirler alınmaya ve kritik olayların meydana gelmeleri önlenmeye çalışılmaktadır. “FMEA Yöntemi” nin diğer yöntemlere göre özgün tarafı, “hata türü” olarak ifade edilen tehlikelerin ve oluşma olasılıklarının istenmeyen sonuçlara yol açmadan farkedilebilirlik derecesinin (hatayı keşfetme zorluğunun) yöntemde belirleyici olmasıdır. Öyle ki, hata türünün ve olası etkilerinin farkedilebilirliği ne kadar zor ise, “Risk Öncelik Sayısı” o kadar büyük olacak ve farkedilmesi zor olan hata türleri, öncelikli olarak tedbir alınması gereken durumlar olarak karşımıza çıkacaktır. Dolayısı ile “FMEA Yöntemi”nde farkedilebilirlik ne kadar artarsa hatayı keşfetmenin zorluk derecesi o kadar düşük olacak ve bu durum da ilgili hata türünden kaynaklı istenmeyen sonuçların oluşmasına karşı etkin önlem alındığının göstergesi olacaktır (Birgören ve Yalçınkaya, 2019; Özkılıç, 2005).

Bu bakımdan; sürecin, öncül göstergelerden başlayarak, göstergeler üzerinden sırasıyla irdelenmesi suretiyle, farkedilebilirliğin daha da artırılması mümkün olacak ve bu şekilde tehlikelerden kaynaklı istenmeyen sonuçların ortaya çıkması daha güçlü şekilde engellenmiş olacaktır.

6.5.4 “X-Tipi Matris Yöntemi” nin Göstergeler Üzerinden İrdelenmesi: X tipi matris yöntemi, çok boyutlu düşünce yoluyla problemlerle konuların açığa kavuşturulmasına katkı sağlayan ve bir problemin veya olayın içinde yer alan veya problem veya olay üzerinde etkide bulunan faktörlerin tanımlanmasını ve aralarındaki ilişkinin belirlenmesini sağlayan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yöntemin uygulanmasında “Olayın/ Kazanın Gerçekleşme Olasılığı” ile “Olayın/ Kazanın Şiddeti” nin yanı sıra, “Önceden Gerçekleşmiş Bir Olayın/ Kazanın Tekrarlanma Olasılığı” ile “Önceden Gerçekleşmiş Bir Olayın/ Kazanın Etkilediği Per-

sonel Sayısı” da değerlendirilmekte; iş yerlerinde geçmiş kazaları ortaya çıkaran nedenler de belirlenmeye çalışılarak tekrarlama olasılıkları araştırılmaktadır. “X-Tipi Matris Yöntemi”nde risk skorunun sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmesi için en az birkaç yıllık geçmiş kaza ve hastalık araştırmasına ihtiyaç duyulmakta olup bu istatistiklerinin sıkı bir şekilde kayıt altına alınması gerekmektedir. İnşaat sektöründe veya dar anlamıyla tersanelerde iş kazası sıklığı diğer sektörlerle nazaran nispeten daha fazla olduğu için, bu durum “X-Tipi Matris Yöntemi”nin inşaat sektörü için uygun bir risk değerlendirme yöntemi olabileceğine işaret etmektedir (Özkılıç, 2005).

İş kazası ve meslek hastalıkları, iş sağlığı ve güvenliği bakımından en kritik ardl göstergelerdir. Dolayısı ile, gerçekleşmiş olan iş kazası veya meslek hastalıklarına yönelik olarak öncül ve uyum göstergelerine odaklanılarak alınacak tedbirlerin, ilerleyen süreçlerde meydana gelebilecek iş kazaları ve meslek hastalıklarının sıklık ve ağırlık oranlarını önemli ölçüde azaltacağı gerçeğinden hareketle, bu risk değerlendirme yönteminde de göstergelere odaklanılarak alınacak tedbirler kritik öneme haiz olmaktadır.

6.5.5 “İş Güvenliği Analizi Yöntemi” nin Göstergeler Üzerinden İrdelenmesi: “İş Güvenliği Analizi Yöntemi” gerçekleştirilen işlerdeki görevlere yoğunlaşan, işi alt parçalara ayırarak bu görevlerden kaynaklanan potansiyel tehlikeleri irdeleyen ve bu suretle alınacak önlemlerin belirlenmesine katkı sağlayan bir yöntemdir. “İş Güvenliği Analizi Yöntemi”nin başarılı olabilmesi için yöntemin her aşamasında hangi işlerin ne şekilde yapılacağına açık ve net biçimde tanımlanması ve bu işlere yönelik görev tanımlarının sıkı bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir (Çetinkaya, 2014).

Tersanelerin iletişim, koordinasyon ve iş birliği gerektiren karmaşık faaliyetler yürütülen iş yerleri olmaları nedeniyle, yukarıda bahsedilen iş süreçlerinin ve görev tanımlarının belirtildiği gibi açık, net ve sıkı bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir. Bu bakımdan; faaliyetlere yönelik ana süreçlerin alt süreçlere ayrılarak her bir sürece yönelik belirlenecek ekipmanların ve tespit edilecek görev tanımlarının öncül, uyum ve ardl göstergelere odaklanarak analiz edilmesi, bu yöntemin başarısına ciddi oranda katkı sağlayacaktır.

7. Sonuç, Tartışma, Öneri ve Değerlendirmeler

İş sağlığı ve güvenliği disiplininin ülkemizde müstakil bir kanun olarak uygulanmaya başlandığı 2012 yılından bu yana, uygulamaların etkinliğini ve performansını irdeleyebilmek amacıyla bu çalışmada öncül, uyum ve ardl göstergeler önerilmiştir.

İş kazalarının en acı sonucu çalışanların yaşamlarını kaybetmeleri, ağır yaralanmaları veya ömür boyu sakat kalmalarıdır. Bundan dolayı özellikle ağır yara-

lanmalı ve/ veya ölümlü kazalar günümüz modern dünyasında kesinlikle kabul edilemez olaylar olarak değerlendirilmektedir. Öyle ki; büyük oranda önlenabilir nitelikte olan iş kazalarından dolayı insanların yaşamlarını kaybetmesi veya ağır yaralanmaları bir taraftan çalışanların kendilerinde ve ailelerinde onarılması güç travmalara sebebiyet verirken, diğer taraftan bu vakaların gerçekleştiği ülkelerin, sektörün ve iş yerlerinin de itibarlarında ciddi manada erozyona sebep olmaktadır (Ceylan, 2016).

Bilindiği üzere, en çok iş kazası inşaat sektöründe yaşanmaktadır. İnşaat sektörünün özel bir kolu olarak bilinen tersanelerde iletişim, koordinasyon ve iş birliğinin en üst seviyede tutulması gereken karmaşık ve çok tehlikeli süreçler söz konusudur (Çevi ve İlkbahar, 2018). Bugüne dek, İSG disiplinin nihai amacı olan “sıfır iş kazası, sıfır meslek hastalığı” kriteri, İSG bilincinin ve kültürünün oluşmadığı iş yerlerinde kazalar ve hastalıklar gizlenerek yerine getirilmiş algısı oluşturulabilmekte veya bildirim yapılırsa dahi, İSG disiplininin etkinliği ve performansı sadece iş kazası ve meslek hastalığı gerçekleşme sayısına göre ölçülmektedir.

SGK istatistiklerinden yola çıkarak yaptığımız tespitlerde, İSG disiplininin müstakil bir kanun olarak uygulanmaya başlandığı 2012 yılından bu yana gerçekleşen iş kazaları ve meslek hastalıklarına ait istatistikler bize, iş kazaları ve meslek hastalıklarının azaldığına dair bir işaret verememektedir. Ancak, özellikle SGK’ nın iş kazası tanımına göre, iş ve iş yeri ile illiyet bağı olan tüm olaylar iş kazası olarak telakki edildiği için, 2012 yılından itibaren yasal işleme maruz kalmamak saikiyle dahi olsa, gerçekleşen kaza/ olayların iş kazası olarak SGK’ ya raporlanma oranının arttığını söyleyebiliriz. 2012 yılından itibaren SGK’ nın iş kazası ve meslek hastalığı bildirimlerine ilave olarak kaza/ olaylardan kaynaklanan iş göremezliklerin de istatistiki veri olarak istatistiklere dahil edilmesi önemli bir adımdır. Böylelikle, 2012 yılına kadar sadece kaza sıklık hızları hesaplanabiliyorken, bu ilave ile iş kazası ağırlık oranlarının da hesaplanabilmesine olanak sağlanmıştır. Ancak SGK istatistiklerinde gemi sanayisinde istihdam edilen çalışan sayısı ile iş kazası sonucu gerçekleşen kalıcı iş göremezliklerin sayısı ayrıca belirtilmediği için özellikle kaza ağırlık oranının kifayetsiz bir şekilde hesaplanmasında halen bir zafiyetin olduğu söylenebilir.

Meslek hastalıklarının tespiti/ bildirimi ile ilgili olarak ise maalesef iş kazalarının bildirimine benzer bir ilerleme katedildiğini söyleyemiyoruz (SGK, 2022). Zira, her ne kadar meslek hastalığı ön tanısı koyma yetkisine sahip sağlık kuruluşları arttırılmış olsa da, özellikle meslek hastalığının gerçekleştiği anda tespitinin pek mümkün olmaması, mümkün olsa dahi iş ile illiyet bağının kurulabilmesinin önündeki engeller, yetkili sağlık kuruluşlarının koydukları ön tanıların SGK Sağlık Kurulları’nda değerlendirilerek kesin tanı haline getirilmesi durumundan ve SGK’ nın bu işlem için, hastanın başvuru yapmasını beklemesinden dolayı, ön

tanı konulan durumların meslek hastalığı olarak tescil edilme oranının çok düşük seviyelerde seyretmesine sebebiyet vermektedir.

Bu bakımdan İSG bilincinin pekişerek bir kültür haline gelebilmesi, sadece uygulamaların sonuçlarına bakarak gerçekleşmeyeceği aşikardır. İş yerlerindeki İSG süreçlerini, etkin bir iletişim, koordinasyon ve iş birliği anlayışıyla idame ettirmek son derece önemlidir. Bu bakımdan, İSG önlem ve koruma hiyerarşisinde “önleyici tedbirlerin” ve “tehlikeleri kaynağında önleme ilkesinin” esas tutulduğu da dikkate alınarak, iş yerlerinin faaliyetlere başlamadan önce İSG bakımından alınabilecek birçok önleyici tedbir bulunmaktadır.

İşyerlerinde İSG tedbirlerin belirlenmesi ve uygulanması süreçlerinde, etkinliğin ve performansın gözlemlenebilmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada; öncül, uyum ve ardıl göstergeler şeklinde İSG göstergelerinin tanımlanabileceği gösterilmiştir. Böylelikle işyerlerinde yürütülen faaliyetlerin bu göstergeler eşliğinde irdelenmesi mümkün olabilecektir. Ayrıca öncül ve uyum göstergelerine odaklanarak yapılacak risk değerlendirmesiyle ve buna istinaden gerçekleştirilecek önleyici faaliyetlerle istenmeyen ardıl göstergeler asgari seviyeye indirilebilecektir.

Kaynakça

- Adalı, P. (2010). *Tersanelerde ekipmanlara bağlı kaza olasılıklarının değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akın, G. C., Eren, Ö., Oral, H. V. ve Heperkan, H. A. (2020). Yeni bir risk değerlendirme yöntemi ile tersane işletmelerinin sınıflandırılması. *Business & Management Studies: An International Journal (BMIJ)*, 8(1), 232-254, doi:http://dx.doi.org/10.15295/bmij.v8i1.1349.
- Akkaya, H. (2013). *Tersanelerde İSG tedbirleri ve işverenin sorumluluğu*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Bakacak, M. (2007). “Gemi İnşa ve Onarım Faaliyetlerinde Meydana Gelen Kazaların Analizi”, Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Bakır M., Şerbetçioğlu A., Gümüş E. ve Sağlam D. (2014). *TMMOB elektrik mühendisleri odası İSG mevzuatı 2013*. ISBN: 978-605-01-0568-1, EMO Yayın No: GY/2014/562, TMMOB EMO Yayını, Ankara.
- Barlas, B. (2012). Occupational Fatalities In Shipyards: An Analysis In Turkey, *Brodo Gradnja*, 63 (1), 35-41.
- Barlas, B. ve İzci, F.B. (2018). Individual and workplace factors related to fatal

- occupational accidents among shipyard workers in Turkey. *Safety Science*, 101(2018), 173-179, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2017.09.012.
- Bilgin, A.C. ve Ergör, A. (2020). İSG profesyonelleri için bir yetkinlik alanı olarak iş yerinde yönerge (talimat) yazımı. *Çalışma ve Toplum*, 2020/3, 1593-1612.
- Birgören, B. 2017. "Fine Kinney Risk Analizi Yönteminde Risk Analizi Yönteminde Risk Faktörlerinin Hesaplama Zorlukları ve Çözüm Önerileri", Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, cilt 9, sayı 1, s. 19-25.
- Birgören, B., Yalçinkaya, M. 2019. "İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesinde Hata Türleri ve Etkileri Analizinin (FMEA) Kullanımı", Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, cilt 11, sayı 1, s. 41-50.
- Ceylan, H. (2016). 2014 yılında Türkiye'de meydana gelen ölümlü iş kazalarının analizi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, cilt 8, sayı 1, s. 20-30.
- Cumhurbaşkanlığı Devlet Denetleme Kurulu. (2008). *Tersanecilik Sektörü ile İSG Açısından Tuzla Tersaneler Bölgesinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi Hakkında Araştırma ve İnceleme Raporu Sayı: 2008/1*. <http://www.tccb.gov.tr/sayfa/cumhurbaskanligi/ddk/ddk25.pdf>, erişim tarihi: 24.12.2009.
- Çebi, S. ve İlkbahar, E. (2018). Tersanelerde yaşanan mesleki risklerin analizi için bulanık papyon model önerisi. *Journal of ETA Maritime Science (JEMS Journal)*, 6 (2), 141-157, DOI ID: 10.5505/jems.2018.30932.
- Çetinkaya, O. (2014). Tersanelerde iş güvenliği analizi (JSA). *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul.
- Çulha, Ş. ve Hüseyinli, N. (2020). İnşaat sektöründe iş güvenliği uzmanları açısından yüksekte çalışma uygulamalarının değerlendirilmesi. *Çalışma ve Toplum*, 2020/3, 1431-1462.
- Fragiadakis, N.G., Tsoukalas, V.D. ve Papazoglou, V.J. (2014). An adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model for assessing occupational risk in the shipbuilding industry. *Safety Science*, 63(2014), 226-235, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.11.013>.
- Güner, R. (2015). İSG kanununa göre işveren vekili kimdir? İşveren vekilinin sorumlulukları nelerdir? *İSMMM Mali Çözüm Dergisi*, Mayıs-Haziran 2015, Sayfa : 169 -176.
- Karadeniz, O. (2012). Dünyada ve Türkiye'de iş kazaları ve meslek hastalıkları ve sosyal koruma yetersizliği. *Çalışma ve Toplum*, 2012/3, 15-75.

- Kayabaşı, R. (2019). İşyeri İSG politikalarının çalışanların örgütsel bağlılığına etkisi. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, 8 (2): 133-143.
- Menteşe, G., İnce, E. ve Özcan B. (2017). Gemi inşa sanayinde İSG bilincinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, cilt 58, sayı 688, s. 53-78.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2020). *Center for maritime safety and health studies: shipyards*. <https://www.cdc.gov/niosh/programs/cms/shipyards.html>, erişim tarihi: 07.01.2020.
- Özkılıç, Ö. 2005. "Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri, Ankara", http://egitim.druc.com.tr/upload/docs/26042012105841_vAq1THf-6-105841_risk-analizi-ozlem-ozkiliç-kitabi.pdf, son erişim tarihi: 24.01.2023.
- Pawlowska Z. (2015), "Using lagging and leading indicators for the evaluation of occupational safety and health performance in industry", *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, 2015, Vol. 21, No. 3, 284-290, <http://dx.doi.org/10.1080/10803548.2015.1081769>.
- SGK. (2022). *SGK 2007-2020 istatistik yıllıkları, SGK Yayınları*, Ankara. http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari, son erişim tarihi: 06.11.2022.
- Sheehan C., Donohue R., Shea T., Cooper B., De Cieri H. (2016), "Leading and lagging indicators of occupational health and safety: The moderating role of safety leadership", *Accident Analysis & Prevention*, July 2016, Volume 92, Pages 130-138, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2016.03.018>.
- Şenol, S., Barlas, B. ve Özdemir, Y.H. (2020). Türkiye' de meslek hastalıkları ve tersaneler. *Journal of Humanities and Tourism Research*, 10 (1): 55-68, DOI: 10.14230/johut758.
- Tanrıverdi, M. (2019). *Gemi inşa sanayinde İSG Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Tansoy, T.R. (2017). *Tersanelerde iş kazalarının önlenmesinde alınması gereken tedbirler ve risk analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Tari, İ. (2014). Dünyada gemi bakım-onarım sektörü ve gemi bakım-onarımının ekonomik maliyetinin modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Topaktaş, E. (2011). Gemi bakım ve onarımı. *Mühendis ve Makina*, cilt: 52, sayı: 623, s. 64-66.
- Tutar, H., Nam, S., Nam, D. (2019). İş kazalarının önlenmesinde güvenlik kültürü-

rünün belirleyicileri: Gemi inşa sanayi üzerine bir araştırma. *International European Journal of Managerial Research Dergisi (EUJMR)*, 3(4), 99-118.

Yılmaz, A.İ. (2014). Tersaneler için tersane kaza analiz ve yönetim sistemi (TKAYS) kurulması. Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul.

Yılmaz, A. İ. Yılmaz, F. ve Çelebi, U. B. (2015). Analysis of shipyard accidents in Turkey. *British Journal of Applied Science & Technology*, 5(5): Article no.BJAST.2015.045 ISSN: 2231-0843, 472-481, DOI: 10.9734/BJAST/2015/14126.

Zaman, M.B., Baheramsyah, A. ve Ashari, I. (2020). Analysis of work accident factors in the shipyard, ISOCEEN 2020 IOP Publishing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 698 (2021) 012016 doi:10.1088/1755-1315/698/1/012016.

Zaman, M.B., Pitana, T. ve Septianto, A.B. (2019). Identification of occupational accident relations of shipyard labour in terms of individual and workplace factors. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, Vol. 3 (4), 134-140.

Zengin T. (2015). *Ulusal/ uluslararası mevzuat ve belgelerde İSG*. Türk Harb-İş Sendikası Eğitim Yayınları, Ankara.



FLOROPOLİMERLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ VE SIZDIRMAZLIK SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Ezgi ÖZGÜNERGE FALAY¹, Burcu ÇALIŞKANELLİ², Öz Erman ARUSAN³,
Lütfiye ALTAY⁴, Mehmet SARIKANAT⁵

¹ Dr. Çevre Mühendisi, ARNES Mekanik Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Tasarım Merkezi,
ORCID: 0000-0001-6264-2795

² Kimya Mühendisi, ARNES Mekanik Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Tasarım Merkezi,
ORCID: 0000-0001-9188-8145

³ Makine Mühendisi, ARNES Mekanik Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., Tasarım Merkezi,
ORCID: 0000-0002-6312-8533

⁴ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir,
ORCID: 0000-0003-4946-3615

⁵ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0001-7535-6819

Anahtar kelimeler

Öz

Floropolimerler, PTFE, PFA, geri dönüşüm, sürdürülebilirlik, sıfır atık

Floropolimerler, üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalarından dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal stabilite, kimyasal inertlik, düşük yüzey sürtünmesi, hava koşullarına mükemmel dayanıklılık ve oksidasyona karşı direnç gibi üstün özelliklere sahip olmaları nedeni ile otomotiv, havacılık, kimya, petrokimya, elektrik-elektronik gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Floropolimerlerin pek çok çeşidi bulunmakla birlikte endüstriyel uygulamalarda en çok PTFE (Politetrafloroetilen) ve PFA (Perfloroalkoksi) kullanımı tercih edilmektedir. Sızdırmazlık sektöründe kullanılmaları durumunda ekipmanın ve sızdırmazın faydalı ömrünü uzatmakta, bakım-onarım maliyetini azaltmaktadır. Bu nedenle piston keçesi, boğaz keçesi, toz keçesi ve yataklama elemanı malzemesi olarak

¹ Sorumlu yazar; e-posta: ezgif@jetseal.com.tr
doi : muhendismakina.1319160

yaygın olarak tercih edilirler. Ülkemizde floropolimer malzeme tedarikinin büyük bir kısmı yurtdışından sağlanmaktadır ve ithalat işlemi oldukça maliyetlidir. İşletmelerde PTFE ve PFA floropolimerleri kullanıldıktan sonra ortaya çıkan atıklar uygun geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilir. Bu sayede floropolimer malzeme tedarikinde yurtdışı bağımlılığı azaltılmış ve atıkların sürdürülebilirliği sağlanarak sıfır atık oluşmuş olacaktır. Bu bildiride, PTFE ve PFA floropolimerlerinin sızdırmazlık sektöründeki kullanım yerleri ve üretimde hammadde olarak kullanılmalari sonucunda oluşan atıklarının geri dönüşüm yöntemleri incelenmiştir.

RECYCLING OF FLUOROPOLYMERS AND APPLICATIONS IN THE SEALING INDUSTRY

Keywords

Fluoropolymers, PTFE, PFA, recycling, sustainability, zero waste

Abstract

Fluoropolymers are generally used in industrial applications due to their excellent physical and chemical properties. It is used in automotive, aerospace, chemistry, petrochemistry and electrical-electronic industries due to its excellent properties such as thermal stability, low surface friction, chemical inertness, excellent resistance to weather conditions and resistance to oxidation. Although there are many types of fluoropolymers, PTFE (Polytetrafluoroethylene) and PFA (Perfluoroalkoxy) are mostly preferred in industrial applications. If they are used in the sealing industry, they extend the useful life of the equipment and the sealant, and reduce the maintenance repair costs. For this reason, they are widely preferred as piston seal, rod seal, scrapers and bearing element materials. A large part of the fluoropolymer material supply in our country is provided from abroad and the process is quite costly. Generated waste after the use of PTFE and PFA fluoropolymers in production can be converted into high value-added products by using appropriate recycling methods. In this way, foreign dependency in the supply of fluoropolymer materials will be reduced and zero waste will be created by ensuring the sustainability of waste.

Derleme Makalesi

Başvuru Tarihi : 07.12.2022

Kabul Tarihi : 15.02.2023

Review Article

Submission Date : 07.12.2022

Accepted Date : 15.02.2023

Extended Abstract

Introduction

Fluoropolymers are polymeric materials containing fluorine atoms in their chemical structure and are partially or fully fluorinated olefinic polymers. Their chemical inertness allows them to be used in hard working environments and in most industrial processes. Fluoropolymers are used in various industries such as automotive, aerospace, electrical-electronics due to their excellent properties such as thermal stability, chemical inertness, low surface friction, excellent resistance to weather conditions and resistance to oxidation. Although there are many types of fluoropolymers, PTFE (Polytetrafluoroethylene) and PFA (Perfluoroalkoxy) are mostly preferred in industrial applications. PFA has similar physical and chemical properties to PTFE. Its chemical resistance and thermal stability are comparable to PTFE. PFA is a member of the high performance fluoropolymer family and was developed as an easily molded or extruded thermoplastic with outstanding properties to expand the usage of fluoropolymers.

Objectives/ Research Purpose

PTFE and PFA are usually used raw materials in the production of sealing elements by machining. The amount of waste generated in the machining of PTFE and PFA raw materials is 10%-25%. These wastes are both an economic loss and an environmental problem. However, the disposal of fluoropolymer wastes creates an additional cost for companies. It is foreseen as an effective solution method for businesses to carry out studies on the recycling of raw materials used in order to prevent environmental damage and material loss. In this paper, general information is specified about the usage areas of PTFE and PFA fluoropolymers in the sealing technologies and the recycling methods of wastes generated as a result of their use as raw materials in production.

Results/ Findings

Recycling studies have started within the scope of the Solid Waste Control Regulation, which has been implemented in Turkey since 1991. These studies have been continued for more than 20 years. The idea of "use-throw" has changed over time to "use-recycle-reuse" in the world. The situation is improving for polymers, which are the materials where the "use-throw" routine is mostly applied with recycling studies. High rates recycling of polymers, which have existed in nature for thousands of years without being destroyed, will ensure the protection of our natural resources.

The recycling rate in Turkey is 22.4% for all waste materials. This rate continues to rise with the recycling projects carried out in Turkey. Within the scope of Zero Waste Project, which was begun a few years ago in our country, savings are achieved in terms of both energy and raw material needs by recycling the waste materials generated in the enterprises and reusing them as raw materials in new products. Considering the possibility of running out of natural resources, it is necessary to pay attention to their efficient use and recycling of wastes. Accordingly, the importance of zero waste studies developing in our country is increasing.

Fluoropolymers are generally used in industrial applications due to their excellent mechanical and chemical properties. Fluoropolymers, especially PTFE and PFA, are highly preferred because they have similar superior chemical and physical properties such as high chemical resistance, hydrophobicity, wide operating temperature range, and high abrasion resistance. For this reason, it has application areas in many different sectors such as automotive, aerospace, electrical-electronics, medical, energy conversion. Due to their superior lubricating properties, high wear resistance and ability to operate at high temperatures, they have the potential to be widely used, especially in sealing technologies. After using PTFE and PFA materials in enterprises, fluoropolymer wastes can be converted into high value-added products by using appropriate recycling methods. In this way, foreign dependency in the supply of fluoropolymer materials will be reduced and zero waste will be created by ensuring the sustainability of waste.

1. Giriş

Floropolimerler, 1938 yılında New Jersey'deki DuPont's Jackson Laboratuvarı'nda kimyager Dr. Roy J. Plunkett tarafından yeni kloroflorokarbon soğutucuları araştırılırken bulunmuştur. Araştırmalar sırasında 100 pound tetrafloroetilen gazı üretilmiş ve klorlama öncesinde küçük silindirler içine konularak çok düşük sıcaklıklarda saklanmıştır. Hazırlanan silindirlerden biri kontrol edildiğinde, dışarıya gaz çıkmadığı halde silindirin gaz yokken sahip olduğu ağırlığı koruduğu, silindir açıldığında ise içerisinde beyaz bir toz olduğu görülmüştür. Araştırmalar sonucunda, bu maddenin ısıya karşı dirençli, kimyasal olarak inert ve çok düşük yüzey sürtünmesine sahip olan floropolimer olduğu sonucuna varılmıştır (Ebnesajjad, 2017).

Floropolimerler, kimyasal yapılarında flor atomları bulunan polimerik malzemeler olup genellikle kısmen veya tamamen florlanmış olefinik polimerlerdir (Ebnesajjad, 2017). Floropolimerler, perflorlu ve kısmen florlu polimerler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Bazı floropolimerler, karbon veya flor elementleri dışında az miktarda farklı elementler de içerebilir. Etilen tetrafloroetilen kopolimer (ETFE), tetrafloroetilen (TFE), politetrafloroetilen (PTFE), perfluoroetilenpropil kopolimer (FEP), perfloroalkoksi (PFA), poliklorotrifloroetilen (PCTFE), etilen trifloroetilen kopolimer dâhil birçok çeşit floropolimer vardır. Floropolimerler; termal stabilite, kimyasal inertlik, düşük yüzey sürtünmesi, hava koşullarına mükemmel dayanıklılık ve oksidasyona karşı direnç gibi üstün özelliklere sahip olmaları nedeniyle otomotiv, havacılık, elektrik-elektronik gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (Ameduri, 2018).

2. Floropolimerlerin Özellikleri ve Kullanım Alanları

2.1 Floropolimerlerin Özellikleri

Floropolimerler, üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmalarından dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal inertlik özelliğine sahip olmaları zorlu çalışma ortamlarında ve çoğu endüstriyel işlemden kullanılabilmelerini sağlamaktadır. Floropolimer malzemeler sert olarak kabul edilmezken, (-200)°C'lerde sertliklerini koruma, kimyasal inertlik, elektrik yalıtım ve alev geciktirme özellikleri bu malzemeleri elektrik endüstrisinin vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir (Şekil 1). Floropolimerlerin pek çok çeşidi bulunmakla birlikte endüstriyel uygulamalarda en çok PTFE (Politetrafloroetilen) ve PFA (Perfloroalkoksi) kullanımı tercih edilmektedir. Teflon, PTFE polimerinin ticârî adı olup, florlanmış etilen polimeri olan bir politetrafloroetilendir. Isıya, kimyasallara, neme ve sürtünmeye karşı dayanıklı olan PTFE hiçbir malzemeye yapışmaz.



Şekil 1. Floropolimer hammaddelere bazı örnekler

PTFE ve PFA floropolimerleri yaklaşık olarak 260°C sürekli çalışma sıcaklığına sahiptir. Erime noktaları ise sırasıyla yaklaşık olarak 320°C ve 305°C'dir. 260°C üzerindeki sıcaklıklarda PTFE'nin kimyasal yapısı bozulmaya başlar, 350°C civarında ise kimyasal yapı tamamen bozulur. Bu nedenle, 290°C'ye kadar olan sıcaklıklarda verimli bir şekilde kullanılabilir. Düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olması PTFE'yi aşınmaya ve kimyasallara karşı dirençli bir hale getirmektedir (Akıncı, Akbulut ve Yılmaz, 2003). PFA, PTFE ile benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Kimyasal direnci ve termal stabilitesi PTFE ile karşılaştırılabilir seviyededir. PFA, yüksek performanslı floropolimer ailesinin bir üyesi olup, floropolimerlerin kullanım aralığını genişletmek amacı ile olağanüstü özelliklere sahip, kolayca kalıplanmış veya ekstrüde edilmiş bir termoplastik olarak geliştirilmiştir. Özellikle yüksek ve düşük sıcaklık gerektiren ortamlarda kullanım için mükemmel kimyasal kararlılığa, elektriksel özelliklere ve mekanik dayanıklılığa sahip bir termoplastiktir. Yaklaşık 300°C - 310°C gibi yüksek erime sıcaklıklarına sahip bir malzeme olup, kolay üretilen, yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özellikler sergileyebilme avantajlarına sahiptir (Ebnesajjad, 2015). PFA, yaklaşık 260°C gibi yüksek sıcaklıklarda özelliğini kaybetmeden kullanılabilir. PFA, pişirme sırasında malzeme yüzeyinde porozitesiz ve kaygan bir yüzey tabakası oluşturmaktadır. Bu özelliğinden dolayı kimyasal direncin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılabilir. PFA, hem sıvı hem de toz şeklinde bulunmaktadır. Yüksek yalıtım özelliğinden dolayı kablo ve tel kaplamalarında, yapışmayan yüzey uygulamalarında, korozyon direncinin yüksek olmasını gerektiren ekipmanlarda film veya tüp şeklinde kullanılabilir. 1970'lerde Avrupa'da yağlama gerektirmeyen boğaz keçelerinin ilk defa üretilmesi ile eş zamanlı olarak katkılı PTFE'ler yağ keçesi malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2). Bununla birlikte floropolimerlerin sızdırmazlık sektöründe kullanımı günden güne artmaktadır (Ebnesajjad, 2017).

PTFE ile PFA talaşlı imalat yöntemi ile sızdırmazlık elemanı üretiminde en çok kullanılan hammadde türlerindedir. PTFE ve PFA hammaddelerinin talaşlı imalat ile işlenmesinde ortaya çıkan atık miktarı %10-25 oranındadır. Bu atıklar hem



Şekil 2. Sızdırmazlık elemanlarına örnekler

ekonomik olarak bir kayıptır hem de çevresel açıdan sorun yaratmaktadır. Bununla birlikte PTFE talaşı atıklarının bertarafı firmalara ilave bir maliyet oluşturmaktadır. Çevresel zararı ve maddi kaybı önlemek amacıyla kullanılan hammaddelerin geri dönüşümü ile ilgili çalışmalar yapmak işletmeler için etkili bir çözüm yöntemi olarak öngörülmektedir. Bu bildiride, PTFE ve PFA floropolimerlerinin sızdırmazlık sektöründeki kullanım yerleri ve üretimde hammadde olarak kullanılmaları sonucunda oluşan atıklarının geri dönüşüm yöntemleri hakkında genel bilgilendirme yapılmaktadır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.2 Floropolimerlerin Kullanım Alanları

Floropolimerler çok çeşitli alanlarda kullanılmakla birlikte en yaygın kullanım alanları robotlar, bilgisayarlar, hava taşıtlarındaki elektrikli sistemler, kablo kılıfları ve her türlü elektronik bileşenlerdir. Yüksek elektrik yalıtkanlığına sahip oldukları için son yıllarda devre sistemlerinde de yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde en yeni savunma sistemlerinde kullanılan yüksek hızlı radar, yüksek frekanslı iletişim cihazları ve yeni nesil ultra hızlı bilgisayarların arkasında bulunan küçültülmüş devre kartlarında da bu malzemeler kullanılmaktadır. Floropolimerlerin sürtünme katsayısı çok düşük olduğundan aşınmaya neden olan ortamlarda kullanılması durumunda, aşınmaya karşı oluşan direncin azaltılabilmesi için dolgu malzemeleri eklenmesi gerekmektedir. Günümüzde yüksek performanslı otomobil, hava taşıtı yataklamaları ve contaları yaygın şekilde floropolimerlerden yapılmaktadır. Ayrıca, köprülerde taşıyıcı ayak olarak da genellikle PTFE kullanılmaktadır. Floropolimerler, bakım gerektirmeden uzunca bir süre dış mekânlarda kullanılabilirler. Floropolimerler, biyomedikal alanında kateterlerde, tanılama ve terapötik işlemler gerçekleştiren parçalarda kullanılır. Floropolimerler benzine karşı yüksek direnç gösterir ve bu özelliğinden dolayı otomotiv sektöründe üretilen parçalarda kullanılır. Tablo 1’de floropolimer türlerinin özellikleri ve kullanım alanları gösterilmiştir (Ameduri, 2018).

Tablo 1. Floropolimerlerin Kullanım Alanları (Ameduri, 2018)

Uygulama Alanı	Temel Özellikler	Kullanım Alanları	Kullanılan Floropolimer
Kimya / Petrokimya Endüstrisi	<ul style="list-style-type: none"> • Kimyasal dayanım • İyi mekanik özellikler • Termal kararlılık • Kriyojenik özellikler 	<ul style="list-style-type: none"> • Contalar, gemi gömlekleri, pompalar • Valf ve boru gömlekleri, borular • Kaplamalar • Isı eşanjörleri 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE, PFA/MFA • ETFE, ECTFE • FEP • FKM, FFKM • TFE-P
Elektrik / Elektronik Endüstrisi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük dielektrik sabiti • Yüksek yüzey direnci • Yüksek dielektrik bozulma gerilimi • Alev direnci, termal kararlılık • Düşük kırılma indeksleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Tel ve kablo izolasyonu • Konektörler, optik fiberler • Baskılı devre kartı 	<ul style="list-style-type: none"> • FEP, PTFE, PFA, MFA • ETFE, ECTFE • PCTFE • Amorf FP
Otomotiv / Havacılık Endüstrisi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük sürtünme katsayısı • İyi mekanik özellikler • Kriyojenik özellikler • Kimyasal direnç • Düşük geçirgenlik özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Contalar, o-ringler, hortumlar • Otomotiv hidrolik direksiyon • Aktarımlar ve klima • Rulmanlar, sensörler • Yakıt sistemleri 	<ul style="list-style-type: none"> • FKM, PTFE • FFKM • THV
Kaplama Uygulamaları	<ul style="list-style-type: none"> • Termal/hava kararlılığı • Düşük yüzey enerjisi • Kimyasal direnç 	<ul style="list-style-type: none"> • Tencere kaplamaları • Metal yüzey kaplamaları • Toz boyalar 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE • PVDF, ETFE • FEVE, PFA
Medikal Uygulamalar	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük yüzey enerjisi • Kararlılık, saflık • Mükemmel mekanik özellikler • Kimyasal direnç 	<ul style="list-style-type: none"> • Kardiyovasküler greftler • Kalp yamaları • Bağ replasmanı • Tıbbi ürünler için ambalaj filmleri 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE • PCTFE
Kumaş / Film Uygulamaları	<ul style="list-style-type: none"> • Hava koşullarına dayanıklılık • Alev direnci • Şeffaflık • Düşük yüzey enerjisi • Bariyer özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Binalar/çatılar için kaplamalı kumaşlar ve filmler, güneş enerjisi uygulamaları için ön/arka filmler 	<ul style="list-style-type: none"> • ETFE, PTFE, PVDF • PCTFE, PVE, THV

Polimer Katkı İlavesi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük sürtünme katsayısı • Alev direnci • Aşınma direnci • Yapışmazlık özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüzey kusurlarını önlemek ve daha hızlı üretim için poliolefin işleme • Mürekkepler, kaplamalar, yağlayıcılar, damlama önleyici maddeler için katkı maddeleri 	<ul style="list-style-type: none"> • THV, FKM • PVDF, PTFE
Polimer Katkı İlavesi	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük sürtünme katsayısı • Alev direnci • Aşınma direnci • Yapışmazlık özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüzey kusurlarını önlemek ve daha hızlı üretim için poliolefin işleme • Mürekkepler, kaplamalar, yağlayıcılar, damlama önleyici maddeler için katkı maddeleri 	<ul style="list-style-type: none"> • THV, FKM • PVDF, PTFE
Yarı İletken	<ul style="list-style-type: none"> • Kimyasal direnç • Yüksek saflık • Yapışma önleyici, yalıtım, bariyer özellikleri • Termal kararlılık 	<ul style="list-style-type: none"> • Proses yüzeyleri • Levha taşıyıcıları • Borular, vanalar, pompalar ve bağlantı parçaları • Depolama tankları • Elektrotlar için bağlayıcı • Ayırıcılar • İyon seçici membranlar • Contalar, membranlar • Fotovoltaik filmler • Rüzgâr değirmeni kanatları için kaplamalar 	<ul style="list-style-type: none"> • PFA, ECTFE • PCTE, PTFE • Amorf FP
Enerji Dönüşümü / Depolama / Yenilenebilir Enerji	<ul style="list-style-type: none"> • Kimyasal/ısı direnç • İyon taşıma • Hava koşullarına dayanıklılık • Yüksek şeffaflık • Korozyon direnci 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrotlar için bağlayıcı • Ayırıcılar • İyon seçici membranlar • Contalar, membranlar • Fotovoltaik filmler • Rüzgâr değirmeni kanatları için kaplamalar 	<ul style="list-style-type: none"> • PVDF • PFSA, THV, ETFE • ECTFE, PTFE, FEP • PVF

2.2.1 Politetrafloroetilen (PTFE)

PTFE'nin mekanik özellikleri; çekme dayanımı, çekme modülü, birim şekil değiştirme, darbe dayanımı, eğilme dayanımı, eğilme modülü, süneklik, sertlik ve kalıplama kabiliyetinin incelenmesi ile belirlenir. PTFE'nin en önemli avantajları; mükemmel kimyasal direnç ve düşük sürtünme katsayısıdır. PTFE'nin yaygın kullanım yerlerinden bazıları; yalıtım bantları, contalar, pompalar, yapışmayan yüzey kaplamaları, jeneratörler, transformatörler, laboratuvar araç ve gereçleri, karmaşık otomobil parçalarıdır. Kimyasallara karşı mükemmel direnç göstermesi endüstride bazı filtrelerin yapımında kullanılmasını olanaklı kılmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıpları, yapışmayı ve kalıp aşınmasını önlemek için PTFE malzeme ile kaplanmaktadır. PTFE kaplamaların yüksek performansı, birçok endüstride kullanılmalarını sağlamaktadır. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisindeki özel uygulamalar için PTFE kaplamalar tercih edilmektedir (Akıncı ve diğ., 2003).

PTFE, tribolojik açıdan sahip olduğu benzersiz özellikleri nedeni ile en çok tercih edilen floropolimerlerden biri olup, iyi performans gerektiren uygulamalar için çok idealdir. PTFE'nin, bütün kimyasallara karşı direnci yüksektir ve diğer floropolimerler arasında bilinen en kaygan malzemedir. Düşük yüzey enerjisi nedeni ile üstün hidrofobik yapı sergiler. Yüzeyinin süperhidrofobik olması ve yüzey temas açısının çok düşük olması malzemeye mükemmel dayanıklılık ve bariyerlik özellikleri kazandırır. Aşınma genel olarak malzemenin mekanik özellikleri ile ilişkili olup, PTFE'nin aşınma özelliği, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı ile bağlantılıdır (Dhanumalayan ve Joshi, 2018). PTFE, diğer polimerlerden daha düşük sürtünme özelliğine sahip olmasına rağmen, yapısına dolgu maddesi ilavesi ile iyileştirilerek iyi sürtünme direnci gerektiren ortamlarda kullanıma uygun hale getirilebilmektedir. Kendinden yağlamalı yataklamalarda PTFE malzemesi mükemmel kayma performansı sergilemektedir. PTFE bileşiminde, flor atomlarının birbirine çok yakın bir şekilde bağlanmış olmasından dolayı malzemede pürüzsüz ve silindirik bir yüzey oluşmaktadır (Şekil 3) (Dhanumalayan ve Joshi, 2018).



Şekil 3. PTFE hammaddesi ve malzemeden elde edilen ürünlere örnekler

PTFE sünek bir malzeme olup, diğer polimerler ile karşılaştırıldığında sünekliği diğerlerinden daha düşük kalmaktadır. Bu nedenle PTFE'ye çeşitli katkı maddeleri eklenerek mekanik cihaz parçalarının yapımında kullanılabilir hale getiril-

mektedir. PTFE'nin kendine özgü en iyi özelliği yüksek kimyasal dirence sahip olmasıdır. PTFE, birbirine güçlü bir şekilde bağlı karbon-flor atomlarına sahip olması nedeniyle reaktif değildir ve hidroflik, hidroklorik ve klorosülfonik asitler gibi yaygın reaktiflerde çözünmez. Yüksek moleküler ağırlık, PTFE'nin kimyasal açıdan inert davranış sergilemesini sağlamaktadır. PTFE florokarbon ve diğer moleküller arasındaki etkileşim kuvvetlerinin çok daha az olmasından dolayı hidrokarbonlar, klorlu hidrokarbonlar, ester ve fenol gibi organik çözücülerde çözünmez (Dhanumalayan ve Joshi, 2018). PTFE'nin termal iletkenlik performansı geniş sıcaklık aralığında diğer polimerlerden çok daha iyidir. Termal kararlılık, yaklaşık 320°C'lik yüksek bir erime noktası gösteren karbon-flor atomlarının lineer yüksek kristal yapıda bulunmasından kaynaklanmaktadır. PTFE molekülündeki F atomu simetriktir, molekülün tamamı nötr olup mükemmel dielektrik özelliklere ve elektriksel yalıtıma sahiptir (Dhanumalayan ve Joshi, 2018).

2.2.2 Perfloroalkoksi (PFA)

PFA, perfloroalkoksinin kısaltması olup, PTFE'nin özellikleri ile benzerlik gösteren bir floropolimerdir (Şekil 4). PFA'nın fiziksel ve mekanik özellikleri, bazı durumlarda farklılık gösterse de genel olarak PTFE'ninkilere benzerdir. PFA'nın en avantajlı özellikleri düşük sürtünme katsayısı ve yüksek kimyasal dirence sahip olmasıdır. Düşük sürtünme katsayısına sahip olması nedeniyle olağanüstü yapışmazlık özelliğine sahiptir. PFA, esnek bir polimer olmasının yanı sıra hemen hemen tüm solventlere ve kimyasallara karşı dirençlidir. Olağanüstü alev direnci, kimyasal kararlılık ve yüksek dielektrik mukavemeti sunar. Yüzey kalitesi ve esneme ömrü, PTFE'ninkinden daha iyidir (Ebnesajjad, 2017). Bununla birlikte, PFA'nın aşınma direnci PTFE'den daha düşüktür. Hem yüksek hem de düşük sıcaklık uygulamaları için uygun olan PFA, (-268)°C ile (+260)°C sıcaklık aralığında kullanılabilir. Bu sıcaklık aralığı, PTFE'nin çalışma sıcaklığı aralığına çok benzemektedir, ancak PFA 305°C'de erir. İçeriğindeki alkoksi polimerinin eriyik halinde işlenebilmesinden dolayı PFA'nın eritilerek işlenebilir olma avantajı vardır. PFA floropolimeri, diğer polimer malzemeler gibi, çekme ve basma gerilmelerine maruz kaldığında deformasyona uğrar. Bu deformasyon, polimerin akma noktasının çok altında meydana gelir ve bu durum özellikle floropolimerler için önemlidir. PFA floropolimerinin sertliği 55-57 durometredir. Sıvı nitrojen ortamında yapılan testler, PFA'nın kriyojenik uygulamalarda çok iyi performans sergilediğini göstermektedir (Ebnesajjad, 2015). Tablo 2'de PFA floropolimerinin kriyojenik özellikleri belirtilmiştir (DuPont, 2021).

Tablo 2. PFA Floropolimerinin Kriyojenik Özellikleri (DuPont, 2021)

Özellikler	ASTM Standardı	Birim	Oda Sıcaklığı (23°C)	Kriyojenik Sıcaklık (-196°C)
Akma Dayanımı	D1708 ^a	MPa	15	Akma yok
Maksimum Çekme Dayanımı	D1780 ^a	MPa	18	129
Uzama	D1708 ^a	%	260	8
Eğilme Modülü	D790-71 ^b	MPa	558	5790
Çentik Darbe Dayanımı	D256-72a ^c	J / m	Kırılma yok	64
Basma Dayanımı	D695	MPa	24	414
Basma Gerinimi	D695	%	20	35
Elastik Modülü	D695	MPa	69	4690

a Çapraz hız B, 1.3 mm/dk; daha doğru bir kıyaslama için iki sıcaklık değerinde de kullanılmıştır.

b Metot 1, Prosedür B

c Metot A, Kafa Ağırlığı 4,5 kg (23°C), 9 kg (-196°C)

Sıcakta eriyen ince film yapıştırıcılar olarak kullanılan PFA floropolimer reçineleri; suya son derece dayanıklı, termal olarak dirençli ve güçlü bağlar içermektedir. Kullanım uygulamalarına ekstrüde edilmiş tel kaplamalar, ısıtıcı kabloları, kalın cidarlı borular ve kablo kılıfları örnek olarak verilebilir. PFA floropolimer reçineler, kimyasal maddeler tarafından bozulmaz. Güçlü mineral asitlere, inorganik bazlara, inorganik oksitleyici ajanlara ve tuz çözeltilerine karşı inerttir. Organik asitler, anhidritler, aromatikler, alifatik hidrokarbonlar, alkoller, aldehitler, ketonlar, eterler, esterler, kloroflorokarbonlar, florokarbonlar ve yukarıdaki bileşiklerin karışımları gibi organik bileşiklere karşı da etkisizdir (Ebnesajjad, 2015).

PFA'nın yanma direnci mükemmeldir ve Sınırlayıcı Oksijen İndeksi (LOI) değeri 95'ten büyüktür, bu da ortamda serbest yanmayı desteklemek için %95'in üzerinde oksijen bulunması gerektiği anlamına gelmektedir. PFA yandığında, yanma ısısı son derece düşüktür, salınan duman miktarı minimumdur ve bozunma gazları çok düşük aşındırıcılığa sahiptir. PFA, PTFE ile aynı dielektrik katsayısı ve dağılım faktörüne sahip olmasına rağmen, PTFE'den 4 kat daha yüksek dielektrik yalıtım direnci göstermesi ile etkileyici bir elektriksel özellik sergilemektedir. Bu nedenle binaların elektrik tesisatındaki kablolarda kullanılarak yangınların neden olacağı hasar en aza indirilir. PFA, gıda ile temasa da uyumludur ve ilaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PFA, güneş ışığına, ozona ve genel

hava koşullarına karşı iyi bir aşınma direncine sahiptir. PFA, tüm polimerlerin içerisinde hem UV hem de görünür dalga boylarındaki en düşük kırılma indekslerinden birine sahiptir ve iyi ışık geçirgenliği ile yüksek şeffaflık gösterir. PTFE ile PFA floropolimerlerinin karşılaştırılması Tablo 3'te gösterilmiştir (Leivo, Wilenius, Kinon, Vuoristo ve Mantyla, 2003).



Şekil 4. PFA hammaddesi ve malzemeden elde edilen ürünlere örnekler

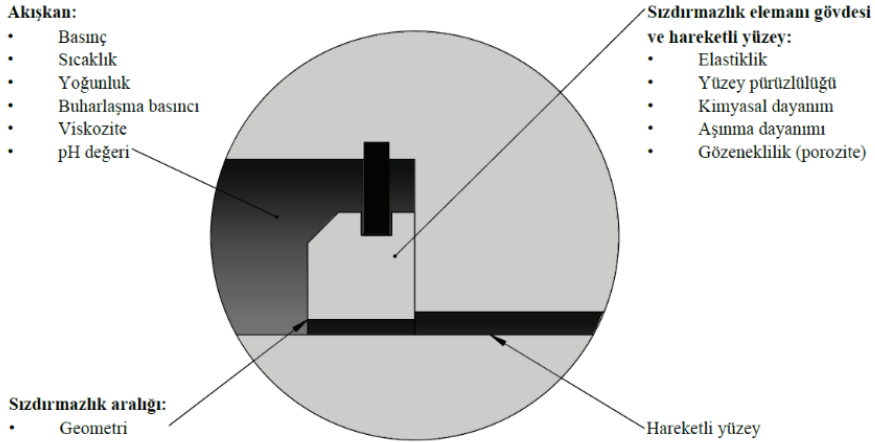
Tablo 3. PTFE ile PFA Floropolimerlerinin Karşılaştırılması (Leivo ve diğ., 2003)

	FLOROPOLİMERLER	PFA	PTFE
Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,12 - 2,17	2,15
	Su Emilimine Dayanım (%)	≤ 0,030 (Süre: 86400 saniye)	≤ 0,010
Mekanik Özellikler	Sertlik, Shore D	55 - 60	≥ 54
	Çekme Dayanımı (Mpa)	24,99 - 27,6	37,9
	Kopma Noktasındaki Uzunlaşma (%)	300%	≥ 200%
	Elastik Modülü (Gpa)	0,621	0,496
	Basma Dayanımı (Mpa)	24,1	7,00
	Çentik - Darbe Dayanımı (J/cm)	≤ NB	1,89
	Sürtünme Katsayısı	0,21	0,060 - 0,080
	Hacim Özdirenci (ohm. cm)	1E+18	1E+18
Elektriksel Özellikler	Birim Yüzey Direnci (ohm)	1E+17	≥ 1E+18
	Dielektrik Sabiti	2,03 - 2,1 (Sıklık: 6E+7 Hz)	2,1 (Sıklık: 1E+6 Hz)
	Dielektrik Dayanım (kV/mm)	78,7 (Kalınlık: 10 mm)	18
	Dağılma Faktörü	0,0001 (Sıklık: 6E+7 Hz)	≤ 0,00010 (Sıklık: 1E+6 Hz)
	Ark Dayanımı (saniye)	≥ 180	≥ 300

T e r m a l Özellikler	Isıl Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m}/\text{mC}^\circ$)	140 (Sıcaklık: 21 - 100 C°)	124 (Sıcaklık: 25 - 100 C°)
	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,19	0,25
	Erime Noktası (C°)	305	327
	Maksimum Çalışma Sıcaklığı, Hava (C°)	260	260
	Minimum Çalışma Sıcaklığı, Hava (C°)	-196	-268
	Alevlenebilirlik, UL94	V0	V0

3. PTFE ve PFA'nın Sızdırmazlık Sektöründe Kullanımı

Endüstriyel uygulamalarda sistemde mevcut basınçlı akışkanın veya yağlayıcı akışkanın çalışma sırasında sistemden istenmeyen bir şekilde sızmasının önlenmesi gerekmektedir. Bu görevi yerine getirecek şekilde geliştirilmiş elemanlara sızdırmazlık elemanları denir. Sızdırmazlık elemanları, hidrolik ve pnömatik silindirlerin ve sistemlerin tasarımı, işlevi ve hizmet ömrü üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Sızdırmazlık elemanlarının performansını etkileyen faktörler Şekil 5'te gösterilmiştir.

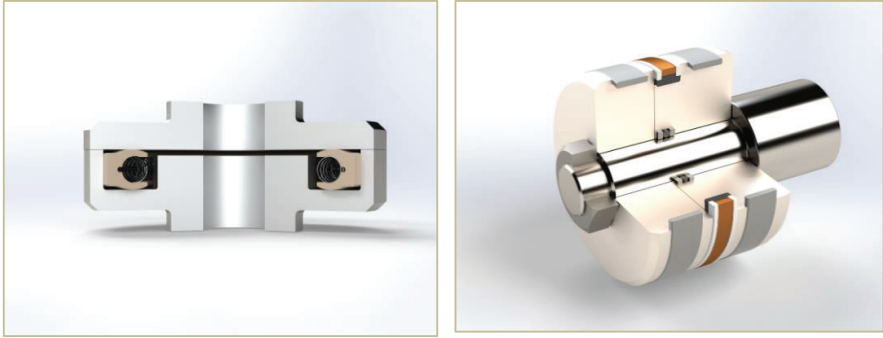


Şekil 5. Sızdırmazlık performansını etkileyen faktörler

Floropolimerler, üstün mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle özellikle sızdırmazlık uygulamalarında aktif olarak kullanılmaktadır (Şekil 6).

PTFE ve PFA floropolimerleri, geniş aralıktaki çalışma sıcaklığı, yüksek kimyasal dayanım, hidrofobiklik, yüksek aşınma dayanımı gibi üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle sızdırmazlık elemanının performansını etkileyen faktörleri elimine edebilmektedir. Böylece kullanılan ekipmanın ve sızdırmazlığın faydalı ömrünü uzatmakta, bakım-onarım maliyetini düşürmektedir. Bu nedenle piston keçesi, boğaz keçesi, toz keçesi ve yataklama elemanı malzemesi olarak en çok tercih edilen floropolimerlerdir.

Bir işlem sırasında yağlama, sistemin sürtünmeden dolayı oluşan ısıdan etkilenmesini engeller ve hasarları önler. Geleneksel sızdırmazlık sistemleri yağlama amacıyla yağ veya gres gerektirir. PTFE ve PFA, düşük yüzey enerjisi özelliklerinden dolayı kendinden yağlamalı sızdırmazlık elemanları olarak kullanıldığından harici yağlama gerektirmezler. Bu nedenle, bu iki floropolimer türü, sızdırmazlık sektöründeki yağlama gerektiren uygulamalarda kullanılmaya oldukça elverişlidir. Esneklikleri, kimyasal inertlikleri ve optik saydamlıklarından dolayı bu floropolimerler, kritik ve yoğun aşındırıcı prosesler içeren borulama işlerinin sızdırmazlığında oldukça tercih edilmektedir. Bir diğer yaygın kullanım alanları da kimyasal ekipmanların astarlanmasıdır. PTFE / PFA astar malzemesi, kimyasal ekipmanı korozyona karşı korumaktadır. PTFE / PFA kaplı sütunlar, tanklar, reaktörler ve borular aşırı konsantre asitlerin olduğu ortamlara dayanabilmektedir. Bu floropolimerlerin sızdırmazlık sektöründeki diğer uygulama alanları; filtrasyon gövdeleri, ısı eşanjörleri, pompa gövdeleri ve bağlantı parçaları olarak sıralanabilir.



Şekil 6. Sızdırmazlık elemanlarının montaj hali

4. Floropolimerlerin Geri Dönüşüm Yöntemleri

Dünyada her yıl 2.1 milyar ton atık ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar, potansiyel olarak 4.5 milyar varil petrol eşdeğeri enerji içermekte olup, söz konusu enerji miktarı dünya elektrik tüketiminin %10'unu karşılayabilecek seviyelerdedir (Ye-

şiltay, 2018). Türkiye'de 2010 yılına kadar % 35 olan geri dönüşüm oranı, 2012 ve sonrasında % 40 oranına yükselmiştir. Geri dönüştürülen atıkların % 43'ünü kâğıt, % 27'sini plastik, % 12'sini cam, % 8'ini tekstil ürünleri, % 4'ünü de metal grubu oluşturmaktadır. Türkiye'de tüm atık gruplarının geri dönüşüm oranı ortalama % 7 seviyesinde iken, ambalaj grubunun geri dönüşüm oranı % 20'lerde ve ilk sırada yer almaktadır (Yeşiltay, 2018).

Çevre kirliliği açısından büyük bir tehdit oluşturan plastik atıkların önlenmesi ve azaltılması, dünya gündeminde önemli bir yer tutmaktadır. Plastik atıkların önlenmesi ve azaltılması için önemli adımlar atan Türkiye, bu konudaki hedefleri açısından AB ülkelerinin önünde yer almaktadır. Türkiye'de, hali hazırda % 54 olan plastik atığı geri dönüşüm hedefi, 2020 sonrası için % 55 olarak belirlenmiş durumdadır. AB ülkelerinde yürürlükteki hedef % 22,5 ve % 55 hedefi ancak 2025'de, Türkiye'den 5 yıl sonra geçerli olacaktır. Türkiye, bu konuda Avrupa'nın en az 5 yıl gerisinde kaldığından kısa sürede yüksek hedefleri tutturmak için atık dönüşümü konusundaki çalışmalarını hızlandırmalıdır (İmer, 2022). AB'de plastik atıklara karşı alınan yasal önlemler ile ilgili olarak malzeme esasına dayalı yaşam döngü yaklaşımı uygulanmaktadır. Uygulanan strateji gereği AB düzeyinde ölçülebilir hedefler konulmuştur. Bu hedeflerden birisi, 2030 yılına kadar AB piyasasına sürülen tüm plastik atıkların tekrar kullanılabilir ya da geri dönüştürülebilir olmasıdır. AB ülkelerinde geri dönüşüm hedeflerini sağlayabilmek için üretimde belirli oranlarda geri dönüştürülmüş plastik malzeme kullanım zorunluluğu getirilmiştir. Bu oranlar üretim bazlı ve kullanılacak polimer bazlı olarak değişkenlik göstermektedir (İmer, 2022).

Ülkemizde kullanılan floropolimerlerin büyük bir kısmı yurtdışından sağlanmaktadır ve oldukça maliyetlidir. Floropolimer malzeme kullanılarak üretim yapılan işletmelerde, açığa çıkan atık geri dönüşüm yoluyla üretime geri kazandırıldığında ekonomik açıdan fayda sağlanacaktır. Floropolimerler, doğru koşullar altında



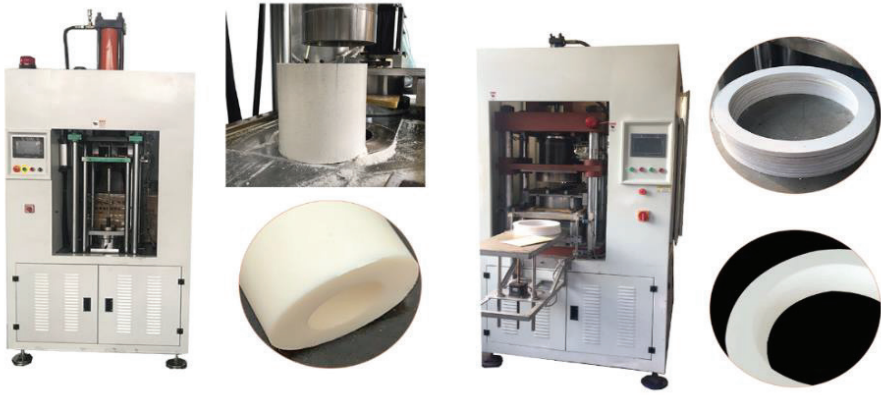
Şekil 7. Floropolimerlerin talaşlı imalat yöntemi ile işlenmesi ve açığa çıkan talaş atıkları

geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilir. Ön şekillendirme, kalıplama, işleme, tornalama ve kesme gibi proseslerden sonra işletmelerde floropolimer atığı oluşmaktadır. Bu prosesler sonucunda oluşan atık miktarı kullanılan floropolimer malzeme miktarının %10 - %25'i oranında değişiklik göstermektedir (Şekil 7). Floropolimer üretim atıkları, spesifikasyonları karşılamayan malzemeler olup, amacına uygun olarak kullanılamazlar. Floropolimer malzemenin yüksek katma değerli olmasından dolayı, atığının geri dönüştürülmesi işletmelere ekonomik olarak katkı sağlayan bir procesdir.

Genel olarak floropolimer atıklarından ürün elde edilmesi üç kademe gerçekleştirilmektedir. Bunlar; polimer atıkların kesme/kırma ile istenen boyutlara küçültülmesi, yıkama - kurutma ve daha sonra uygun proses ile istenilen geri dönüşüm ürününün üretilmesidir. Geri dönüştürülmüş floropolimer atıkları ince toz haline getirilerek mürekkep ve boya gibi ürünlerin içerisinde kullanılabilir. Geri dönüştürülemeyen floropolimerler ise tercihen enerji geri kazanımı amacıyla lisanslı yakma tesislerinde yakılmaktadır. Bu atıkların lisanslı deponi alanlarında bertaraf edilmesi de mümkündür.

Floropolimerlerin özelliklerine göre uygulanabilecek geri dönüşüm metodu da değişmektedir. PTFE ve PFA atıklarının geri dönüşüm prosesi için uygun yöntem belirlenirken iki floropolimerin özellikleri dikkate alınmalıdır. Örneğin PFA, içeriğinde alkoksini olması nedeniyle ekstrüzyon prosesi ile eriyik halinde işlenebilmektedir. PTFE ise, viskozite özellikleri nedeniyle ekstrüzyon prosesi ile üretilmemektedir ve eriyik halde işlenmemektedir. Bu nedenle PTFE'nin işlenmesi için araştırılacak alternatif üretim yöntemleri olarak soğuk ekstrüzyon, basınçlı kalıplama ve izostatik kalıplama yöntemleri değerlendirilebilir. Ekstrüzyon prosesinde polimer malzeme, içerisinde ısıtıcı ve basınçlı vida bulunan ekstrüderde eritilip vida yardımıyla ekstrüder çıkışında bulunan formlu kalıp içerisinden geçirilerek şekillendirilir. Bir sonraki aşamada malzemeye soğutma işlemi uygulanır ve malzeme son şeklini alır. Soğutma işleminde ekstrüde edilen polimer, soğutma havuzu içerisinden geçirilerek soğutulur. Sonraki aşamada polimer kesilerek nihai ürün elde edilir (Kaya, 2018). Isıyla sertleşen diğer floropolimerlerin aksine, PTFE ürünleri yüksek sıcaklıklarda ısıtıldığında erimez, sadece 320°C'nin üzerinde yumuşar. Bu nedenle, PTFE'nin geri dönüştürülmesi için ekstrüzyon prosesinin kullanılması uygun olmamaktadır (Leivo, 2015).

Basınçlı kalıplama prosesinde ise granül/toz halindeki floropolimer malzeme, önceden ısıtılmış kalıplara konular ve basınç uygulanır (Şekil 8). Daha sonra kalıtlaşması için belirli bir süre bekletilerek kalıptan çıkartılıp soğumaya bırakılır. Basınçlı kalıplama prosesinde sıcaklık 120°C ile 260°C arasındadır. Bu sıcaklık aralığı hem PFA hem de PTFE'nin maksimum servis sıcaklığını aşmamaktadır. Proses herhangi bir eritme işlemi gerektirmemesi nedeni ile her iki floropolimer türünden elde edilen toz malzemenin işlenmesi için kullanılabilir olarak değerlendirilebilmektedir.



Şekil 8. Floropolimerlerin basınçlı kalıplama yöntemi ile üretilmesi

Diğer bir yöntem olan izostatik presleme, maksimum yoğunluk ve mikro yapı homojenliği sağlayan bir toz kompaktı üzerine her yöne eşit basınç uygulayan bir toz metalurjisi oluşturma işlemidir. İzostatik presleme işlemi soğuk veya sıcak olarak uygulanabilir. Soğuk izostatik presleme (CIP), toz haldeki floropolimer malzemeleri ortam sıcaklıklarında sıkıştırmak için kullanılırken, sıcak izostatik presleme (HIP), yüksek sıcaklıklarda malzemeleri tam olarak birleştirmek için kullanılır. Sıcak izostatik presleme, sinterlenmiş bir toz malzemede oluşan gözenekliliği ortadan kaldırmak için de kullanılabilir. Soğuk izostatik presleme yöntemi, presleme için kullanılacak kalıpların maliyetinin çok yüksek olması, kalıp boyutlarının çok büyük olması veya kompakt karışımların kullanılması gerektiği durumlarda kullanılmaktadır. Sıcak izostatik preslemede ise metallerde, seramiklerde, polimerlerde ve kompozit malzemelerde gözenekliliği ortadan kaldırmak ve yoğunluğu artırmak için yüksek sıcaklık ve izostatik gaz basıncını kullanan bir üretim sürecidir. Bu, malzemenin mekanik özelliklerini ve potansiyel olarak işlenebilirliğini geliştirir. Sıcak izostatik presleme aynı zamanda sinterleme işleminin bir parçası olarak, basınç destekli sert lehimleme ve metal matrisli kompozitlerin imalatı için de kullanılabilir.

5. Genel Değerlendirmeler

Türkiye’de geri dönüşüm çalışmaları, 1991 yılından beri uygulanmakta olan Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği kapsamında yürütülmektedir. Bu çalışmalar, 20 yılı aşkın süredir artarak devam etmektedir. Dünya genelinde “kullan-at” düşüncesi zamanla “kullan-geri dönüştür-yeniden kullan” olarak değişmiştir. Geri dönüşüm çalışmaları ile “kullan-at” alışkanlığının en çok uygulandığı malzeme olan polimerler için durum gelişme kaydetmektedir. Doğada binlerce yıl yok olmadan kalabilen polimerlerin geri dönüştürülüp tekrar kullanılabilmesi doğal kaynaklarımızın korunmasını sağlayacaktır.

Türkiye’de geri dönüşüm oranı, tüm atık malzemeler için % 22,4’tür. Bu oran Türkiye’de yapılan geri dönüşüm projeleri ile artmaya devam etmektedir. Ülkemizde 2017 yılında başlatılan Sıfır Atık Projesi kapsamında, işletmelerde oluşan atıkların geri kazanımı ve üretilen yeni ürünlerde ham madde olarak yeniden kullanımı ile enerji ve hammadde ihtiyacı açısından tasarruf sağlanmaktadır. Doğal kaynakların tükenme ihtimali göz önünde bulundurularak verimli kullanılmalarına ve atıkların geri dönüştürülmelerine özen gösterilmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak ülkemizde gelişen sıfır atık çalışmalarının önemi gittikçe artmaktadır.

Floropolimerler, üstün mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Floropolimerler arasında PTFE ve PFA; yüksek kimyasal dayanım, hidrofobiklik, geniş çalışma sıcaklığı aralığı, yüksek aşınma dayanımı gibi benzer üstün kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olduklarından dolayı oldukça tercih edilmektedir. Bu nedenle otomotiv, havacılık, elektrik- elektronik, medikal, enerji dönüşümü gibi birçok farklı sektörde uygulama alanına sahiptir. Üstün yağlama özellikleri, yüksek aşınma dayanımları ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilmelerinden dolayı özellikle sızdırmazlık teknolojilerinde yaygın kullanım potansiyelleri vardır. İşletmelerde PTFE ve PFA malzemeler kullanıldıktan sonra ortaya çıkan floropolimer atıkları uygun geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülebilir. Bu sayede floropolimer malzeme tedarikinde yurtdışı bağımlılığı azaltılmış ve atıkların sürdürülebilirliği sağlanarak sıfır atık oluşmuş olacaktır.

Kaynakça

- Akinci, A., Akbulut, H. ve Yılmaz, F. (2003). Floropolimer (PTFE) Kaplamaların Yapı ve Özellikleri, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, 17, 53 – 64. Erişim adresi: https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi133/d133_5359.pdf
- Ameduri, B. (2018). Fluoropolymers: The Right Material for the Right Applications, *Chemistry–A European Journal*, 24(71), 18830 - 18841. <https://doi.org/10.1002/chem.201802708>
- Dhanumalayan, E. ve Joshi, G.M. (2018). Performance Properties and Applications of Polytetrafluoroethylene (PTFE) - A Review, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247 - 268. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- DuPont. (2021). Teflon PFA Properties Handbook. Erişim adresi: https://www.extremecoatingsolutions.com/wp-content/uploads/2021/06/Teflon_PFA_Handbook.pdf
- Ebnesajjad, S. (2017). Applied Plastics engineering handbook: Introduction to

fluoropolymers. UK: *Elsevier*. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00003-1>

Ebnesajjad, S. (2015). Fluoropolymers: Properties and structure. ABD: *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3199-2.00004-5>

İmer, M. (2022). Türkiye Plastik Ambalaj Geri Dönüşüm Hedefi Konusunda Avrupa'dan En Az 5 Yıl İleride. Erişim adresi: <https://www.plastik-ambalaj.com/tr/plastik-ambalaj-urunler/2786-tuerkiye-plastik-ambalaj-geri-doenuesuem-hedefi-konusunda-avrupa-dan-en-az-5-y-l-ileride>

Kaya, Ö. (2018). *Polimer malzemelerin ekstrüzyon prosesinin modellenmesi ve analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa. <http://hdl.handle.net/11452/2648>

Lakshmanan, A. (2015). *Sintering techniques of materials*, India: InTech DTP Team <https://doi.org/10.5772/58496>

Leivo, E., Wilenius, T., Kinoshita, T., Vuoristo, P. ve Mantyla, T. (2003). Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF, ECTFE, PFA and FEP coatings, *Progress in Organic Coatings*, 49, 69-73. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.08.011>

Yeşiltay, M. (2018). Geri Dönüşüm Sektörünün Dünya'daki Genel Görünümü ve Türkiye'deki Durumu. Erişim adresi: <https://www.yesiltaylar.com.tr/tr/blog/geri-donusum-sektorunun-dunyadaki-genel-gorunumu-ve-turkiyedeki-durumu>



DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ DURUMU VE KURULUM MALİYETLERİ

Seyda ÖZBEKTAŞ¹, Mahmut Can ŞENEL^{2*}, Bilal SUNGUR³

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Böl., Samsun,
ORCID No : 0000-0001-7399-733X

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Samsun, ORCID No : 0000-0001-7897-1366

³Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun,
ORCID No : 0000-0002-7320-1490

Anahtar kelimeler

Öz

*Yenilenebilir enerji,
yenilenemez enerji, fosil
yakıt, kurulum maliyeti*

Günümüzde artan enerji talebinin büyük bir kısmı halen yüksek miktarda hidrokarbon içeren fosil yakıt kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu durum hava kirliliği ve küresel ısınma gibi birçok çevresel probleme yol açmaktadır. Bu sorunlar karşısında tüm dünya yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarına ağırlık vermiştir. Bu çalışmada, dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım durumları ve kurulum maliyetleri güncel verilerle incelenmiştir. Çalışma neticesinde yenilenemez enerji kaynağı olan kömürün küresel çapta %36'lık payla günümüzde hala en çok tüketilen enerji kaynağı olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın toplam temiz enerjinin elektrik üretimindeki payının %38 seviyelerine geldiği belirlenmiştir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kullanımının dünyada ve Türkiye'de hızlı bir şekilde yaygınlaşması, yenilenemez enerjiye olan talebin hızla azaltılması hem çevresel hem de kaynak çeşitliliği açısından oldukça önem arz etmektedir.

¹ Sorumlu yazar; e-posta: mahmutcan.senel@omu.edu.tr
doi : muhendismakina.1319183

RENEWABLE ENERGY STATUS AND INSTALLATION COSTS IN THE WORLD AND TURKEY

Keywords

Renewable energy, non-renewable energy, fossil fuel, installation cost

Abstract

Today, most of the increasing energy demand is still supplied by fossil fuel sources containing high amounts of hydrocarbons. This situation leads to many environmental problems, such as air pollution and global warming. In the face of these problems, the world has focused on research and development studies on renewable energy sources. In this study, the utilization statuses and installation costs of renewable energy sources in the world and Turkey were examined with current data. As a result of the study, it was determined that coal, which is a non-renewable energy source, is still the most consumed energy source, with a share of 36% globally. On the other hand, it was observed that the share of total clean energy in electricity generation had reached 38%. In this context, the rapid expansion of renewable energy utilization in the world and Turkey and the rapid reduction of the demand for non-renewable energy is significant in terms of environmental and resource diversity.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 20.12.2022

Kabul Tarihi : 08.03.2023

Research Article

Submission Date : 20.12.2022

Accepted Date : 08.03.2023

Extended Abstract

Introduction

The demand for energy is increasing by 4-5% every year due to increasing industrialization, population, consumption expenditures, technological developments, and high living standards worldwide (Kaya, Şenel ve Koç, 2018). Non-renewable energy sources generally meet this increasing demand due to their low cost and easy accessibility. As a result, the decreases in biodiversity and agricultural production, the climate changes and the increases in erosion become inevitable (Çınar ve Yılmaz, 2015). In the face of the negative consequences of supplying energy demand from non-renewable energy sources, the trend towards renewable energy sources is increasing worldwide. In this study, a comprehensive evaluation of renewable energy sources widely used in the world and Turkey was performed. In this context, the changes in the installed capacity, electrical energy generation and installation cost over the years were examined.

General Energy Status in the World and Turkey

Coal remained the most used primary energy source globally for electricity generation in 2021, with 10244 TWh. The second largest share in electricity generation belonged to the gas source. In 2021, the renewable energy sources producing the most electricity in the world, excluding hydraulic energy, were wind and solar. Together, they have started to meet more than 10% of the world's electricity. On the other hand, electric energy obtained from total clean energy sources met 38% of the world's electricity in 2021, surpassing coal, which corresponds to 36% (Global Electricity Review, 2022).

The electrical energy consumed in Turkey in 2021 increased by 8.74% compared to the previous year and reached 332.9 TWh, while electricity production increased by 9.14% to 334.7 TWh. As of 2022, the total installed capacity has reached 103276 MW. The largest shares in terms of installed capacity belonged to hydraulic energy (30.6%), natural gas (24.5%), coal (21.1%), wind energy (10.9%), solar energy (8.8%) and geothermal energy (1.6%), respectively. In this context, the highest electricity generation was obtained from natural gas (33.2%), coal (30.9%), hydraulic energy (16.7%), wind energy (9.4%), solar energy (4.2%), geothermal energy (3.2%), respectively (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Renewable Energy Status and Installation Costs in the World and Turkey

The highest installed capacity among renewable energy sources in the world and Turkey belongs to hydraulic energy. In 2021, hydraulic energy constituted 58.6% of the installed capacity based on renewable energy in Turkey and 42.5% in the world. The largest installed capacities in the world after hydraulic energy were solar (26.7%), wind (25.8%), bioenergy (4.5%) and geothermal (0.5%), respectively. In Turkey, the largest installed capacities after hydraulic energy were expressed as wind (19.7%), solar (14.5%), bioenergy (4.1%) and geothermal energy (3.1%) (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).

In the last ten years, electrical energy generation from renewable energy sources has generally shown an increasing trend in the world. In Turkey, on the other hand, while the electrical energy generated from wind, solar, bioenergy and geothermal energy is incre-

asing every year, the electrical energy generated from hydraulic energy has shown high variability depending on drought and, therefore, water level. In 2021, the highest electricity generation from renewable energy sources in the world was obtained from hydraulic (4273.8 TWh), wind (1861.9 TWh), solar (1032.5 TWh), bioenergy (583.7 TWh) and geothermal energy (94.9 TWh), respectively. In Turkey, the highest electricity generation was obtained from hydraulic (55.7 TWh), wind (31.1 TWh), solar (12.8 TWh), geothermal (10.0 TWh) and bioenergy (4.44 TWh), respectively (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).

Between 2010 and 2021, the general trend in global weighted average total installation costs for photovoltaic solar, concentrated solar, onshore wind and offshore wind was downward. In the same period, hydraulic energy installation costs generally showed an increasing trend. On the other hand, installation costs for bioenergy showed high variability, with installation costs falling in 2021 compared to 2010. In this context, the highest global weighted average total installation costs for renewable energy in 2021 were concentrated solar (\$4746/kW), geothermal (US\$3991/kW), offshore wind (US\$2858/kW), bioenergy (2353 USD/kW), hydraulic (2135 USD/kW), onshore wind (1325 USD/kW), photovoltaic solar (857 USD/kW), respectively (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).

Results

Within the scope of this study, after examining the general energy status in the world and Turkey, the status and installation costs of renewable energy sources, which are thought to replace non-renewable energy sources in the future, were examined on the world and Turkey scales. When the general energy status was evaluated, it was determined that the highest electrical energy generation from non-renewable energy was obtained from coal, and the highest electrical energy generation from renewable energy was obtained from hydraulic energy. In addition, it was determined that the installation costs of onshore wind and photovoltaic solar energies were cheaper than other renewable energy sources and their installation costs continue to decrease with each passing year. In this context, rapidly increasing the installed capacity based on wind and solar energy in the world and Turkey is of great importance due to reducing the dependence on fossil fuel resources and the positive contribution it will create in terms of the environment.

1. Giriş

Dünya çapında artan sanayileşme, nüfus, tüketim harcamalarının yanı sıra teknolojik gelişmeler ve yüksek yaşam standartları gibi sebeplerden dolayı enerjiye olan talep her geçen yıl %4-5 oranında artmaktadır (Kaya, Şenel ve Koç, 2018). Artan bu talep genellikle maliyetinin düşük ve ulaşılabilirliğinin kolay olması nedeniyle yenilenemez enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Özellikle petrol, doğalgaz ve kömür gibi yüksek hidrokarbon içeren fosil yakıtların kullanımından kaynaklı olarak çevreye karbondioksit ve benzeri sera gazları salınmaktadır. Bu durum çevre kirliliğine ve küresel ısınmanın hızlanmasına yol açmaktadır. Buna bağlı olarak biyolojik çeşitlilikte ve tarımsal üretimde azalmalar, iklim değişiklikleri, erozyonlarda artışlar kaçınılmaz bir hale gelmektedir (Çınar ve Yılmaz, 2015). Enerji talebinin yenilemez enerji kaynaklarından sağlanmasının getirmiş olduğu olumsuz sonuçlar karşısında dünya çapında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim giderek artmaktadır. Bu alanda yatırımlar yapmak hükümetlerin politikaları arasına girmiştir.

Enerji kaynakları kullanım türlerine göre yenilenemez ve yenilenebilir olmak üzere ikiye ayrılırlar. Dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılırlar. Bu durum Şekil 1’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Dönüştürülebilirliklerine göre kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, biyokütle, hidrolik, güneş, rüzgar, dalga ve gel-git gibi herhangi bir dönüşüme ya da değişime uğramamış enerji kaynakları birincil (primer) enerji olarak adlandırılır. Diğer taraftan, elektrik, benzin, motorin, ikincil kömür, kok, petrokok, hava gazı ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi birincil enerjinin dönüştürülmesi sonucu elde edilen enerji kaynakları ikincil (sekonder) enerji olarak adlandırılır (Koç ve Kaya, 2015; Koç ve Şenel, 2013). Dünyada ve Türkiye’de günümüzde kullanılmakta olan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir (Kayar, İl ve Carlak, 2021).

Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan elde edilen ve doğada kendi evrimi içerisinde bir sonraki zaman diliminde kendini yenileyebilen enerji türüdür. Güneş, rüzgar, biyoenerji, jeotermal, gel-git, dalga, hidrojen ve hidrolik en temel yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (Ellabban, Abu-Rub ve Blaabjerg, 2014). Çevreye zarar vermemeleri sebebiyle temiz enerji kaynağı olmaları, enerjide dışa bağımlılığı azaltmaları ve istihdam artışı sağlamaları bu tür enerji kaynaklarının en önemli özellikleridir. Getirdiği bu avantajlar nedeniyle ülkemizde ve dünyada yenilenebilir enerji kaynağı potansiyelinin ortaya konması oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda dünyada ve ülkemizdeki yenilenebilir enerji kullanımına yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Güllü ve Kartal (2021) yenilenebilir enerjinin dünyada ve Türkiye’deki istihdamı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Ülkemizde hidrolik enerjiden sonra rüzgar ve güneş enerjisinin istihdam üzerinde kayda değer bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Ağır, Özbek ve Türkmen (2020) ye-

nilenebilir enerji kaynaklarının ülkemiz üzerine olan etkisini tespit etmek için ampirik bir çalışma yapmışlardır. Gerçekleştirdikleri eş bütünleme analizinde yenilenebilir kaynakların kullanımı sonucunda elde edilen enerjinin kentleşme, enerji tüketimi ve kişi başı milli gelirle uzun dönemde bağlantılı olduğunu bulmuşlardır. Işık ve Yavuz (2022) biyokütlenin dönüşümünden elde edilen biyoyakıtlar hakkında detaylı bir inceleme yapıp, biyoyakıtların Türkiye'deki durumu hakkında bilgi vermişlerdir. Gielen, Boshell, Saygin, Bazilian, Wagner ve Gorini (2019) yenilenebilir enerji için yeni veri kümeleri kullanarak, 2050 yılına hızlandırılmış bir enerji geçişini teknik ve ekonomik açıdan incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda bu geçişin ana unsurunun enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji teknolojileri olduğunu tespit etmişlerdir. Li, Lin, Wu, Xie, Meng, Zheng, Wang ve Zhao (2022) yenilenebilir enerjinin dünyadaki durumunu sistematik olarak incelemişlerdir. Jaiswal, Chowdhury, Yadav, Verma, Dutta, Jaiswal, SangmeshB ve Karuppasamy (2022) fosil yakıt kaynaklarından yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin iklim değişimini ve buna bağlı etkileri azaltmada nasıl bir katkı sağlayacağını araştırmışlardır. Hosseini (2020) COVID-19 salgınının yenilenebilir enerji üretimi ve sürdürülebilir enerjiye geçiş süreci üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Wang, Sun ve Iqbal (2022) gelişmekte olan büyük ekonomilerden oluşan E7 ülkelerinde (Çin, Hindistan, Brezilya, Türkiye, Rusya, Meksika ve Endonezya) yeşil finansmanın yenilenebilir enerji bağımlılığı ve geçiş süreci üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Wu (2023) OECD ekonomilerinde yenilenebilir enerji yatırım kaynaklarının ve yeşil finansın ekonomik performans üzerinde önemli ve pozitif bir etkisi olduğunu tespit etmiştir. Hassan, Al-Hitmi, Tabar, Sameen, Salman ve Jaszczur (2023) Orta Doğudaki enerji tüketimini ve potansiyel yenilenebilir enerji kaynaklarının durumunu incelemişlerdir. Orta Doğunun gelecekteki enerji talebinin güneş ve rüzgar enerjisinden karşılanabileceği sonucuna varmışlardır. Kayışoğlu ve Diken (2019) Türkiye'de yenilenebilir enerjinin mevcut durumunu ve sahip olduğu potansiyeli güncel verilerle değerlendirmiştir. Ayrıca, çalışmalarında yenilenebilir enerji kullanımının arttırılmasında karşılaşılan engeller için çözüm önerileri de sunmuşlardır. Sen ve Ganguly (2017) dünyada yenilenebilir enerjiyle ilgili sorunlar, engeller ve fırsatlar üzerine bir araştırma yapmış ve çözüm önerilerinde bulunmuşlardır. Chen, Pinar ve Stengos (2020) yenilenebilir enerji kullanımı ile ekonomik büyüme arasındaki nedensel bağı incelemişlerdir. Gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerine etkisinin kısıtlı olduğunu ancak OECD ülkelerinde önemli ve pozitif bir etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Pacesila, Burcea ve Colesca (2016) Avrupa Birliği üyesi ülkelerde yenilenebilir enerji sektörünü incelemişlerdir. Yenilenebilir enerji üretiminin her bir devletin enerji bağımlılığını azaltmasına yardımcı olduğunu ancak tek faktörün bu olmadığını öne sürmüşlerdir. Koyuncu ve Karabulut (2021) yenilenebilir enerjinin Türkiye ekonomisindeki büyümeye olan etkisini 1961 ve 2015 yılları arasındaki uzun dönemli veriler kullanarak araştırmıştır.

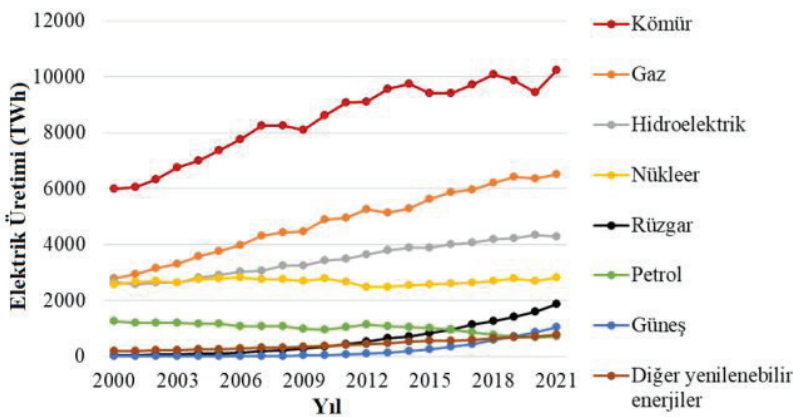
Çalışmalarında yenilenebilir enerji üretimindeki artışın ekonomik büyümeyi arttıracığı ve bu sayede sürdürülebilir kalkınmanın sağlanacağı sonucuna varmışlardır. Özkan, Uslu ve Gedikli (2022) ülke elektriğinin %48'ini rüzgar enerjisinden sağlayan Danimarka'nın rüzgar enerjisi ile ilgili düzenlemelerinin Türkiye'de uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Özbek ve Tunç (2021) Edremit körfezinde inşa edilecek 50-90 MW kapasitesindeki açık deniz rüzgar enerjisi santralının fizibilite çalışmasını kapsamlı simülasyonlar ve analizlerle gerçekleştirmişlerdir. Bilgili ve Alphan (2022) Türkiye'de rüzgar enerjisi üretimindeki büyümeyi farklı açılardan değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda Türkiye'de rüzgar türbini sayısında ve boyutundaki artışa bağlı olarak rüzgar gücü üretim kapasitesinin arttığını tespit etmişlerdir. Koç, Yağlı, Koç ve Uğurlu (2018) dünyada ve Türkiye'deki enerji kaynaklarının rezerv miktarlarını, kalan ömürlerini, üretim ve tüketim değerlerini belirtmiş ve bu kaynaklardan elde edilen enerjinin üretim ile tüketim oranlarını karşılaştırarak, kurulu güçleri hakkında bilgi vermiştir. Ayrıca yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynakları bakımından da karşılaştırmalar yapmıştır. Kaya ve Koç (2015) çalışmalarında Türkiye'deki genel enerji durumunu ve enerji santrallerinin kurulum maliyetlerini araştırmışlardır.

Enerji Kaynakları	
Kullanışlarına Göre	Dönüştürülebilirliklerine Göre
A) Yenilenemez (Tükenir) 1) Fosil Kaynaklı <ul style="list-style-type: none"> ➤ Kömür ➤ Petrol ➤ Doğal Gaz 2) Çekirdek Kaynaklı <ul style="list-style-type: none"> ➤ Uranyum ➤ Toryum 	A) Birincil (Primer) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Kömür ➤ Petrol ➤ Doğal gaz ➤ Nükleer ➤ Biyokütle ➤ Hidrolik ➤ Güneş ➤ Rüzgar ➤ Dalga, Gel-Git
B) Yenilenebilir (Tükenmez) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Hidrolik ➤ Güneş ➤ Biyokütle ➤ Rüzgar ➤ Jeotermal ➤ Dalga, Gel-Git ➤ Hidrojen 	B) İkincil (Sekonder) <ul style="list-style-type: none"> ➤ Elektrik, Benzin, Motorin ➤ İkincil Kömür ➤ Kok, Petrokok ➤ Hava Gazı ➤ Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)

Şekil 1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması (Koç ve Şenel, 2013)

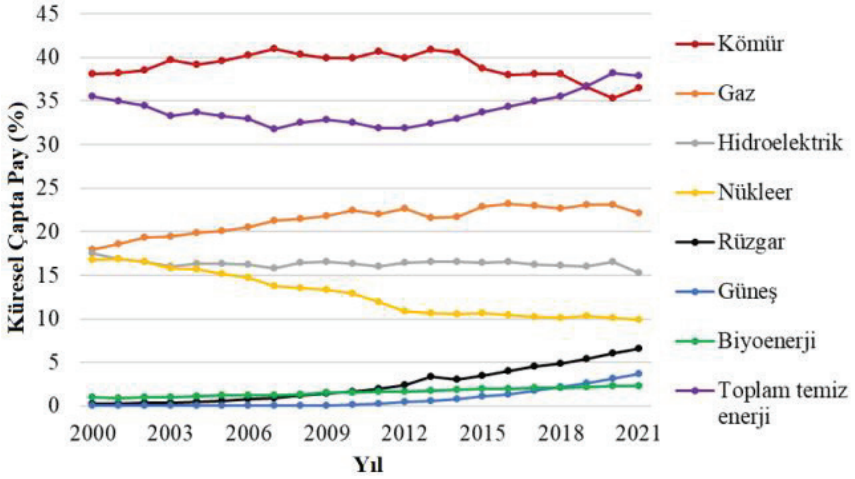
2. Dünyada ve Türkiye’de Genel Enerji Durumu

Farklı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik üretim miktarları Şekil 2’de verilmiştir. Şekilde diğer yenilenebilir enerji kaynakları olarak gösterilen veri seti; biyokütle, atık, jeotermal, dalga ve gelgit enerjilerini içermektedir. Kömürden elde edilen elektrik enerjisinin genel olarak artış eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir. 2018 yılından sonra kömüre bağlı elektrik üretimi 2020’ye kadar azaldıktan sonra tekrar artarak 2021’de en yüksek değerine ulaşmıştır. Buna bağlı olarak günümüzde elektrik üretimi için küresel çapta en çok kullanılan birincil enerji kaynağı 10244 TWh ile kömür olmaya devam etmektedir. Elektrik üretiminde ikinci büyük pay ise gaz kaynağına aittir ve gazdan elektrik üretimi giderek artmaya devam etmektedir. Yenilenemez enerji kaynaklarından diğer ikisi olan nükleer ve petrolden elde edilen elektrik üretiminde 2000’li yıllar boyunca kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları açısından durum incelendiğinde, 2010 yılı öncesinde rüzgar ve güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi üretimi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının altında kalsa da, 2021 yılına gelindiğinde hidrolik enerji hariç en çok elektrik üretiminin gerçekleştiği yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar ve güneş olmuştur. Rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi 2000’li yılların başından itibaren düzenli olarak artış eğilimindedir. Güneş enerjisinden ise 2009 yılına kadar kayda değer bir elektrik üretimi gözlemlenmemiş ancak son yıllarda artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, hidrolik enerji en fazla elektrik üretiminin yapıldığı yenilenebilir enerji kaynağı olmaya devam etmektedir (Global Electricity Review, 2022). 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşmak için dünya çapında yıllık temiz enerji yatırımının 2030 yılına kadar üç kattan fazla artarak yaklaşık 4 trilyon dolara ulaşması öngörülmektedir (Net Zero by 2050, 2021).



Şekil 2. Küresel çapta yıllara göre farklı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretim miktarları (Global Electricity Review, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

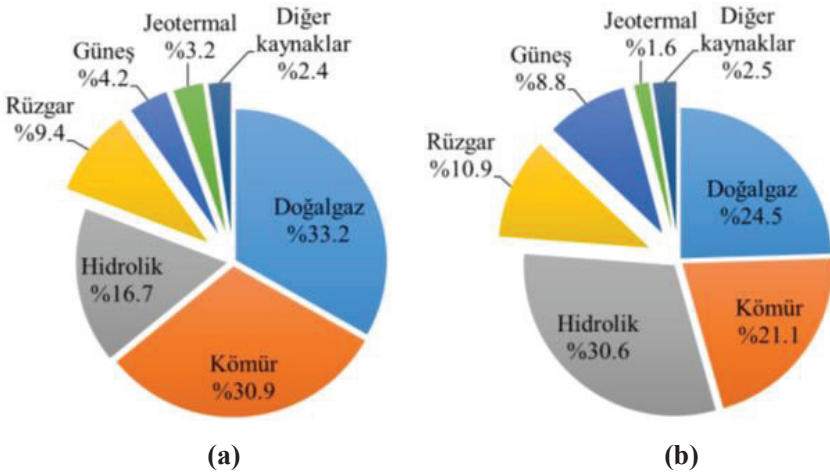
Farklı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretiminin küresel çapta sahip olduğu paylar Şekil 3'de verilmiştir. 2021'de rüzgardan ve güneşten elde edilen elektrik üretiminin dünya çapında payları sırasıyla %6.6 ve %3.7'ye yükselerek ikisi birlikte küresel çapta elektrik üretiminin %10'undan fazlasını karşılamaya başlamıştır. Tüm temiz enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi ise 2021'de dünya elektriğinin %38'ini karşılayarak %36'sına denk gelen kömürü geçmiştir. 2019'da 36 ülke, 2020'de 43 ülke ve 2021'de 50 ülke kendi elektriğinin %10'undan fazlasını rüzgar ve güneşten elde edebilir duruma gelmiştir. 2021'de Çin, Japonya, Moğalistan, Vietnam, Arjantin, Macaristan ve El Salvador ilk kez bu eşiği aşmıştır. Hollanda, Avustralya ve Vietnam son iki yılda toplam elektrik ihtiyaçlarının %8'ini fosil yakıtlardan rüzgar ve güneş enerjisine geçirmiştir. 2021'de dünya %5.4'lük bir oranla 2010'dan bu yana elektrik enerjisi talebindeki en hızlı artışı tecrübe etmiştir. Bu talep artışının %29'u rüzgar ve güneş enerjisinden karşılanmıştır. Geriye kalan talep, son iki yılda diğer temiz enerji kaynaklarında büyüme olmaması, nükleer ve hidroelektrik seviyelerinin değişmemesi nedeniyle fosil yakıtlı kaynaklardan sağlanmıştır. Fosil yakıtlar içerisinde %59'luk oranla en yüksek elektrik üretimi yine kömür ile sağlanmıştır. Bu durum, kömürün dünya çapında elektrik üretimindeki payının 2021'de bir miktar artmasına sebep olmuştur (Global Electricity Review, 2022).



Şekil 3. Farklı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretiminin küresel çapta sahip olduğu paylar (Global Electricity Review, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

Türkiye'de 2021'de tüketilen elektrik enerjisi bir önceki yıla kıyasla %8.74 ar-

tarak 332.9 TWh'a, elektrik üretimi ise %9.14 artarak 334.7 TWh'a yükselmiştir. 2022 yılı itibarıyla toplam kurulu güç ise 103276 MW seviyesine ulaşmıştır. Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporuna göre elektrik enerjisi tüketiminin 2025'de 370 TWh'a, 2040'da ise 591 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir. 2021'de Türkiye'de üretilen elektriğin ve 2022 Kasım ayı itibarıyla kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu bağlamda kaynaklara göre en yüksek elektrik üretimi sırasıyla doğalgaz (%33.2), kömür (%30.9), hidrolik enerji (%16.7), rüzgar enerjisi (%9.4), güneş enerjisi (%4.2), jeotermal enerji'den (%3.2) elde edilmektedir. Kurulu güç açısından en büyük paylar ise sırasıyla hidrolik enerji (%30.6), doğalgaz (%24.5), kömür (%21.1), rüzgar enerjisi (%10.9), güneş enerjisi (%8.8) ve jeotermal enerjiye (%1.6) aittir. 2022 Ekim ayı itibarıyla Türkiye'de 9203 güneş, 750 hidroelektrik, 358 rüzgar, 344 doğal gaz, 68 kömür, 63 jeotermal ve 490 diğer kaynaklı santral aktif halde çalışmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).



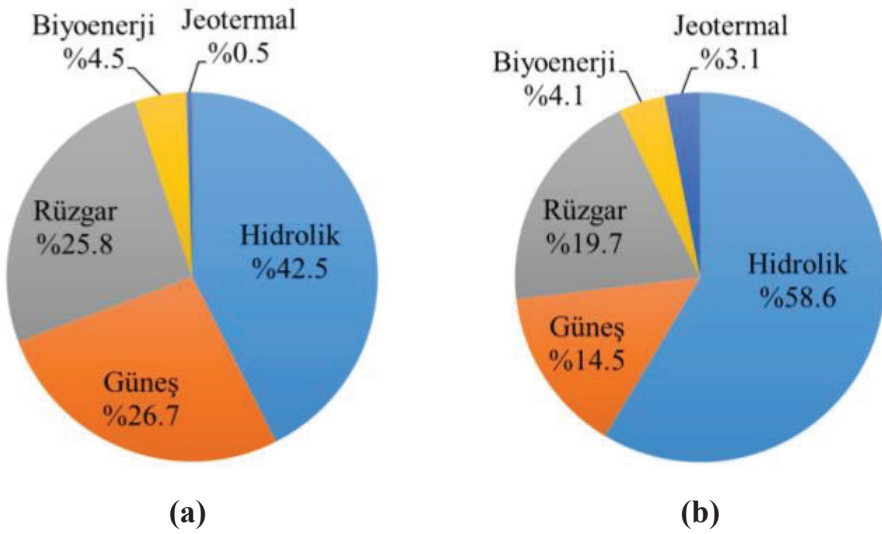
Şekil 4. (a) 2021'de Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin ve (b) 2022 Kasım ayı itibarıyla kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)

3. Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri

3.1 Yenilenebilir Enerjinin Genel Durumu

Fosil yakıtlı enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve çevreye verdiği zarar nedeniyle dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim gün

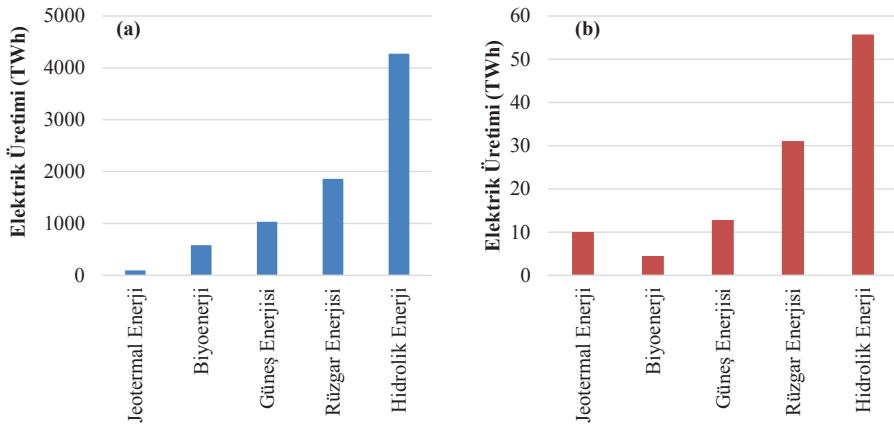
geçtikçe artmaktadır. Türkiye sahip olduğu coğrafi konumundan dolayı büyük bir güneş enerjisi potansiyeline, yer şekil özelliklerinden dolayı önemli derecede rüzgar ve hidrolik enerji potansiyeline sahiptir. Ayrıca jeotermal enerji açısından dünya potansiyelinin %8'ini oluşturmaktadır (Yılmaz, 2012). Yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının 2021'de dünyada ve Türkiye'deki kurulu güç dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. Dünyada ve Türkiye'de en yüksek kurulu güç hidrolik enerjiye aittir. Türkiye'de yenilenebilir enerjiye dayalı kurulu gücün %58.6'sını, dünyada ise % 42.5'ini hidrolik enerji oluşturmaktadır. Türkiye'de hidrolik enerjiden sonra en büyük kurulu güçler sırasıyla rüzgar (%19.7), güneş (%14.5), biyoenerji (%4.1) ve jeotermal (%3.1) enerjiye aittir. Dünyada ise hidrolik enerjiden sonra sırasıyla güneş (%26.7), rüzgar (25.8), biyoenerji (%4.5) ve jeotermal (%0.5) enerji gelmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).



Şekil 5. 2021'de (a) Dünyada ve (b) Türkiye'de yenilenebilir enerjiye dayalı kurulu gücün dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022)

Son 10 yılda dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretimi genel olarak artış trendi göstermiştir. Türkiye'de ise rüzgar, güneş, biyoenerji ve jeotermal enerjiden üretilen elektrik enerjisi her geçen yıl artarken, hidrolik enerjiden üretilen elektrik enerjisi kuraklığa ve dolayısıyla su seviyesine bağlı olarak yüksek değişkenlik göstermiştir. 2021'de dünyada ve

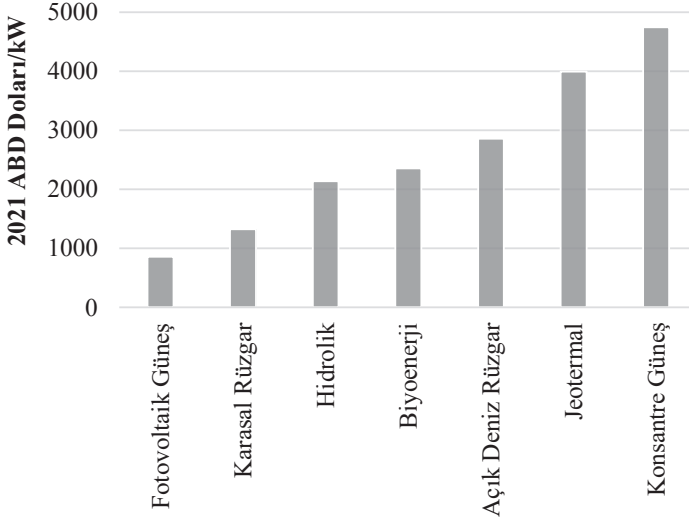
Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi seviyeleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek elektrik enerjisi üretimi hidrolik enerjiden sağlanmıştır. Bu bağlamda dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından en yüksek elektrik enerjisi üretimi sırasıyla hidrolik (4273.8 TWh), rüzgar (1861.9 TWh), güneş (1032.5 TWh), biyoenerji (583.7 TWh) ve jeotermal enerjiden (94.9 TWh) sağlanmıştır. Türkiyede ise sırasıyla hidrolik (55.7 TWh), rüzgar (31.1 TWh), güneş (12.8 TWh), jeotermal (10.0 TWh) ve biyoenerji (4.44 TWh) gelmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).



Şekil 6. 2021’de (a) Dünyada ve (b) Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022)

2021’de yenilenebilir enerjiye ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyetleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekilde 2021 ABD Doları, belirtilen yıldaki dolarların değerini ifade etmektedir. 2010 ve 2021 yılları arasında fotovoltaik güneş, konsantre güneş, karasal rüzgar ve açık deniz rüzgar enerjisi için küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyetlerinde trend genel olarak azalış yönünde olmuştur. Aynı zaman aralığında hidrolik enerji için kurulum maliyetleri genel olarak artış trendi göstermiştir. Diğer taraftan, biyoenerji için kurulum maliyetleri yüksek bir değişkenlik göstermiş olup 2010 yılına kıyasla kurulum maliyeti 2021’de düşüş göstermiştir. Jeotermal enerji santrallerinin kurulum maliyetlerinde 2012 yılından itibaren büyük bir değişim gözlenmemiş olup, 2010 yılına kıyasla kurulum maliyeti artmıştır. Bu bağlamda 2021’de yenilenebilir enerjiye ait en yüksek küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyetleri sırasıyla

konsantre güneş (4746 ABD doları/kW), Jeotermal (3991 ABD doları/kW), açık deniz rüzgar (2858 ABD doları/kW), biyoenerji (2353 ABD doları/kW), hidrolik (2135 ABD doları/kW), karasal rüzgar (1325 ABD doları/kW), fotovoltaik güneş (857 ABD doları/kW) enerjisinde görülmüştür (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).



Şekil 7. 2021’de yenilenebilir enerjiye ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyetleri (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022)

3.2 Rüzgar Enerjisi

Güneşin yaymış olduğu radyasyon yer yüzeyini homojen ısıtmayarak, hava sıcaklığı, basınç ve nem üzerinde farklılıklara sebep olur. Basınç farklılığından dolayı hava hareketinin meydana gelmesiyle rüzgar oluşmaktadır (Şenel ve Koç, 2015). Yerel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün eşit bir şekilde ısınmaması nedeniyle rüzgar özellikleri zamana ve konuma bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Rüzgar gücü popüler, sürdürülebilir, yenilenebilir ve temiz enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisinden elektrik üretmek için kullanılan ana yapı elemanı rüzgar türbinleridir. Bir rüzgar türbini hareket halindeki havanın kinetik enerjisini önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgar türbinlerinin karada olduğu gibi kıyıda uzak bölgelerde de kurulumları yapılabilmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan uygulamalar yüksek kurulum maliyeti, düşük kapasite ve değişken enerji üretimi gibi dezavantajlara sahipken, çevreci, temiz ve yenilenebilir olması, tükenme riski ve fiyat değişiminin olmaması, düşük bakım ve işletme maliyeti,

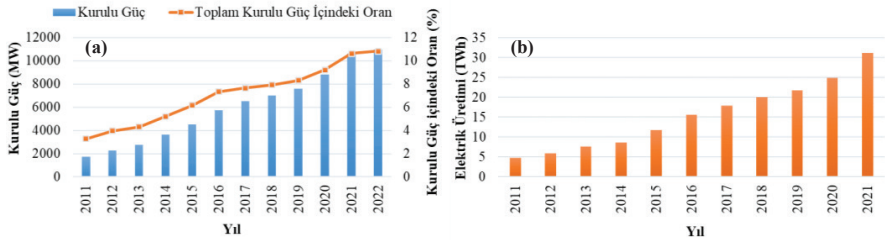
kısa sürede işletmeye alınması gibi birçok avantaja sahiptir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Küresel çapta rüzgar enerjisinden en yüksek elektrik enerjisi üretimi sırasıyla Asya (%42), Avrupa (%27), Kuzey Amerika (%24), Güney ve Merkez Amerika'da (%6) görülmektedir. Küresel çapta elektrik enerjisi ihtiyacı sırasıyla %3 ve %4 olan Afrika ve Orta Doğu ülkelerinin rüzgardan elektrik enerjisi üretimindeki payı kabaca %1 ve %0.1'e karşılık gelmektedir. Rüzgar enerjisinin ülkeler bazında durumu Tablo 1'de verilmiştir. Tabloya göre 2021 itibarıyla en büyük pay %35.2 ile Çin'e ve sonrasında %20.6 ile ABD'ye aittir. Türkiye ise dünya genelinde %1.7'lik bir paya sahiptir. 2021'de küresel çapta rüzgar enerjisindeki büyümenin %65'i Çin'de gerçekleşmiştir ve elektrik üretimine 148 TWh'lık güç eklemiştirlerdir. Bu değer Arjantin'in tüm elektrik ihtiyacına denk gelmektedir (Global Electricity Review, 2022). Hindistan'da rüzgardan ve güneşten elde edilen elektrik enerjisi üretimi ilk kez eşitlenmiştir. Güney Kore ve Japonya ise elektrik ihtiyaçlarının %1'inden daha azını rüzgardan karşılamaktadır. 2021 yılı içerisinde çoğunluğu ABD ve Çin'de olmak üzere, eklenen 100 GW'lık güç ile küresel çapta kurulu rüzgar gücü kapasitesi 800 GW'ı aşmıştır (Wind Electricity, 2022). Buna ek olarak, 2021'de dünyada rüzgar enerjisinden toplamda 1861.9 TWh elektrik enerjisi üretilmiştir. Bu değer küresel çapta üretilen elektriğin yaklaşık %6.5'ine ve enerjinin ise yaklaşık %2'sine denk gelmektedir (Global Electricity Review, 2022). 2050'ye kadar sıfır emisyon hedefinin gerçekleşmesi için rüzgar enerjisi üretiminin 2030 yılına kadar yaklaşık 4 kat artarak dünya çapında elektriğin %21'ini üretir duruma gelmesi gerekmektedir. Bu da rüzgar enerjisi üretim gücünün 2030 yılına gelindiğinde 8008 TWh seviyesine çıkması anlamına gelmektedir. Bu hedefin gerçekleştirilebilmesi için son 10 yılda ortalama %15 olan rüzgar enerjisindeki büyümenin yıllık bazda %18'lere yükseltilmesi gerekmektedir (Net Zero by 2050, 2021). Ülkelerin toplam elektrik enerjisi üretimi içerisinde en yüksek rüzgar enerjisi payına sahip ülke %48 ile Danimarka olmuştur. Kenya payını %11'den %16'ya çıkararak yıllık bazda en büyük artışı elde etmiştir. Türkiye, ABD, Avustralya ve Brezilya 2015'deki %5'lik paylarını yaklaşık iki katına çıkararak 2021'de üretilen elektriğin yaklaşık %10'unu rüzgardan üretmiştir (Global Electricity Review, 2022).

Karasal rüzgar türbin teknolojisinin gelişmesiyle günümüzde daha büyük ve güvenilir türbinler üretilmektedir. Bu durum türbinlerin kapasite faktörlerini de arttırmıştır. Ayrıca, ölçek ekonomisi, artan rekabet ve sektördeki büyüme nedeniyle kurulum, işletme, bakım ve seviyelendirilmiş enerji maliyetleri de düşme eğilimi göstermiştir. Bir karasal rüzgar türbini projesinde toplam kurulum maliyetinin en büyük payı toplam maliyetin %64 ila %84'üne denk gelen rüzgar türbinlerine aittir (Renewable Power Generation Costs in 2018, 2019). Rüzgar türbinlerinde maliyetlerin önemli bir kısmını kuleler, kurulum, şebeke bağlantısı,

Tablo 1. Rüzgar enerjisinin ülkeler bazında durumu (Global Electricity Review, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

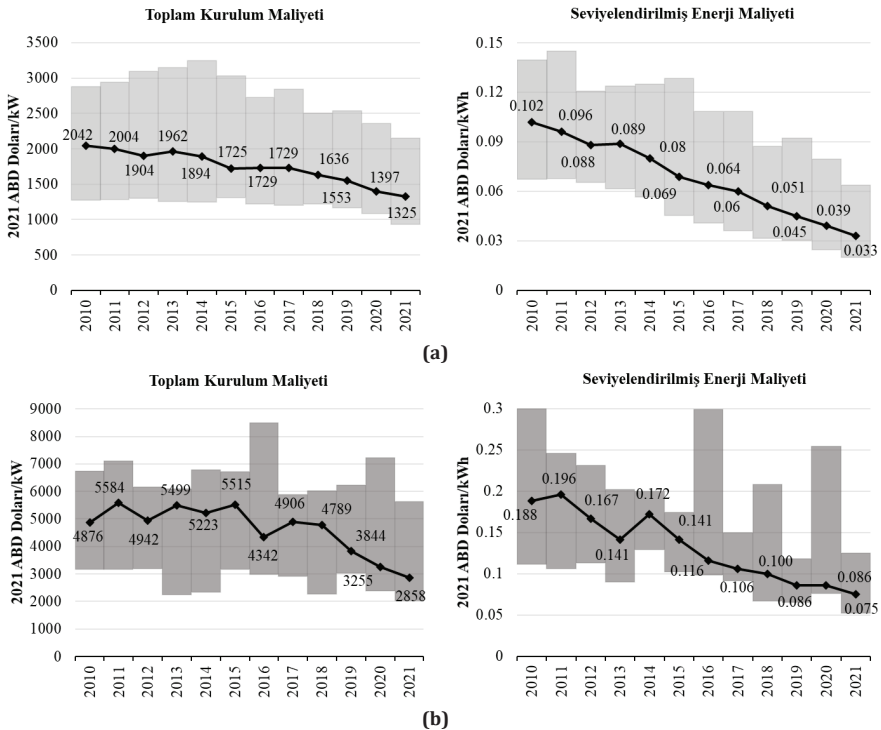
Ülkeler	Yıllar	Kurulu Güç (GW)	Elektrik Enerjisi Üretimi (TWh)	Toplam Elektrik Üretimi İçindeki Payı (%)	Dünya Rüzgar Enerjisi Üretimindeki Payı (%)
Çin	2019	209.6	405.3	5.4	28.5
	2020	282.1	466.5	6.0	29.2
	2021	329.0	655.6	7.7	35.2
ABD	2019	104.1	298.9	6.8	21.0
	2020	118.7	341.4	8.0	21.4
	2021	132.7	383.6	8.7	20.6
Almanya	2019	60.7	125.9	20.7	8.9
	2020	62.2	132.1	23.0	8.3
	2021	63.8	117.7	20.1	6.3
İngiltere	2019	24.1	63.8	19.7	4.5
	2020	24.5	75.4	24.2	4.7
	2021	27.1	64.5	20.8	3.5
Hindistan	2019	37.5	63.3	3.9	4.5
	2020	38.6	60.4	3.9	3.8
	2021	40.1	68.1	4.0	3.7
Türkiye	2019	7.6	21.7	7.2	1.5
	2020	8.8	24.8	8.1	1.6
	2021	10.6	31.1	9.3	1.7



Şekil 8. Türkiye'de yıllara göre rüzgar enerjisine dayalı (a) kurulu güç ve (b) elektrik enerjisi üretimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

teslimat ve geliştirme çalışmaları oluşturmaktadır. Toplam kurulum maliyetinin en küçük payını ise proje ve arazi maliyetleriyle birlikte çevresel etki değerlendirilmesi ve diğer planlama gereksinimleri oluşturmaktadır (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).

Karasal rüzgar enerjisine ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 9 (a)'da gösterilmiştir. 2010 ve 2021 yılları arasında küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti %35'lik düşüşle 2042 ABD doları/kW'dan 1325 ABD doları/kW seviyelerine gelmiştir. Hindistan (926 ABD doları/kW), Brezilya (1150 ABD doları/kW) ve Çin (1157 ABD doları/kW) 2021'de en rekabetçi ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyetlerine sahip ülkeler olmuştur. 2010 ve 2021 arasında ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyetleri Hindistan'da %53, Brezilya'da %58 ve Çin'de %26 düşmüştür. Türkiye'de ise karasal rüzgar enerjisinden ilk veri 1998'de alınmış olup, bu tarihten günümüze kadar olan süreçte ağırlıklı ortalama toplam



Şekil 9. (a) Karasal rüzgar ve (b) açık deniz rüzgar enerji santrallerine ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi. Sol taraf: toplam kurulum maliyeti; sağ taraf: seviyelendirilmiş enerji maliyeti (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022)

kurulum maliyeti %29'luk bir düşüşle kabaca 1255 ABD doları/kW seviyelerine gelmiştir. Küresel ağırlıklı ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 2010 ve 2021 arasında %68'lik düşüşle 0.102 ABD Doları/kWh'dan 0.033 ABD Doları/kWh seviyesine gelmiştir (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).

Açık deniz rüzgar enerjisi kapasitesi 2010 yılından itibaren hızlı bir şekilde büyümüştür. 2010 ve 2021 yılları arasında kümülatif konuşlandırılmış kapasite 3.1 GW'tan 55.7 GW'a yükselerek 18 katlık bir artış meydana gelmiştir. Açık deniz rüzgar enerji santrali projelerinde kurulum, işletme ve bakımın zorlu deniz ortamlarında yapılması gerektiğinden karasal rüzgar enerji santrali projelerine göre daha fazla maliyetlidirler. Açık deniz rüzgar enerji santraline ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 9 (b)'de gösterilmiştir. Küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti 2010'da 4876 ABD doları/kW iken; 2021'de yaklaşık %42'lik bir düşüşle 2858 ABD doları/kW seviyelerine inmiştir. En büyük kümülatif konuşlandırılmış kapasiteye sahip olan Çin'de (yaklaşık 9 GW) 2010 ile 2021 arasında toplam kurulum maliyeti 4638 ABD doları/kW'dan 2857 ABD doları/kW'a gerileyerek yaklaşık %38'lik bir düşüş görülmüştür. 2021'de ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti Avrupa'da 2775 ABD doları/kW ve Asya'da ise 2876 ABD doları/kW seviyelerindedir. Açık deniz rüzgar enerjisine ait küresel ağırlıklı ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti 2010 ve 2021 arasında %60 azalarak 0.075 ABD Doları/kWh olmuştur (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).

3.3 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonu sonucu hidrojen gazının helyuma dönüşmesiyle açığa çıkan çok güçlü bir ışınım enerjisidir. Güneş yaydığı yaklaşık 3.9×10^{17} TW güç ile temiz ve tükenmez bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu güç değeri atmosferin dışında 1370 W/m^2 seviyesinde, yeryüzünde ise $0-1100 \text{ W/m}^2$ aralığında değişmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Koç ve Kaya, 2015; Koç ve Şenel, 2013). Güneş enerjisinden doğrudan ısı enerjisi olarak faydalanılabileceği gibi, dolaylı yoldan elektrik enerjisine dönüştürülerek de yararlanılabilir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi, fotovoltaik hücrelerle ya da konsantre güneş enerjisi sistemleri kullanılarak yapılmaktadır. Fotovoltaik hücrelerde, fotovoltaik etkiyi kullanarak ışığı elektrik akımına çevirir. Başlangıçta küçük ve orta ölçekteki uygulamalar için elektrik kaynağı olarak kullanılırken, günümüzde fotovoltaik güç santrallerinden gigawatt saat ölçeğinde elektrik enerjisi elde edilmektedir. Konsantre güneş enerjisi sistemlerinde ise, geniş bir alandaki güneş ışığını bir noktada odaklamak için lensler, aynalar ve güneş takip sistemleri kullanılır. Genellikle üretilen ısıyla bir elektrik güç jeneratörüne bağlı buhar türbinini harekete geçirmek için kullanılırlar.

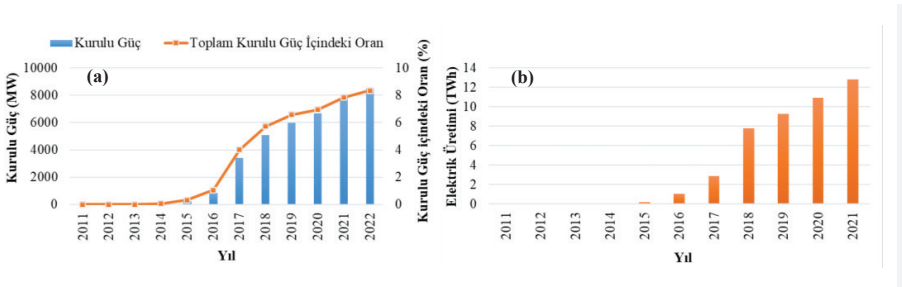
2021'de dünya çapında güneş enerjisine dayalı üretim %22 artmıştır. Bu bağlamda yıllık bazda üretilen güç 186.3 TWh artarak 1032.5 TWh olmuştur. Ayrıca 2015'de Paris Antlaşması imzalandığında güneş enerjisi, dünya elektriğinin %1.1'ini karşılarken; 2021'de %3.6'sını üretir duruma gelmiştir. Diğer taraftan küresel çapta güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi Afrika ülkelerinde %1, Orta Doğu ülkelerinde ise %2 ile sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda en yüksek üretim payına sahip bölgelerin sırasıyla; Asya (%56), Avrupa (%19), Kuzey Amerika (%18), Güney ve Merkez Amerika (%4) olduğu görülmektedir. Güneş enerjisinin ülkeler bazında durumu Tablo 2'de verilmiştir. Bu bağlamda dünyada en yüksek üretim payı %31.7 ile Çin'e, hemen ardından %16'lık bir payla ABD'ye aittir. Diğer taraftan, Türkiye'nin dünya çapında üretim payı ise %1.2'dir. 2050'ye kadar net sıfır emisyon hedefinin gerçekleşmesi için güneş enerjisi üretiminin 2030

Tablo 2. Güneş enerjisinin ülkeler bazında durumu (Global Electricity Review, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

Ülkeler	Yıllar	Kurulu Güç (GW)	Elektrik Enerjisi Üretimi (TWh)	Toplam Elektrik Üretimi İçindeki Pay (%)	Dünya Güneş Enerjisi Üretimindeki Payı (%)
Çin	2019	204.6	224.0	3.0	31.8
	2020	253.4	261.1	3.4	30.9
	2021	306.4	327.0	3.8	31.7
ABD	2019	59.1	108.0	2.4	15.3
	2020	73.8	132.0	3.1	15.6
	2021	93.7	165.4	3.8	16.0
Japonya	2019	63.2	67.8	6.4	9.6
	2020	69.8	75.1	7.5	8.9
	2021	74.2	86.3	8.5	8.4
Hindistan	2019	34.9	46.3	2.9	6.6
	2020	39.0	58.7	3.8	6.9
	2021	49.3	68.3	4.0	6.6
Almanya	2019	48.9	44.4	7.3	6.3
	2020	53.7	48.6	8.5	5.7
	2021	58.5	49.0	8.4	4.7
Türkiye	2019	6.0	9.3	3.0	1.3
	2020	6.7	11.0	3.6	1.3
	2021	7.8	12.8	3.8	1.2

yılına kadar yaklaşık 7 katına çıkarak 6970 TWh seviyesine ve dünya çapında elektriğin %19'unu üretir duruma gelmesi gerekmektedir. Bu hedefin gerçekleştirilebilmesi için son 10 yılda ortalama %33 olan güneş enerjisindeki büyümenin yıllık bazda %24 seviyelerinde tutulması gerekmektedir (Global Electricity Review, 2022; Net Zero by 2050, 2021). Dünyadaki büyük ülkeler arasında Avustralya kendi elektriğinin %11.7'sini güneş enerjisinden sağlayarak bu alanda en yüksek orana sahiptir. Vietnam ise 2020'de elektriğinin %2'sini güneş enerjisinden sağlarken, 2021'de bu oranı %10'a yükselterek bu alanda en büyük artışı sağlamıştır. Aynı şekilde İspanya ve Hollanda da toplam elektrik üretimleri içerisindeki güneş enerjisi payını yaklaşık %10 seviyelerine yükseltmişlerdir. Tüm ülkeler açısından değerlendirildiğinde; Yemen kendi elektriğinin %15'ini güneş enerjisinden sağlayarak bu alanda birinci ülke konumundadır. Ancak küçük ve nüfusu düşük bir ülke olması nedeniyle, üretim kapasitesi diğer büyük ülkelerle karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmaktadır.

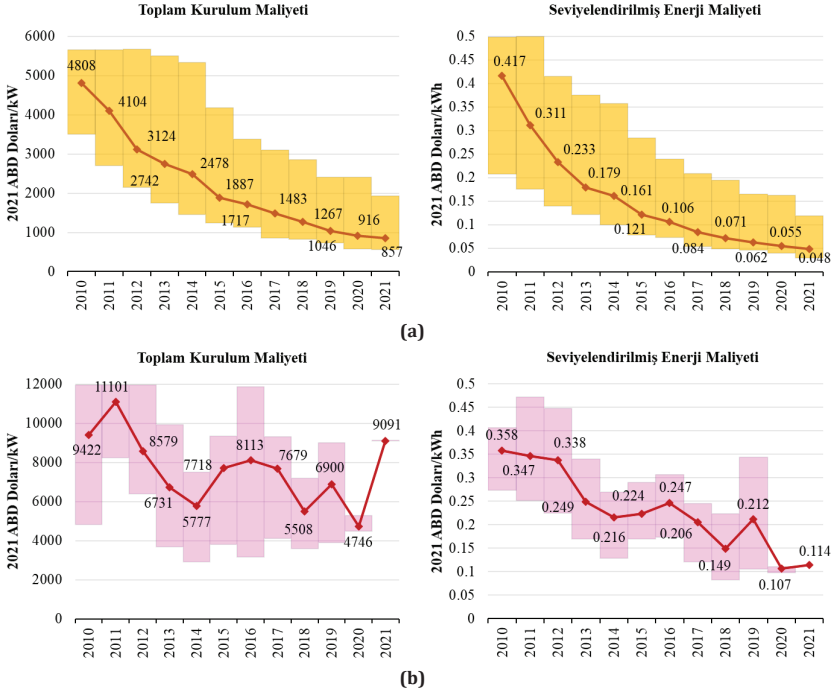
Güneş Enerji Potansiyeli Atlasında (GEPA) gerçekleştirilen hesaplamalara göre, Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresinin ortalama 2741 saat, yıllık toplam ışınım miktarının ortalama 1527.46 kWh/m² olduğu belirlenmiştir. Raporda aylara göre hesaplanan ortalama radyasyon miktarları da belirlenmiştir. Bu bağlamda sırasıyla 6.57 kWh/m² ve 6.50 kWh/m² değerleriyle Haziran ve Temmuz ayları en yüksek radyasyonun olduğu aylar, 1.59 kWh/m² değeriyle Aralık ayı en düşük radyasyonun olduğu ay olarak tespit edilmiştir. Türkiye'de yıllara göre güneş enerjisine dayalı kurulu güç ve elektrik enerjisi üretimi Şekil 10'da verilmiştir. Türkiye 2014'te 40 MW olan kurulu gücünü 2022 Haziran ayı itibarıyla 8479 MW'a çıkarmıştır. Buna bağlı olarak, toplam kurulu güç içerisinde güneş enerjisinin payı da %0.06'dan %8.35'e yükselmiştir. Güneşten elde edilen elektrik enerjisi ise 2021 yılı itibarıyla 12.83 TWh seviyelerine ulaşmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022).



Şekil 10. Türkiye'de yıllara göre güneş enerjisine dayalı (a) kurulu güç ve (b) elektrik enerjisi üretimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

Fotovoltaik güneş enerjisine ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 11 (a)'da gösterilmiştir. Şebeke ölçekli projelerin küresel ağırlıklı toplam kurulum maliyeti 2010 ile 2021 yılları arasında yaklaşık %82 düşerek 857 ABD doları/kW seviyesine gelmiştir. Aynı zaman aralığında şebeke ölçekli fotovoltaik güneş enerjisi toplam kurulum maliyeti ABD'de %77 (1085 ABD doları/kW), Çin'de %83 (628 ABD doları/kW), İspanya'da %83 (816 ABD doları/kW), Hindistan'da %89 (590 ABD doları/kW), Almanya'da %82 (694 ABD doları/kW) ve Kore Cumhuriyeti'nde %90 (940 ABD doları/kW) oranında düşmüştür. Türkiye'de ise toplam kurulum maliyeti 2020 ve 2021 arasında %5, 2016 ve 2021 arasında %51 düşerek yaklaşık 810 ABD doları/kW seviyelerine gelmiş ve küresel ağırlıklı ortalamanın altında kalmıştır. Şebeke ölçekli fotovoltaik tesislerin küresel ağırlıklı ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 2010 ve 2021 arasında %88 düşerek 0.417 ABD Doları/kWh'dan 0.048 ABD Doları/kWh seviyelerine gelmiştir (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).

Konsantre güneş enerjisi gelişiminin ilk yıllarında, genellikle termal enerji depolama sisteminin ekonomik olmaması nedeniyle kullanımı kısıtlıydı. Ancak 2015 yılından itibaren neredeyse tüm projelerde termal enerji depolama sistemi kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum kapasite faktörlerini arttırmannın ve seviyelendirilmiş enerji maliyetini düşürmenin bir yoludur. Bu bağlamda parabolik oluklu kollektör tesislerinin termal depolama kapasitesi 2010 ve 2014 yılları arasında 3.3 saat iken, 2015 ve 2019 arasında %84'lük bir artışla 6.1 saate yükselmiştir. Güneş kuleleri için bu değer 2010 ve 2014 arasında 5 saat iken, 2015 ve 2019 arasında %53'lük artışla 7.7 saate yükselmiştir. Konsantre güneş enerjisine ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 11 (b)'de gösterilmiştir. Konsantre güneş enerjisi tesisleri için küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti termal enerji depolama sistemlerinin boyutunun artmasına rağmen 2010 ve 2020 arasında yaklaşık %50 düşerek 9422 ABD doları/kWh'dan 4746 ABD doları/kW seviyesine gelmiştir. 2021'de ise bu trend bozularak toplam kurulum maliyeti 9091 ABD doları/kW seviyesine yükselmiştir. Ancak bu veri sadece bir projeden alınmış olup, Latin Amerika'da ilk kez geliştirilen ve 2021 Haziran ayında açılışı yapılan güneş enerjisi santralının kurulum maliyetine denk gelmektedir. Konsantre güneş enerjisine ait küresel ağırlıklı ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti 2010 ve 2021 arasında %68'lik düşüş gerçekleştirerek 0.114 ABD Doları/kWh olmuştur (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).



Şekil 11. (a) Fotovoltaik ve (b) konsantre güneş enerjisine ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi. Sol taraf: toplam kurulum maliyeti; sağ taraf: seviyelendirilmiş enerji maliyeti (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022)

3.4 Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji, su gücünün kullanıldığı yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Genellikle nehirler üzerine inşa edilen barajlar ile suyun potansiyel enerjisinden faydalanarak hidroelektrik santraller yoluyla türbinde elektrik enerjisi üretiminde kullanılırlar (Koç ve Kaya, 2015). Hidroelektrik santraller (HES), çevreye uyumlu, uzun ömürlü, yüksek verimli, işletme maliyeti çok düşük, yakıt gideri olmayan temiz ve yenilenebilir enerji kaynağıdır.

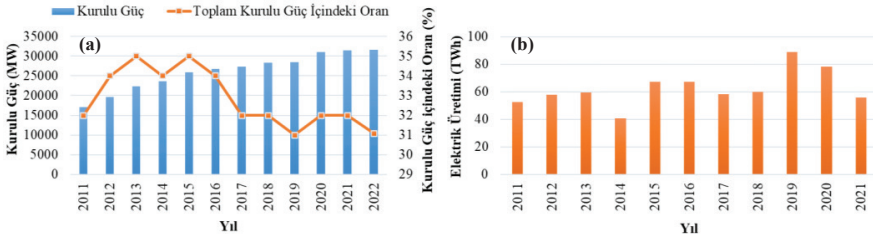
Hidrolik enerjiden faydalanma oranı yağmur yağışlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda Çin, Brezilya, ABD ve Türkiye gibi hidroelektrik üretimi açısından önemli ülkelerdeki düşük yağış oranları nedeniyle, hidroelektrik üretimi 2021'de dünya çapında %1.66'ya düşmüştür. Bu bağlamda, hidrolik enerji 2000'de dünya elektrik enerjisinin %18'ini üretirken, 2021'de bu oran %15'e düşmüştür. Çin 2000 yılından itibaren küresel çapta hidroelektrik üretimindeki büyümenin üçte ikisini sağlayarak, bu alanda bir sonraki en büyük ülke olan Kanada'nın yaklaşık üç katı üretime sahip olmuştur. En yüksek hidrolik enerji üretiminin sırasıyla Asya

(%43), Kuzey Amerika (%16), Avrupa (%15), Güney ve Orta Amerika (%15) kıtalarında olduğu görülmektedir. Hidrolik enerjinin ülkeler bazında durumu Tablo 3'te verilmiştir. Hidrolik enerjiden elde edilen elektriğin küresel çapta en yüksek paya sahip olduğu ülke %30.4 ile Çin'dir. Çin'in ardından yaklaşık %9'luk payla Brezilya ve Kanada gelmektedir. Türkiye ise hidrolik enerjiyi kullanarak dünya elektriğinin %1.3'ünü üretmektedir. Paraguay ve Orta Afrika Cumhuriyeti kendi elektriğinin %100'ünü hidrolik enerjiden sağlayarak bu alanda en büyük paya sahip ülkelerdir. Bu ülkeleri %99 ile Kongo, %97 ile Nepal ve %96 ile Etiyopya takip etmektedir (Global Electricity Review, 2022). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda hidrolik enerji üretiminin 2030 yılına kadar yaklaşık %40 artması ve elektrik talebi arttıkça pazar payını neredeyse değiştirmemesi gerekmektedir. Bu bağlamda 2021'de dünya çapında 4273.8 TWh olan hidroelektrik enerji üretiminin, 2030 yılına gelindiğinde 5870 TWh seviyesine gelmesi beklenmektedir (Net Zero by 2050, 2021).

Tablo 3. Hidrolik enerjinin ülkeler bazında durumu (Global Electricity Review, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

Ülkeler	Yıllar	Kurulu Güç (GW)	Elektrik Enerjisi Üretimi (TWh)	Toplam Elektrik Üretimi İçindeki Pay (%)	Dünya Hidrolik Enerjisi Üretimindeki Payı (%)
Çin	2019	358.0	1272.5	17.0	30.1
	2020	370.3	1321.7	17.0	30.4
	2021	390.9	1300.0	15.2	30.4
Kanada	2019	81.4	381.8	23.5	9.0
	2020	81.4	386.5	24.7	8.9
	2021	82.7	380.9	22.2	8.9
Brezilya	2019	109.1	397.88	148.7	9.4
	2020	109.3	396.38	150.5	9.1
	2021	109.4	362.82	133.3	8.5
ABD	2019	102.6	285.5	6.5	6.7
	2020	105.8	282.8	6.6	6.5
	2021	101.9	257.7	5.8	6.0
Rusya	2019	52.3	194.4	18.5	4.6
	2020	52.4	212.4	21.3	4.9
	2021	52.5	214.5	21.0	5.0
Türkiye	2019	28.5	88.8	29.2	2.1
	2020	31.0	78.1	25.5	1.8
	2021	31.5	55.7	16.7	1.3

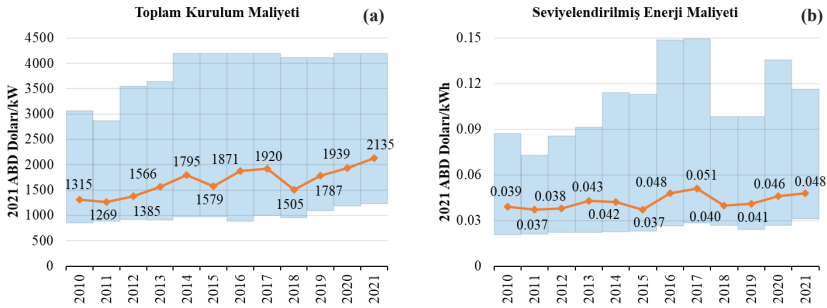
Türkiye’de teorik hidroelektrik potansiyel 433 TWh/yıl olarak hesaplanırken, teknik olarak değerlendirilebilir potansiyel 216 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Ancak sosyal, çevresel, ekonomik ve teknik açılardan değerlendirildiğinde 180 TWh/yıl’lık kısmı yapılabilir durumdadır. Türkiye’de bugüne kadar geliştirilen hidroelektrik potansiyeli yaklaşık olarak 160 TWh/yıl seviyelerindedir. Bunun 2021 yılı sonu itibarıyla üretim potansiyeli olarak işletmeye alınan kısmı 109 TWh/yıl’a ulaşmıştır. Türkiye’nin teknik hidroelektrik potansiyeli dünya hidroelektrik potansiyelinin %1.5’ine denk gelirken, Avrupa teknik hidroelektrik potansiyelinin %18’ine denk gelmektedir (DSİ Genel Müdürlüğü 2021 Faaliyet Raporu, 2022). Türkiye’de yıllara göre hidrolik enerjiye dayalı kurulu güç ve elektrik enerjisi üretimi Şekil 12’de gösterilmiştir. Türkiye’de hidrolik enerjiye dayalı kurulu güç her geçen yıl artmaya devam etmiştir. Bu bağlamda 2011’de 17137 MW olan kurulu güç, 2022 Haziran ayına gelindiğinde 31558 MW’a ulaşmıştır. Buna karşın toplam kurulu güç içindeki oran 2013 ve 2015 yıllarında %35 ile en yüksek değerlerine ulaştıktan sonra düşüşe geçmiş ve 2022 Haziran ayı itibarıyla %31,09’a gerilemiştir. 2021’de Türkiye’de hidroelektrik enerjiden 55.7 TWh elektrik üretilirken, bu değer 2022 Haziran ayı itibarıyla 35.2 TWh seviyelerindedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022). Bu durum kuraklık etkisiyle santrallerdeki su seviyesinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 12. Türkiye’de yıllara göre hidrolik enerjiye dayalı (a) kurulu güç ve (b) elektrik enerjisi üretimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022)

Hidroelektrik santrallerin kurulum maliyetinde en büyük paylar inşaat işleri ve elektro-mekanik ekipmanlara aittir. Ayrıca işletme sermayesi ihtiyacı ve inşaat sırasındaki faiz nedeniyle uzun teslim süreleri de toplam kurulum maliyetinde önemli bir paya sahiptir. Toplam maliyeti önemli derecede etkileyecek diğer kalemler ise ön fizibilite ve fizibilite çalışmaları, yerel paydaşlar ve politika yapıcılarla istişareler, çevresel ve sosyo-ekonomik hafifletme önlemleri ve arazi temi-

nidir. Hidroelektrik santrellerine ait küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 13'de gösterilmiştir. 2010 ve 2021 yılları arasında küresel ağırlıklı toplam kurulum maliyeti %62 artarak 1315 ABD doları/kW'dan 2135 ABD doları/kW seviyesine yükselmiştir. 2010 ve 2014 arasında istikrarlı yükselişten sonra toplam kurulum maliyeti 2014 ve 2020 arasında yıllık bazda 1500 ABD doları/kW ile 1940 ABD doları/kW gibi bir aralıkta değişkenlik göstermiştir. 2021'deki artış sadece farklı bölgelerde konuşlandırma payından değil, aynı zamanda projeye özgü maliyetlerdeki artış trendinden kaynaklanmıştır. 2021'de devreye alınan projelerin küresel ağırlıklı ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti 2010 yılına göre %23 artarak 0.048 ABD Doları/kWh seviyesine yükselmiştir (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).



Şekil 13. Hidroelektrik santrallerde küresel ağırlıklı ortalama (a) toplam kurulum maliyeti ve (b) seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022)

3.5 Biyoenerji

Biyoenerji, elektrik ya da ısı üretmek için içerisinde karbonhidrat bileşikleri bulunan hayvansal ve bitkisel kökenli biyolojik maddelerin yakıt olarak kullanılmasından elde edilen bir enerji kaynağıdır. Biyodizel, biyoetanol ve biyogaz gibi yakıtlar biyolojik kaynaklardan yaygın olarak elde edilen yakıt türleridir. Biyodizel ve biyoetanol hayvansal yağlardan ya da bitkilerden elde edilirken, biyogaz ise hayvansal, bitkisel, endüstriyel ve kentsel atıklar gibi organik maddelerin oksijensiz ortamda fermantasyonuyla ortaya çıkan ve çoğunlukla metan ve karbondioksit gazlarından oluşan yakıt türüdür (Koç ve Kaya, 2015).

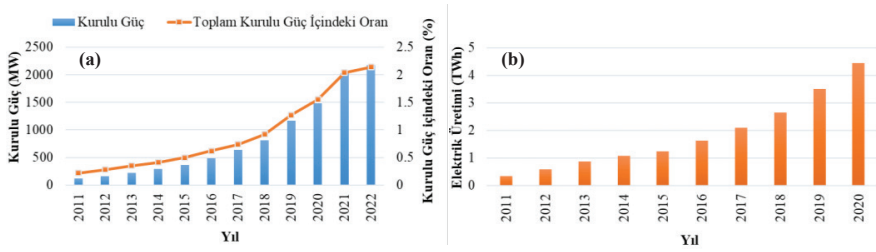
Dünyada biyoenerji üretimi 2021'de %6 artarak 646 TWh'a yükselmiştir. Bu bağlamda biyoenerji üretimi 2015 yılından bu yana dünya çapındaki elektrik ihtiyacıyla paralel artarak küresel üretimdeki %2'lik payını korumuştur. Diğer yenilenebilir enerji türlerinde olduğu gibi biyoenerji üretiminde de en yüksek paya

Asya (%43) ve Avrupa (%31) sahiptir. Çin küresel çapta biyoenerji üretiminde %23'lük pay ile açık ara en yüksek paya sahiptir ve Japonya dışında biyoenerji üretimini kayda değer bir şekilde arttıran tek ülke konumundadır. Çin 2015 yılından itibaren üretimini üç katına çıkararak küresel çaptaki büyümenin üçte ikisini sağlamıştır. Japonya, sadece 2021'de gerçekleştirdiği %29'luk büyümeye İngiltere'yi geçerek beşinci en büyük biyoenerji üreticisi konumuna gelmiştir. Biyoenerji üretiminde en büyük paya sahip ABD, Almanya ve Brezilya gibi diğer büyük ülkelerde 2015 ve 2021 yılları arasında neredeyse büyüme görülmemiştir. Türkiye ise küresel üretimde %1'lik bir paya sahiptir. Danimarka, kendi elektriğinin %23'ünü biyoenerjiden sağlayarak bu alanda en büyük paya sahip ülke konumundadır. Danimarka'yı %19'luk payla Finlandiya, %16'luk payla Guetemala takip etmektedir (Global Electricity Review, 2022). 2020'de dünyada biyoyakıt ve atıklardan üretilen elektrik miktarları Tablo 4'te verilmiştir. Tabloya göre birincil katı yakıtlardan 113961 GWh ile Çin, endüstriyel atıklardan 18522 GWh ile Japonya, biyogazdan 33041 GWh ile Almanya, sıvı yakıtlardan 555 GWh ile Brezilya ve belediye atıklarından 7120 GWh ile ABD en yüksek elektrik üretimine sahip ülkelerdir. Biyoyakıt ve atıklardan toplamda 124336 GWh elektrik üretimiyle Çin birinci ülke konumundadır. Uluslararası enerji ajansının raporuna göre, küresel ısınmanın 1.5 oC'de tutulması için biyoenerji üretiminin 2020'den 2030 yılına kadar yaklaşık iki katına çıkması gerekmektedir. Bu durum 2021'de yıllık 646 TWh olan biyoenerji üretiminin 2030'da 1407 TWh seviyesine yükselmesi gerektiği anlamına gelmektedir (Net Zero by 2050, 2021).

Tablo 4. 2020'de dünyada biyoyakıt ve atıklardan üretilen elektrik enerjisi [GWh] (Renewables 2022, 2023)

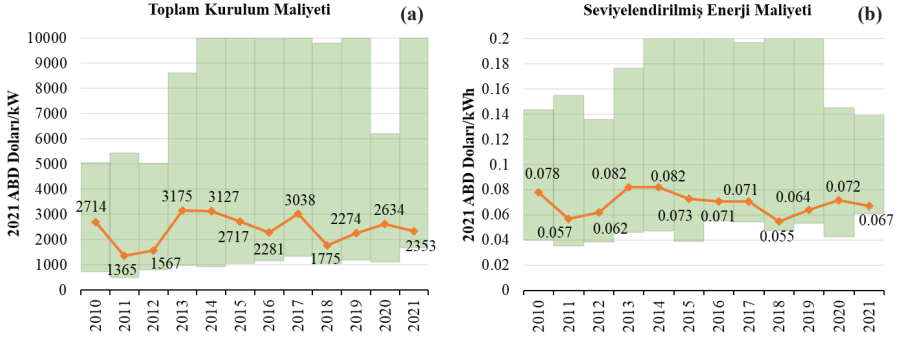
Ülkeler	Birincil katı biyoyakıtlar	Endüstriyel atıklar	Biyogaz	Sıvı biyoyakıtlar	Belediye atıkları	Toplam
Çin	113961	10301	31	0	43	124336
ABD	40692	1512	12070	335	7120	61729
Brezilya	56231	2269	1956	555	0	61011
Almanya	11327	772	33041	383	5811	51334
Japonya	22181	18522	136	0	1824	42663
İngiltere	27523	1246	7571	0	4304	40644
Hindistan	30170	0	1144	0	798	32112
Türkiye	1321	15	3032	38	14	4420
OECD ülkeleri	192996	24995	82269	7562	33927	341749

Türkiye Cumhuriyeti Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre, Türkiye’de toplanabileceği düşünülen atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık 3.9 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP)/yıl’dır. Türkiye’de yıllara göre biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı kurulu güç ve elektrik enerjisi üretimi Şekil 14’te verilmiştir. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi biyokütle enerjisine dayalı kurulu güç her geçen yıl artmaya devam etmiştir. 2011’de biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı kurulu güç 115 MW ve bunun toplam kurulu güç içerisindeki oranı %0.22’iken, 2022 Haziran ayına geldiğinde kurulu güç 2172 MW’a, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %2.14’e ulaşılmıştır. Biyokütle ve atık ısıdan üretilen elektrik enerjisi ise 2020 yılı itibarıyla 4.44 TWh seviyesine yükselmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).



Şekil 14. Türkiye’de yıllara göre biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı (a) kurulu güç ve (b) elektrik enerjisi üretimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022)

Biyokütle enerji üretim maliyeti hem teknoloji bileşeni hem de yerel maliyet bileşeni açısından bölgesel olarak değişkenlik göstermektedir. Bir biyokütle enerji santralinin kurulum maliyetindeki ana etkenler planlama, mühendislik ve inşaat maliyetleri, yakıt taşıma ve hazırlama sistemleri, ana taşıyıcı ve yakıt dönüştürme sistemleridir. Bunlara ek olarak şebeke bağlantısı ve altyapı da kurulum maliyetlerini etkilemektedir. Biyoenerji için küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 15’te gösterilmiştir. 2010 ve 2021 arasında küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti yüksek bir değişkenliğe sahip olmakla birlikte yaklaşık %13’lük bir düşüşle 2714 ABD doları/kW’dan 2353 ABD doları/kW’ya düşmüştür. Aynı zaman aralığında en yüksek ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti 2013’te 3175 ABD doları/kW iken en düşük kurulum maliyeti 2011’de 1365 ABD doları/kW seviyesindedir. Biyoenerjiye ait küresel ağırlıklı ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti 2010’da 0.078 ABD Doları/kWh iken 2021’de 0.067 ABD Doları/kWh seviyesine düşmüştür (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).



Şekil 15. Biyoenerji için küresel ağırlıklı ortalama (a) toplam kurulum maliyeti ve (b) seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022)

3.6 Jeotermal Enerji

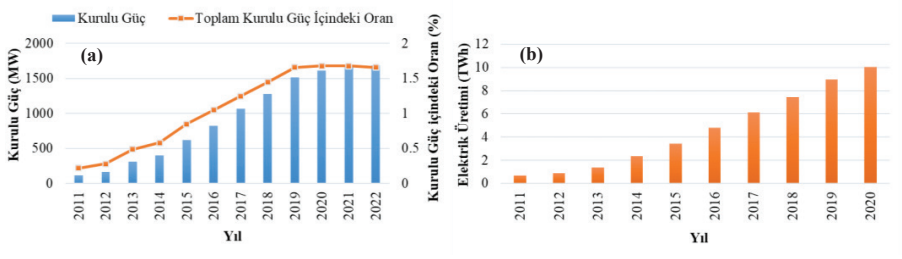
Jeotermal enerji, gezegenin oluşumundan ve malzemelerin radyoaktif bozunmasından kaynaklanan, yerkürenin çeşitli derinliklerinde birikmiş basınçlı sıcak akışkan (su, buhar, gaz) ve kuru kayaların taşıdığı termal enerjidir (Koç ve Kaya, 2015). Bu enerji doğrudan ısıtma amacıyla kullanılabilmesi gibi dolaylı olarak elektrik enerjisi üretiminde de kullanılmaktadır. Jeotermal enerji, güvenilir, sürdürülebilir, tükenmez, çevreci ve herhangi bir enerji dönüşümünden geçmemiş birincil enerji kaynağıdır.

Dünyada jeotermal enerjiye dayalı en büyük kurulu güç kapasitesine sahip ülkeler Tablo 5'te verilmiştir. 2021'de sahip olduğu 3889 MW kurulu güç ile ABD en büyük kurulu güç kapasitesine sahip ülke olmaya devam etmektedir. ABD'yi sırasıyla Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda takip etmektedir. Türkiye 2021 yılı itibarıyla 1676 MW kurulu güç ile Avrupa'da birinci, dünyada ise dördüncü ülke konumundadır. Tabloda verilen ülkeler arasında Japonya 2012 yılına kıyasla kurulu güç kapasitesini düşüren tek ülkedir. Dünyada ise jeotermal enerjiye dayalı toplam kurulu güç kapasitesi her geçen yıl artmaya devam ederek 2021'de 15644 MW seviyesine yükselmiştir. Jeotermal enerjiden elektrik üretimi 2020'de kurulu güç kapasitesindeki 335 MW'lık artışla birlikte yaklaşık %2 artarak son beş yıldaki ortalama büyümenin altında kalmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda 2021-2030 yılları arasında yıllık elektrik üretimindeki büyümenin %13 olması gerekmektedir. Bu durum kurulu güç kapasitesinde yıllık ortalama 3.6 GW'lık artışa denk gelmektedir (Net Zero by 2050, 2021).

Tablo 5. Dünyada jeotermal enerjiye dayalı en büyük kurulu güç kapasitesine sahip ülkeler [MW] (Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022)

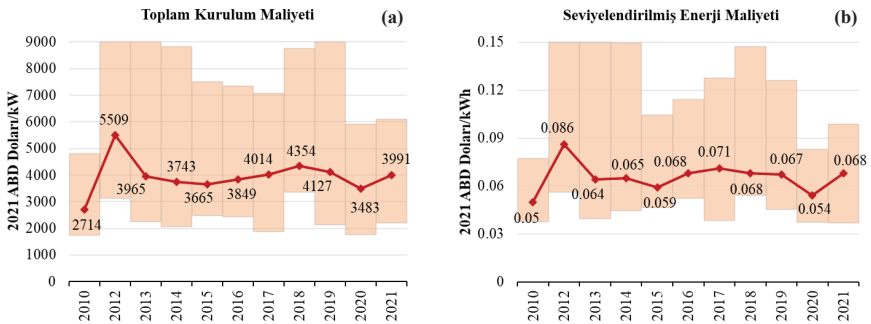
Ülkeler	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ABD	2592	2607	2514	2542	2517	2483	2444	2555	2587	3889
Endonezya	1336	1344	1404	1438	1533	1808	1948	2131	2131	2277
Filipinler	1847	1847	1916	1916	1916	1916	1928	1928	1928	1928
Türkiye	162	311	405	624	821	1064	1283	1515	1613	1676
Yeni Ze-landa	726	798	924	941	941	941	965	965	984	984
Meksika	824	823	813	906	926	926	951	951	951	976
Kenya	206	206	366	619	653	673	684	684	863	863
İtalya	728	729	768	768	767	767	767	767	772	802
İzlanda	665	665	665	665	665	710	756	756	756	756
Japonya	512	512	508	516	526	476	473	481	481	481
Dünya	10479	10717	11157	11812	12137	12697	13169	13738	14073	15644

Türkiye jeolojik ve coğrafik konumuyla aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer aldığı için jeotermal enerji potansiyeli yüksek bir ülke konumundadır. Ancak bu potansiyelin %90'ı düşük ve orta sıcaklıkta olup ısıtma ve termal turizm gibi doğrudan uygulamalarda, geriye kalan %10'luk kısım ise elektrik enerjisi üretimi gibi dolaylı uygulamalarda kullanılmaktadır. Jeotermal enerji potansiyeli en yüksek bölgelerin sırasıyla Batı Anadolu (%78), İç Anadolu (%9), Marmara (%7), Doğu Anadolu (%5) olduğu görülmektedir. Şehirler bazında değerlendirildiğinde en yüksek jeotermal enerji kurulu güç kapasiteleri sırasıyla; Aydın (850.4 MW), Denizli (353.8 MW), Manisa (349.2 MW), Çanakkale (28 MW) ve Afyonkarahisar (3 MW) illerinde bulunmaktadır. Türkiye'deki jeotermal kaynakların toplamda ısı potansiyeli açısından 35500 MWt, elektrik potansiyeli açısından 4500 MWe kapasiteye sahip olduğu tahmin edilmektedir. Sahip olduğu bu potansiyele bağlı olarak Türkiye'deki kurulu güç her geçen yıl hızlı bir şekilde artmaya devam etmektedir. Türkiye'de yıllara göre jeotermal enerjiye dayalı kurulu güç ve elektrik enerjisi üretimi Şekil 16'da gösterilmiştir. 2012'de 162 MW olan kurulu güç 2022 Haziran ayı itibariyle 1686 MW'a, toplam kurulu güç içerisinde oranı ise %0.28'den %1.66'ya yükselmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Jeotermal enerjinin ülkenin enerji arzındaki payı ise 2015'te %1.3 iken; 2020'de %3.3'e yükselmiş ve üretim neredeyse üç katına çıkarak 10 TWh'a ulaşmıştır.



Şekil 16. Türkiye'de yıllara göre jeotermal enerjiye dayalı (a) kurulu güç ve (b) elektrik enerjisi üretimi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Renewable Energy Statistics, 2022)

Jeotermal güç üretim tesisinin kurulumunda proje geliştirme, saha hazırlığı, üretim ve reenjeksiyon kuyuları, enerji santrali ve ilgili inşaat mühendisliği gibi ön maliyetler bulunmaktadır. Jeotermal projeler ayrıca sondaj maliyetindeki değişiklikten de etkilenmektedir. Özellikle, enerji santralının tipini (flaş, doğrudan buhar, ikili, hibrit) ve belirli bir kapasite için gereken kuyu sayısını belirleyen rezervuar kalitesi de proje maliyetini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu duruma daha düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik üretiminde diğer santral tiplerinden daha pahalı olan ikili (binary) santral kullanılması örnek gösterilebilir. Toplam kurulum maliyeti içerisinde ayrıca arama ve kaynak değerlendirme faaliyetleri de bulunmaktadır. 2009'da konvansiyonel yoğunlaşmalı flaş (flash) jeotermal enerji üretim projelerinin toplam kurulum maliyeti 2097 ABD doları/kW ile 4183 ABD doları/kW arasındayken, ikili (binary) enerji santrallerinin toplam kurulum maliyeti 2481 ABD doları/kW ve 6062 ABD doları/kW arasında değişmektedir. 2010 yılından itibaren toplam kurulum maliyetleri flaş enerji santral-



Şekil 17. Jeotermal enerji için küresel ağırlıklı ortalama toplam (a) kurulum maliyeti ve (b) seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022)

leri için 2260 ABD doları/kW ve 5580 ABD doları/kW arasında değişirken, ikili enerji santralleri için 2890 ABD doları/kW ve 5210 ABD doları/kW aralığında değişkenlik göstermektedir. Jeotermal enerji için küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 17’de gösterilmiştir. 2013 yılından itibaren ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti en yüksek 4354 ABD doları/kW ve en düşük 3483 ABD doları/kW olmakla birlikte nispeten ortalama 4000 ABD doları/kW seviyesinde sabit kalmıştır. 2021’de jeotermal enerjiye ait küresel ağırlıklı ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti bir önceki yıla göre %26 artarak 0.068 ABD Doları/kWh seviyesine yükselmiştir (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında Dünyada ve Türkiye’de genel enerji durumu incelendikten sonra gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının yerini alacağı düşünülen yenilenebilir enerji kaynaklarının durumu ve kurulum maliyetleri Dünya ve Türkiye ölçeğinde incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Günümüzde küresel çapta elektrik üretiminde kömür %36’lık pay ile en fazla kullanılan kaynak olmaya devam etmektedir. 2021’de kömürden elektrik üretimi 10244 TWh seviyesine yükselmiştir. Diğer taraftan toplam temiz enerjinin küresel çapta elektrik üretimindeki payı ise %38 seviyesindedir. Türkiye’de ise elektrik üretiminde en büyük pay %33.2 ile doğal gaz ve hemen peşinden %30.9 ile kömüre aittir. Kurulu güç açısından en büyük pay ise %30.9 ile hidrolik enerjiye aittir. Türkiye’de 2021’de 332.9 TWh elektrik tüketilmiştir. Bu tüketimin 2025’de 370 TWh’a, 2040’ta ise 591 TWh’ çıkacağı beklenmektedir.
2. IRENA’nın raporuna göre 2021’de eklenen yenilenebilir kapasitenin 2020’de sağlayacağı toplam tasarrufun 55 milyar ABD doları olacağı tahmin edilmektedir. Bu tasarrufun en büyük destekçisinin ise toplam tasarrufun %42’sine denk gelen karasal rüzgar enerjisi olması beklenmektedir. Ülke bazında bakıldığında 2022’deki toplam tasarrufa en büyük katkıyı %56 ile Çin’in vermesi beklenmektedir.
3. 2021’de bölgelere göre rüzgar enerjisi üretiminde en büyük paya %42 ile Asya, ülke bazında bakıldığında ise en büyük paya %35.2 ile Çin sahiptir. 2021’de dünya çapında rüzgar enerjisine dayalı toplam kurulu güç 824.9 GW, rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ise 1861.9 TWh’dır. Bu üretim miktarı dünya elektrik enerjisi ihtiyacının %6.5’ine denk gelmektedir. 2010 ve 2021 arasında küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti karasal rüzgar enerjisi için %35’lik düşüşle 1325 ABD doları/kW, açık deniz rüzgar

enerjisi için %42'lik bir düşüşle 2858 ABD doları/kW seviyesine gelmiştir. 2022 Haziran ayı itibariyle Türkiye'de rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç 10976 MW, toplam kurulu güç içerisindeki payı ise %10.81'dir. 2021'de Rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi ise 31.1 TWh seviyesiyle ülkenin toplam elektrik enerjisi üretiminin %9.3'üne denk gelmektedir. Türkiye'de karasal rüzgar enerjisinin ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti 1998 yılından bu yana %29 azalarak yaklaşık 1255 ABD doları/kW seviyelerine gelmiştir (Global Electricity Review, 2022; T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie, Roser ve Rosado, 2022; Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022; BP Statistical Review of World Energy, 2022).

4. 2021'de bölgelere göre güneş enerjisi üretiminde en büyük paya %56 ile Asya, ülke bazında bakıldığında ise en büyük paya %31.7 ile Çin sahiptir. 2021'de dünya çapında güneş enerjisine dayalı toplam kurulu güç 843.1 GW, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ise 1032.5 TWh'dır. Bu üretim dünya elektrik enerjisi ihtiyacının %3.6'sında denk gelmektedir. 2010 ve 2021 arasında şebeke ölçekli projelerin küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti fotovoltaik güneş enerjisi için %82 düşerek 857 ABD doları/kW seviyesine gelmiştir. Diğer taraftan konsantre güneş enerjisi için 2010 ve 2020 yılları arasında toplam kurulum maliyeti %50 düşerek 4746 ABD doları/kW seviyesine gelmiştir. 2022 Haziran ayı itibariyle Türkiye'de güneş enerjisine dayalı kurulu güç 8479 MW, toplam kurulu güç içerisindeki payı ise %8.35'dir. 2021'de güneş enerjisinden üretilen elektrik enerjisi ise 12.8 TWh seviyesiyle ülkenin toplam elektrik üretiminin %3.8'ine denk gelmektedir. Türkiye'de fotovoltaik güneş enerjisinin ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti 2016 ve 2021 arasında %51 azalarak yaklaşık 810 ABD doları/kW seviyelerine gelmiştir.
5. 2021'de bölgelere göre hidrolik enerji üretiminde en büyük paya %43 ile Asya, ülke bazında bakıldığında ise en büyük paya %30.4 ile Çin sahiptir. 2021'de dünya çapında hidrolik enerjiye dayalı toplam kurulu güç 1360.1 GW, hidrolik enerjiden elektrik üretimi ise 4273.8 TWh'dır. Bu üretim dünya elektrik enerjisi tüketiminin %15'ine denk gelmektedir. 2010 ve 2021 yılları arasında hidroelektrik santrallerinin küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti %62 artarak 2135 ABD doları/kW seviyesine gelmiştir. 2022 Haziran ayı itibariyle Türkiye'de hidrolik enerjiye dayalı kurulu güç 31558 MW, toplam kurulu güç içerisindeki payı ise %31.09'dur. 2021'de hidrolik enerjiden üretilen elektrik ise 55.7 TWh seviyesiyle ülkenin toplam elektrik üretiminin %16.7'ine denk gelmektedir.
6. Dünyada biyoenerji üretimi 2021'de 646 TWh seviyesine yükselmiştir. Küresel üretimdeki %43'lük payı ile Asya biyoenerji üretiminde en yüksek paya sahip bölge konumundadır. Ülke bazında ise Çin küresel üretimde %23'lük

bir paya sahiptir. Türkiye’de 2022 Haziran ayı itibariyle biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı kurulu güç 2172 MW’a yükselmiş ve toplam kurulu güç içerisindeki payı %2.14 seviyesine gelmiştir. Biyoenerji için küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti 2021 yılı itibariyle 2353 ABD doları/kW seviyesindedir.

7. 2021’de sahip olduğu 3889 MW kurulu güç ile ABD jeotermal enerji açısından açık ara en büyük kurulu güce sahip ülke konumundadır. Türkiye ise 2021’de sahip olduğu 1676 MW kurulu güç ile Avrupa’da birinci, dünyada ise dördüncü sırada yer almaktadır. Jeotermal enerji için küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti 2013 ve 2021 yılları arasında ortalama 4000 ABD doları/kW seviyesinde sabit kalmıştır.

Dünyada ve Türkiye’de genel enerji durumu değerlendirildiğinde, yenilenemez enerjiden en yüksek elektrik enerjisi üretiminin kömürden, yenilenebilir enerjiden en yüksek elektrik enerjisi üretiminin ise hidrolik enerjiden elde edildiği belirlenmiştir. Son yıllarda kurulu güçteki ve buna bağlı elektrik enerjisi üretimindeki artışla rüzgar ve güneş enerjisi birlikte dünya elektriğinin %10’undan fazlasını üretir hale gelmiştir. Ayrıca, karasal rüzgar enerjisi ve fotovoltaik güneş enerjisi kurulum maliyetlerinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha ucuz olduğu ve her geçen yıl kurulum maliyetlerinin düşmeye devam ettiği belirlenmiştir. Bu bağlamda dünyada ve Türkiye’de rüzgar ve güneş enerjisine dayalı kurulu gücün hızla artırılması hem fosil yakıt kaynaklarına olan bağımlılığın azaltılması hem de çevresel açıdan yaratacağı olumlu katkı nedeniyle büyük önem arz etmektedir. Gelecek çalışmalarda enerji analizi ile dünya ve ülkemiz için simülasyon çalışmaları yapılarak literatüre katkı sağlanabilir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynakça

- Ağır, H., Özbek, S., ve Türkmen, S. (2020). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belirleyicileri: Ampirik Bir Tahmin. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 6(4), 39-48. doi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ead/issue/59522/792382>
- Bilgili, M., ve Alphan, H. (2022). Visual Impact and Potential Visibility Assessment of Wind Turbines Installed in Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 35(1), 198-217. doi: <https://doi.org/10.35378/gujs.811568>
- BP Statistical Review of World Energy. (2022). British Petroleum (BP). Erişim adresi: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.

- Chen, C. Y., Pinar, M., ve Stengos, T. (2020). Renewable energy consumption and economic growth nexus: Evidence from a threshold model. *Energy Policy*, 139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111295>
- Çınar, S., ve Yılmaz, M. (2015). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belirleyicileri ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Gelişmekte Olan Ülkeler Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 30(1), 55-78. doi: <https://dergipark.org.tr/pub/deuibfd/issue/22716/242449>
- DSİ Genel Müdürlüğü 2021 Faaliyet Raporu. (2022). DSİ Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: https://cdnis.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/2021_yili_faaliyet_raporu.pdf#page=46.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., ve Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., ve Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Global Electricity Review. (2022). EMBER. Erişim adresi: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>.
- Güllü, M., ve Kartal, Z. (2021). Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İstihdam Etkisi. *Sakarya İktisat Dergisi*, 10(1), 36-65. doi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/sid/issue/61134/849831>
- Hassan, Q., Al-Hitmi, M., Tabar, V. S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., ve Jaszczur, M. (2023). Middle East energy consumption and potential renewable sources: An overview. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100599>
- Hosseini, S. E. (2020). An outlook on the global development of renewable and sustainable energy at the time of COVID-19. *Energy Research & Social Science*, 68, 101633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101633>
- Işık, S., ve Yavuz, S. (2022). Biyokütleden Elde Edilen Biyoyakıtlara Genel Bir Bakış. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 193-201. doi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.1079255>
- Jaiswal, K. K., Chowdhury, C. R., Yadav, D., Verma, R., Dutta, S., Jaiswal, K. S., ve Karuppasamy, K. S. K. (2022). Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health. *Energy Nexus*, 7, 100118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>
- Kaya, K., ve Koç, E. (2015). Enerji Üretim Santralleri Maliyet Analizi. *Mü-*

- hendis ve Makina*, 56(660), 61-68. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/54192/733604>
- Kaya, K., Şenel, M. C., ve Koç, E. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi. *Technological Applied Sciences*, 13(3), 219-234. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsatecapsci/issue/38517/410134>
- Kayar, E., İl, N., ve Carlak, H. (2021). Türkiye Elektrik Enerjisi Görünümü ve Yenilenebilir Enerjinin Global Ölçekte Mevcut Konumu. *EMO Bilimsel Dergi*, 11(Özel Sayı), 70-83. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/emobd/issue/63482/669980>
- Kayıoğlu, B., ve Diken, B. (2019). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kullanımının Mevcut Durumu ve Sorunları. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 15(2), 61-65. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tarmak/issue/52226/682863>
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., ve Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86-114. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/48388/614281>
- Koç, E., ve Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/54338/736171>
- Koç, E., ve Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu-Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 54(639), 32-44.
- Koyuncu, T., ve Karabulut, T. (2021). Türkiye’de Sürdürülebilir Kalkınma ve Yeşil Ekonomi Açısından Yenilenebilir Enerji: Ampirik Bir Çalışma. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 17(2), 466-482. doi: <https://doi.org/10.17130/ijmeh.800169>
- Li, L., Lin, J., Wu, N., Xie, S., Meng, C., Zheng, Y., ve Zhao, Y. (2022). Review and outlook on the international renewable energy development. *Energy and Built Environment*, 3(2), 139-157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.12.002>
- Net Zero by 2050. (2021). International Energy Agency (IEA). Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- Özbek, M., ve Tunç, K. (2021). Feasibility of Offshore Wind Energy in Turkey; A Case Study for Gulf of Edremit at the Aegean Sea. *Gazi University Journal of Science*, 34(2), 423-437. doi: <https://doi.org/10.35378/gujs.734895>
- Özkan, A., Uslu, Y. D., ve 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/aiibfd.1111423>
- Pacesila, M., Burcea, S. G., ve Colesca, S. E. (2016). Analysis of renewable energies

- in European Union. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 56, 156-170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.152>
- Renewable Energy Statistics. (2022). International Renewable Energy Agency (IRENA). Erişim adresi: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>.
- Renewable Power Generation Costs in 2018. (2019). International Renewable Energy Agency (IRENA). Erişim adresi: <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>.
- Renewable Power Generation Costs in 2021. (2022). International Renewable Energy Agency (IRENA). Erişim adresi: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021_Summary.pdf.
- Renewables 2022. (2023). International Energy Agency (IEA). Erişim adresi: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf>.
- Ritchie, H., Roser, M., ve Rosado, P. (2022). Energy. *Our World in Data*. Erişim adresi: <https://ourworldindata.org/energy>.
- Sen, S., ve Ganguly, S. (2017). Opportunities, barriers and issues with renewable energy development - A discussion. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 69, 1170-1181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.137>
- Şenel, M. C., ve Koç, E. (2015). Dünyada Ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirmesi. *Mühendis ve Makina*, 56(663), 46-56. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/54195/733672>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). Enerji. Erişim adresi: www.enerji.gov.tr
- Wang, S., Sun, L., ve Iqbal, S. (2022). Green financing role on renewable energy dependence and energy transition in E7 economies. *Renewable Energy*, 200, 1561-1572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.067>
- Wind Electricity. (2022). International Energy Agency (IEA). Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>.
- Wu, H. (2023). Evaluating the role of renewable energy investment resources and green finance on the economic performance: Evidence from OECD economies. *Resources Policy*, 80, 103149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103149>
- 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/Csa-um_0000000064



MAKİNE İMALAT TEKNOLOJİLERİ VE EKLEMELİ İMALAT LİTERATÜRÜNÜN GÖRSELLEŞTİRİLMESİNE DAİR BİBLİYOMETRİK BİR ANALİZ

Sabiha KILIÇ^{1*}

¹ Hitit Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi İşletme Bölümü Üretim Yönetimi
ve Pazarlama ABD, Çorum, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-0906-4567>

Anahtar kelimeler

Öz

Makine, imalat teknolojileri, eklemeli imalat, citespace, bibliyometrik analiz

Çalışmada makine imalat teknolojilerinin gelişim evriminin incelenmesi, bu evrim içerisinde eklemeli imalatın gelişim sürecinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ifade edilen gelişim sürecinin entelektüel eğilim yapısı, akademik literatür çerçevesinde bilimsel haritalama uygulaması kullanılarak görselleştirilmiştir. Bu amaçla, makine imalat teknolojileri ve eklemeli imalat alanındaki başlıca araştırma konularının neler olduğu, klasik ve geçici yayınlar, birbiriyle bağlantılı alanlar, en aktif alanlar, alanların gelişim tarihindeki kritik geçişler ve dönüm noktaları değerlendirilmiştir. Atıf patlaması olan yazarlar, anahtar kelimeler ve ülke modelleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmanın veri setlerinde yer alan bilimsel eserlerin görselleştirilmesi ve alana ilişkin akademik eğilimlerin incelenmesi amacıyla CiteSpace bibliyometrik haritalama programından yararlanılmıştır.

¹ Sorumlu yazar; e-posta: sabihakilic@hitit.edu.tr
doi : [muhendismakina.1319011](https://doi.org/10.1319011)

A BIBLIOMETRIC ANALYSIS TO VISUALIZATION OF MACHINE MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND ADDITIVE MANUFACTURING LITERATURE

Keywords

*Machinery,
manufacturing
technologies, additive
manufacturing,
citespace, bibliometric
analysis*

Abstract

In this study, it is aimed to examine the development of machine manufacturing technologies and to evaluate the development process of additive manufacturing in this evolution. The intellectual tendency structure of the development process expressed in this context has been visualized using scientific mapping within the framework of academic literature. For this purpose, the main research topics in the field of machine manufacturing technologies and additive manufacturing, classical and temporary publications, interrelated areas, the most active areas, critical transitions and turning points in the development history of the areas are evaluated. Authors, keywords, and country patterns that with citation booms are studied in detail. CiteSpace bibliometric mapping program is used to visualize the scientific works in the data sets of the study and to examine the academic trends in the field.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 20.12.2022

Kabul Tarihi : 17.03.2023

Research Article

Submission Date : 20.12.2022

Accepted Date : 17.03.2023

Extended Abstract

Introduction/Background

Making new investments in the development of technology used in manufacturing processes is a strategy that can provide flexibility to manufacturing systems in terms of product mix, product volume, product change, and delivery of products (Merklein, Lechner ve Kuppert(2012; Beach , Muhlemann, Price, Paterson ve Sharp, 2000). Advanced manufacturing systems involve creating advanced products, using innovative techniques in the production phase, and inventing new processes and technologies for the production of the future (Katz, 2015). In addition, it includes not only robots and high-tech processes but also the production of innovative products and the use of creative principles. Digital modeling and fabrication, nano-manufacturing, power electronics, semiconductor manufacturing, and additive manufacturing are technologies considered in the advanced manufacturing category. In traditional manufacturing methods, parts are designed before they are produced, while in additive manufacturing designs are produced directly. The freedom of geometric drawing allows engineers to design products as they visualize them. Additive manufacturing is considered to be a new industrial revolution that enables the mass production of parts instead of being produced as a prototype (Berman, 2012). From this perspective, the research is aimed to examine the development of machine manufacturing technologies and to evaluate the development process of additive manufacturing within this evolution. This development process, which is expressed within the scope of this purpose is visualized by scientific mapping.

Objectives/Research Purpose

The mean goal of the research is to visualize the intellectual development of academic studies in machine manufacturing technologies and additive manufacturing literature. For this purpose, evaluations are made about the reflections of scientific developments in the field of additive manufacturing in machine manufacturing technologies to the academic literature. In this context, first of all, scientific developments in the field of machine manufacturing technologies are examined within the scope of academic studies. Afterward, a projection of the development and evolution of additive manufacturing technologies and their reflections on scientific studies are presented.

Methods/Methodology

The study has two datasets. The first dataset consists of 13,551 scientific works which are obtained by scanning the keyword "TS=Machine Manufacturing Technologies" in the WoS bibliographic database. The second dataset consists of 1,976 scientific works and which is obtained by scanning the keywords "TS=Machine AND TS=Manufacturing AND TS=Technologies AND TS=Additive" in the WoS bibliographic database. CiteSpace bibliometric mapping program is used to visualize the scientific works in the data sets and to examine the academic trends in the field.

Results/Findings

When the academic literature on machine manufacturing technologies in the WoS bibliographic database is examined, it can be said that scientific studies in this field have been to be published in international journals since 1981. In the field of machine manufacturing

technologies, the concept of group technology has been one of the most discussed concepts in the 90s. Group technology was proposed by Kusiak(1987) as a production management philosophy based on cellular production system logic in order to reduce production setup times and inventories in the process. Group technology includes the processes of grouping the family of parts in a production system according to their design and production similarities and creating cells suitable for these groups. This new concept, proposed in 1987, aimed to improve the quality of part families and machine cells (Kusiak, 1987). As a result of the technological developments in recent conditions, additive manufacturing technology has started to be discussed in the machinery manufacturing technologies literature in order to increase the quality in the production process and to provide fast and low-cost production that is similar to the production management philosophy on which the group technology is based.

Discussion and Conclusions

Additive manufacturing has the potential to reduce both time-to-market from the design stage to the time-to-market stage and time to full-scale manufacturing volume. It offers a future where products are produced not according to a just-in-time approach, but according to the exact manufacturing mode, which depends on printing directly as ordered. Such a new paradigm will provide significant consequences to the global supply chain. Some of the need for transportation and storage of parts will be eliminated. In addition, the need for assembly line workers to assemble complex products will decrease (Campbell & Ivanova, 2013). Other advantages of additive manufacturing include shortened time-to-market for products and reduced waste and energy consumption by companies throughout the world. In addition, additive manufacturing technology can be used to facilitate the remanufacturing, repair, and reuse of old products (MAL Inc, 2014). To successfully implement additive manufacturing, progress is required in five main areas: design, materials, technology, software, and quality control. Therefore, more research and development is needed in more areas. All these advantages offered by additive manufacturing technology create new opportunities in the field of machine manufacturing technologies, while also inspiring scientific studies in this field. It is thought that this research, which examines the development evolution in machine manufacturing technologies within the scope of academic studies, will guide the academic studies planned in this field in the future.

1. Giriş

Geleneksel imalat, hammaddelerin piyasaya arz edilmek üzere nihai ürünlere dönüştürüldüğü endüstriyel bir imalat süreci olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde ise imalat, makinelerden imalat sistemlerine kadar işletme düzeyindeki tüm süreçlerle entegre edilmiş bir kavram olarak kabul edilmektedir (Esmailian, Behdad ve Wang, 2016). İmalat, teknolojiye dayalı olarak beş grup altında sınıflandırılabilir. Bunlar (Nassehi, Newman, Dhokia, Zhu ve Asrai, 2012);

- Birleştirme Teknolojisi (Joining Technology): Yeni bir parça oluşturmak için birkaç parçanın birleştirildiği teknolojidir. Kaynak ve montaj teknolojisi örnek olarak verilebilir (Liu, Lai, Kristiansen ve Khoo, 1998).
- Bölme Teknolojisi (Dividing Technology): Testereyle kesme ve sökme gibi işlemleri içeren teknolojidir.
- Çıkarmalı Teknoloji (Subtractive Technology): Talaşlı imalat işlemleri gibi malzeme çıkarma işlemlerini içeren teknolojidir (Nieslony ve Grzesik, 2011).
- Dönüştürücü Teknoloji (Transforative Technology): Bir iş parçasının kütlesi değişmeden başka bir iş parçasına dönüştürüldüğü teknolojidir. Şekillendirme, ısıl işlem ve kriyojenik soğutma örnek olarak verilebilir.
- Eklemeli Teknoloji (Additive Technology): Hızlı prototipleme, basınçlı döküm ve enjeksiyonlu kalıplama örnek olarak verilebilir (Zhu, Dhokia, Hassehi ve Newman, 2013).

İmalat süreçlerinde kullanılan teknolojinin geliştirilmesine yönelik yeni yatırımların yapılması, ürün karması, ürün hacmi, ürün değişikliği ve ürünlerin teslimatı açısından imalat sistemlerine esneklik sağlayabilecek bir stratejidir (Merklein, Lechner ve Kuppert (2012; Beach ve diğ., 2000). İleri imalat sistemleri, gelişmiş ürünler yaratmak, üretim aşamasında yenilikçi teknikler kullanmak ve geleceğin üretimi için yeni süreçler ve teknolojiler icat etmeyi içerir (Katz, 2015). İleri imalat, yalnızca robotları ve yüksek teknolojlü süreçleri değil aynı zamanda yenilikçi ürünlerin üretimini ve yaratıcı ilkelerin kullanımını da içermektedir. Dijital modelleme ve fabrikasyon, nano imalat, güç elektroniği, yarı iletken imalat ve eklemeli imalat ileri imalat kategorisinde değerlendirilen teknolojilerdir. Bunlar arasında eklemeli imalat, ince toz katmanlarının eritilmesi ve plastik ya da metal malzeme katmanının diğerinin üzerine eklenmesiyle parçaların üretildiği teknoloji olarak tanımlanabilir. Her katman CAD modellerinde önerilen geometriye göre eritilir (Zhou ve Chen, 2012). Bu teknoloji, üretilcek parçaların imalat aşamasından önce tasarımını değil tasarlanan parçanın aynı anda üretilmesini öneren yeni bir paradigmayı içerir. Geleneksel imalat yöntemlerinde parçalar üretilmeden önce tasarlanırken, eklemeli imalatta tasarımlar doğrudan üretilmektedir. Geometrik özgürlük, mühendislerin ürünleri üretim kısıtları olmaksız-

zın görselleştirdikleri gibi tasarımlarına izin verir. Eklemeli imalat bir prototip üretmek için parçaları üretmek yerine, parçaların toplu üretimini sağlayan yeni bir sanayi devrimi olarak kabul edilmektedir(Berman, 2012). ABD, eklemeli imalat sistemlerinin kurulumunda dünyada öncü bir ülke olmuştur. Son 24 yılda endüstriyel eklemeli imalat sistemlerinin %38'i ABD'de kurulmuştur. Eklemeli imalat sistemlerini kurma konusunda ABD'yi Japonya(%9,7), Almanya(%9,4), Çin Halk Cumhuriyeti(%8,7), İngiltere(%4,2) ve Fransa(%3,2) izlemektedir(Wohlers Report, 2014). 2020 yılında yayımlanan Wohlers Raporu'na göre eklemeli imalat endüstrisinin küresel pazar büyüklüğünün 2024 yılında 34 milyar \$'ın üzerine çıkacağı öngörülmektedir(Wohlers Report, 2020). Çalışmada makine imalat teknolojilerinin gelişim evriminin incelenmesi, bu evrim içerisinde eklemeli imalatın gelişim sürecinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ifade edilen bu gelişim sürecinin akademik literatür çerçevesinde entelektüel eğilim yapısının bilimsel haritalama uygulaması kullanılarak görselleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla CiteSpace bilimsel haritalama uygulamasından yararlanılmıştır. Çalışmada makine imalat teknolojileri alanında üretilen bilimsel eserlerden oluşan birinci veri seti ve eklemeli imalat konusunda üretilen bilimsel eserlerden oluşan ikinci veri seti WoS istatistikleri ve CiteSpace bilimsel haritalama programı yardımıyla ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojileri WoS istatistiklerine dair ayrıntılı bilgiler yer almaktadır.

2. Makine İmalat Teknolojileri WoS İstatistikleri

Çalışma kapsamında makine imalat teknolojileri alanında gerçekleştirilen bilimsel eserlere dair veri seti, Web of Science bibliyografik veri tabanından elde edilmiştir. Veri setine ilişkin tarama 25 Kasım 2022 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Web of Science bibliyografik veri tabanında "TS=Machine Manufacturing Technologies" anahtar kelimesi taranılarak ulaşılan 13.551 bilimsel esere dair, yazar, yayın türü, yayın yılı, yayın konuları, atıf konuları, ortak yayın yapılan kurumlar, dergi ve yayıncı bilgilerini içeren veriler aşağıdaki bölümlerde özetlenmektedir:

2.1. Yazar Bilgisi

WoS bibliyografik veri tabanı verilerine göre; makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında toplam 200 yazar tarafından 13.551 eser gerçekleştirilmiştir. Yayın sayısına göre ilk beş yazar Klocke, F.(64 adet yayın), Wang, Lihui(36 adet yayın), Newman, Stephen T.(33 adet yayın), Xu, Xun William(27 adet yayın) ve Klink, A.(26 adet yayın) olarak sıralanabilir.

2.2 Yayın Yılı

WoS bibliyografik veri tabanı verilerine göre; makine imalat teknolojileri alanında ilk yayın 1981 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu alanda üretilen en fazla eser

sayısı 2021 yılına (1.279 adet) aittir. 2022 yılının ilk 11 ayında 1.249 adet yayın üretilmiş olmakla birlikte 2023 yılına ait erken görünümde 21 adet yayın bulunmaktadır.

2.3 Yayın Türü

WoS bibliyografik veri tabanı verilerine göre; makine imalat teknolojileri alanındaki yayınların %56'sı araştırma makalesi(7.612 adet), %43'ü bildiri(5.849 adet) ve %4,6'sı inceleme makalesi(624 adet)'dir. Diğer yayınlar arasında kitap, kitap bölümü, kitap incelemesi, editöre mektup, özet bildiri vb. yayınlar bulunmaktadır.

2.4 Yayın Konuları

WoS bibliyografik veri tabanı verilerine göre; makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında toplam 200 alanda yayın üretilmiştir. En fazla yayın üretilen alanlar sırasıyla üretim mühendisliği(3.943 adet/%29), multidisipliner malzeme bilimi çalışmaları(2.475 adet/%18), makine mühendisliği(2.026 adet/%15), elektrik elektronik mühendisliği(1.911 adet/%14), endüstri mühendisliği(1.732 adet/%13) ve otomasyon kontrol sistemleri(1.324 adet/%10) olarak ifade edilebilir. Makine imalat teknolojileri konusunda sosyal bilimler alanında en fazla yayın yönetim(324 adet) alt bilim alanında gerçekleştirilmiştir. Diğer sosyal bilim alt alanlarındaki yayın sayıları; işletme(124 adet), iktisat(73 adet), disiplinlerarası sosyal bilimler çalışmaları(38 adet), finans(13 adet), sayısal yöntemler(12 adet), sosyoloji(6 adet), davranış bilimleri(5 adet), kamu yönetimi(3 adet), uluslararası ilişkiler(3 adet), siyaset bilimi(3 adet) ve çalışma ekonomisi(2 adet) olarak ifade edilebilir.

2.5 Atıf Konuları

WoS bibliyografik veri tabanı verilerine göre; makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında en fazla atıf yapılan konular arasında ilk beş sırada imalat(1.773 atıf), nanolifler, yapı iskeleleri&fabrikasyon(1.558 atıf), tedarik zinciri&lojistik(1.261 atıf) ile tasarım&üretim(1.200 atıf) konuları yer almaktadır. Sosyal bilimler alt alanları incelendiğinde yönetim alanında 634 atıf, iktisat alanında 34 atıf, iktisat teorisi alanında 10 atıf, siyaset bilimi alanında 4 atıf ve siyaset felsefesi alanında 2 atıf bulunduğu söylenebilir.

2.6 Ortak Yayına Sahip Kurumlar

WoS bibliyografik veri tabanı verilerine göre, makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında en az 100 ortak yayını bulunan özel ve kamu kurumları sırasıyla Fraunhofer Gesellschaft(210 adet ortak yayın), Chinese Academy of Sciences (166 adet ortak yayın), Rwth Aachen University(160 adet ortak yayın), Indian Institute of Technology System IIT System(149 adet ortak

yayın), Helmholtz Association(110 adet ortak yayın), Centre National de La Recherche Scientifique CNRS(108 adet ortak yayın), Nanjing University of Aeronautics Astronautics(106 adet ortak yayın), (National Institute of Technology NIT System(105 adet ortak yayın), Huazhong University of Science Technology(104 adet ortak yayın) olarak ifade edilebilir. Makine imalat teknolojileri alanında ortak yayını bulunan kurumlar arasında üniversiteler büyük bir orana sahiptir. 197 kurum arasında 157'sini üniversiteler oluşturmaktadır. Özel kurumlar arasında Siemens AG'nin 43 adet, Siemens Germany'nin 27 adet ortak yayını bulunmaktadır. Diğer kurumlar arasında özel ve kamu laboratuvarları, kamu ve özel araştırma ve uygulama merkezleri ile araştırma ve eğitim enstitüleri yer almaktadır.

2.7 Dergi ve Yayıncı Bilgileri

WoS bibliyografik veri tabanı verilerine göre; makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında yayın sayısı en yüksek olan ilk üç dergi sırasıyla International Journal of Advanced Manufacturing Technology(583 adet yayın), Proceedings of Spie(400 adet yayın), International Journal of Production Research(251 adet yayın) olarak ifade edilebilir. Bu alanda en fazla yayına sahip ilk beş yayıncı ise Elsevier(2.861 adet yayın), IEEE(1.639 adet yayın), Springer Nature(1.637 adet yayın), Taylor&Fransis(706 adet yayın) ve MDPI(635 adet yayın)'dır.

3. Yöntem

Çalışmada, bilimsel eserlerin bibliyometrik analizine imkan sağlayan CiteSpace 6.1.R4 versiyonu bilimsel haritalama programı kullanılmıştır. Çalışmanın iki veri seti bulunmaktadır. Birinci veri seti 13.551 bilimsel eserden oluşmaktadır. Birinci veri seti, WoS bibliyografik veri tabanında "TS=Machine Manufacturing Technologies" anahtar kelimesi taranılarak elde edilmiştir. Makine imalat teknolojileri alanındaki teknolojik gelişmeler kapsamında çalışmanın ikinci veri seti WoS bibliyografik veri tabanında "TS=Machine AND TS=Manufacturing AND TS=Technologies AND TS=additive" anahtar kelimeleri taranılarak elde edilmiştir. İkinci veri seti 1976 bilimsel eserden oluşmaktadır. Veri setleri WoS bibliyografik veri tabanında yayımlanan bilimsel eserler ile sınırlı olup CiteSpace bilimsel haritalama programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

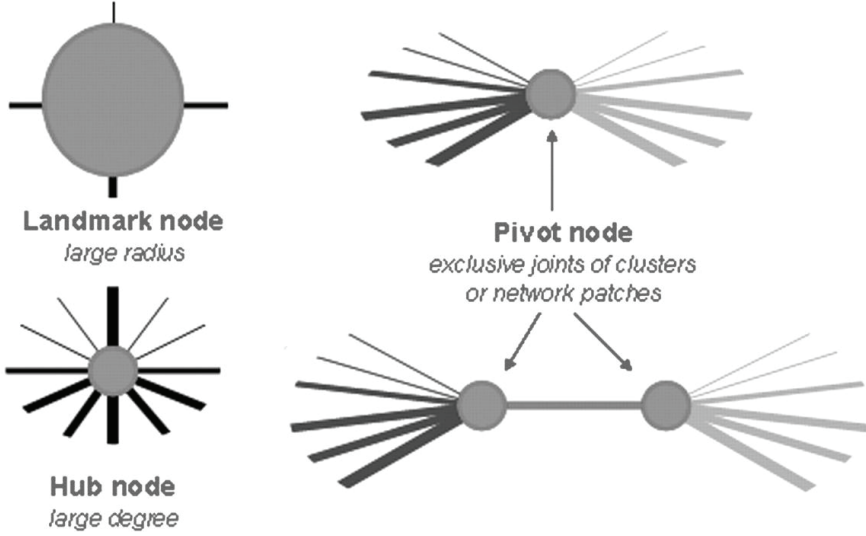
CiteSpace bilimsel haritalama programının temeli, ağ analizi ve görselleştirmedir. Ağ modelleme ve görselleştirme aracılığıyla, bir bilim alanının entellektüel manzarası keşfedilebilir, araştırmacıların hangi konuları daha çok çalıştıkları anlaşılabilir, geliştirilen yöntem ve araçlar hakkında bilgi sahibi olunabilir. CiteSpace, bilimsel yayınlardan oluşan veri seti sayesinde ilgili bilim alanına ilişkin gelişim sürecinin izinin sürülmesine imkan tanır. Bir bilim alanında yaşanan di-

namik gelişmeleri takip etmek için tek bir düşünce ekolünü incelemek yeterli değildir. Belirli bir bilim alanına ilişkin konunun daha iyi anlaşılması, genellikle, diğer bilim dallarındaki konularla nasıl ilişkili olduğunun anlaşılmasına bağlıdır. Bilimsel bir alanın entelektüel yapısını araştırırken atıf sayısı, potansiyel olarak önemli alanlara dikkat çeker. Bu tür bilgiler yalnızca bir ormanda belirli bir noktaya yaklaşarak ve filtreleme yaparak hedefi seçmemize değil, aynı zamanda ormanı oluşturan ağaçları da ilk etapta seçmemize olanak tanır(Chen, 2017).

Bilimsel literatür klasik ve geçici olmak üzere iki tür makaleden oluşur. Klasik makaleler köklü ve iyi bilinen katkılara sahip çalışmalardır. Bilimsel literatürdeki konumları sabit ve görünürlükleri yüksektir. Geçici makaleler ise bilimsel literatürün geçici kısmında yer alırlar. Bilimsel dünyada yayımlandıktan hemen sonra unutulmuş birçok makale bu tür makalelere örnek olarak verilebilir. Ancak, bazen kaybolan bu makalelerden bazıları, ilk yayımlandıkları yıllardan çok daha sonra yeniden keşfedilebilir(Chen, 2016).

Bilimin en yaygın olarak bilinen teorisi, Thomas Kuhn'un "Bilimsel Devrimlerin Yapısı"dır. Thomas Kuhn'un bilimsel devrimlerin yapısı teorisine göre bilim, istikrarlı ve kazanılmış bilgilerin toplamı değildir. Kuhn, bilimin süreklilik göstermediğini iddia eder. Öyle ki bilimsel süreç zaman içerisinde gerçekleşen devrimlerle kesintiye uğramaktadır. Bilim, bu devrimleri bilimsel temellere ters düştüğü gerekçesiyle başlangıçta kabul etmek istememektedir. Ancak devrimler öyle bir hale bürünür ki bilim de bu devrimleri kabul etmek zorunda kalır. Daha önce radikal olarak anılan devrimler önce normal bilim haline ve daha sonra bilim adamları tarafından ortaklaşa kabul gören olgulara dönüşür (Kuhn, 1962). Kuhn'un teorisi, bilimsel devrimlerin bilimin çok önemli bir parçası olduğunu öne sürmektedir. Paradigma kayması kavramı neredeyse tüm bilimsel disiplinlerde yaygın olarak bilinmektedir. Kuhn'un teorisi, ortak atıf ağlarındaki zamsal modellerin incelenmesi yoluyla paradigma değişimlerini tespit etme ve izleme konusunda derin bir ilgi uyandırmıştır(Chen, 2016).

Bilim alanı görselleştirmesinin birincil amacı, bir bilim alanının gelişimini izlemek ve tespit etmektir. Aşamalı bilim alanı görselleştirmesi özellikle bir alanın ilerlemesinde klasik ve geçici yayınların katkı düzeylerini tanımlamak için kullanılabilir teknikleri içerir. Bilimsel bir alanın pek çok yönü, bilimsel bir ağ şeklinde temsil edilebilir. Bilimsel işbirliği ağları, ortak yazarlığın sosyal ağları, atıf ağları, ortak atıf ağları bunlardan bazılarıdır. Bilimsel ağlar zaman içerisinde sürekli olarak değişkenlik gösterir. Bazı değişkenlikler orta düzede iken bazıları da ani ve hızlı olabilir. Bu tür değişkenliklerin sonuçlarını anlamak, bilimsel bir alanda çalışan herkes için önemlidir. Görselleştirilmiş bir ortak atıf ağında dönüm noktası düğümleri(Landmark node), merkez düğümleri(Hub node) ve pivot düğümleri(Pivot node) bulunur. Bu düğümler, bir bilim alanına dair literatürde yer alan önemli makalelerin aranmasını basitleştirmeye yardım-



Şekil 1. Görsel Ağ Düğümleri (Chen, 2004)

cı olur. Görselleştirilmiş ortak atıf ağında yer alan düğümler aşağıdaki şekilde görülmektedir(Chen, 2004):

Dönüm noktası düğümü(Landmark node) çokça alıntılanan ve ait olduğu bilgi alanına önemli katkıları bulunan makaleleri kapsar. Merkez düğüm(Hub node), nispeten önemli katkıları bulunan makalelerin yer aldığı düğümdür. Merkez düğümde yer alan makaleler ait oldukları bilimsel alana önemli entelektüel katkılar sunma potansiyelinde olan çalışmalardır. Pivot düğümler(Pivot node) farklı ağlar arasındaki bağlantı noktalarıdır. Pivot düğümler iki ağ tarafından paylaşılan ortak düğümler veya ağ bağlantıları sağlayan ağ geçidi düğümleridir. Pivot düğümlerin görselleştirilmiş bir ağda önemli işlevleri bulunur(Chen, 2004).

Atıf indeksi, yazarların makalelerinde yaptıkları atıfları izleme fikrine dayanır. Atıf indekslemenin öncüsü olan Eugene Garfield(1955), bilimsel atıf indeksi oluşturmaya yönelik asıl amacının insanların literatürde daha ilgili makaleler bulmalarına yardımcı olmak olduğunu vurgulamaktadır(Garfield, 1955). Bilimsel eserlerin analizinde atıf patlaması(citation bursts) modeli için g-indeksi'nden yararlanılmıştır. q-indeksi, 2006 yılında Egghe tarafından geliştirilmiş bir ortak atıf indeksidir. q-indeksi, h-indeksi'nin geliştirilmiş halidir(Egghe, 2006). h-indeksi, bilim insanlarının yayın sayısını ve yayınlarının performansını ölçmektedir. Bir bilim insanının h adet makalesinin her biri en az h kadar atıf almışsa ve diğer makaleleri en fazla h sayıda atıf almışsa bu bilim insanının indeks değeri h olarak ifade edilebilir(Hirsch, 2005). h-indeksi çok boyutlu bir bibliyometrik yapıyı tek bir değere indirgediğinden dolayı bibliyometrik analizlerde q-indeksi kullanılmaktadır(Chen, 2016). q-indeksi'nde yazar performansları yüksek atıf

almış çalışmalara göre hesaplanır. q-indeksi, en iyi makalelerin atıf puanlarını h-indeksi'ne göre daha fazla dikkate aldığı için bilim insanlarının görünürlüklerini artırmaktadır(Egghe, 2006). q-indeksi aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$q^2 \leq k \sum_{i \leq g} C_i, k \in Z^+ \quad (1)$$

Çalışmada öncelikle makine imalat teknolojileri alanındaki akademik çalışmaların entelektüel yapısı aşağıdaki sorular kapsamında görselleştirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ise çalışmanın amacına uygun olarak eklemeli imalat alanındaki entelektüel yapı analiz edilmiştir:

- Makine imalat teknolojileri literatürüne yön veren dönüm noktası çalışmalar hangileridir?
- Makine imalat teknolojileri literatüründe en çok çalışılan konular nelerdir?
- Makine imalat teknolojileri literatüründe atıf patlaması olan yazarlar kimlerdir?
- Makine imalat teknolojileri literatüründe atıf patlaması olan ülkeler hangileridir?
- Makine imalat teknolojileri literatüründe atıf patlaması olan anahtar kelimeler hangileridir?
- Makine imalat teknolojileri literatüründe majör kümeler hangileridir?
- Makine imalat teknolojileri literatüründe güncel çalışma konuları nelerdir?
- Makine imalat teknolojileri literatüründe ana atıf makaleleri hangileridir?

3.1 Atıf Patlaması(Citation Bursts) Yazar Modeli

1981-2022 arasındaki yıllara ait makine imalat teknolojileri WoS bibliyografik veri setine göre oluşturulan en fazla atıf alan yazarlara ilişkin ağ haritası ile yayınlarına atıf patlaması olan yazarlara ilişkin şekil ve tablo aşağıda yer almaktadır:

Şekil 2'de son 41(1981-2022) yılda gerçekleştirilen makine imalat teknolojileri alanına ait yayınların yazarlarına ilişkin ortak atıf ağ haritası görülmektedir. Bilimsel haritada toplam 974 atıf ve 3458 ortak atıf ağı yer almaktadır. Makine imalat teknolojileri alanına yön veren dönüm noktası klasik (Landmark node) yayınlar, Kusiak(1987) ve Chandrasekharan&Rajagopalan(1989)'a ait yayınlardır. Dönüm noktası düğümü olarak da ifade edilebilen bu yayınlar, çok fazla alıntılanma sayısına sahip olmaları nedeniyle alana yön veren yayınlar olarak kabul edilmektedir. Bu alanda en yüksek atıf sayısına sahip yazarlar sırasıyla Kuisak



Şekil 2. En Fazla Atıf Alan Yazarlara İlişkin Ağ Haritası

LRF=3,0; LBY=41; e=2,0; g-indeks k=30; Network=974; E=3458 (CiteSpace, 2022).

A.(33 atıf), Chandrasekharan M.P ve Rajagopalan R.(31 atıf), King J.R.(29 atıf), Seifoddini, H.(27 atıf) ve Mcauley, J.(25 atıf)'dir. Aşağıdaki tabloda Kusiak'ın 1987 yılında yayımlanmış olduğu makalesine yapılan atıf ve ortak atıf bilgileri yer almaktadır:

Tablo 1. Ortak Atıflar (Kusiak, 1987)* (CiteSpace, 2022)

Atıf Sayısı	Atıf Alan Makale
116	HERAGUSS, 1994, IEEE T SYM AN CYB, V24 P203 DOI 10.1109/21.281420
67	CHENG CH, 1998, INT J PROD RES, V36, P1325, DOI 10.1080/002075498193345
51	MORGAN J, 2021, J MANUF SYST, V59 P481, DOI 10.1016/j.jmsy.2021.03.001
45	CHEN WH, 1994, EUR J OPER RES, V75, P100, DOI 10.1016/0377-2217(94)90188-0
31	HSU CM, 1998, PROD PLAN CONTROL, V9, P155, DOI 10.1080/095372898234370
27	CHENG CH, 1992, OMEGA-INT-J MANAGE S, V20, P493, DOI 10.1016/0305-0483(92)90023-Z
27	CHOW WS, 1992, COMPUT IND ENG, V22, P95, DOI 10.1016/0360-8352(92)90036-J
21	Ng SM, 1996, OPER RES, V44, P735, DOI 10.1287/opre.44.5.735
20	Alhourani F, 2013, COMPUT IND ENG, V66, P781, DOI 10.1016/j.cie.2013.09.002
19	LEE H, 1992, J INTELL MANUF, V3, P325, DOI 10.1007/BF01577273
19	KAMRANI AK, 1993, COMPUT IND ENG, V25, P487, DOI 10.1016/0360-8352(93)90326-S
13	LEEM CW, 1996, J INTELL MANUF, V7, P355, DOI 10.1007/BF00 123911
12	MOHAMED ZM, 1996, EUR J OPER RES, V95, P566, DOI 10.1016/S0377-2217(96)00311-6
11	KAMRANI AK, 1993, COMPUT IND ENG, V24, P431, DOI 10.1016/0360-8352(93)90039-Z
9	CHENG CH, 1995, INT J OPER PROD MAN, V15, P86, DOI 10.1108/01443579510104538
9	LAHA D, 2017, MATER TODAY-PROC, V4, P1442
8	TABOUN SM, 1991, COMPUT IND ENG, V20, P343, DOI 10.1016/0360-8352(91)90006-R
7	ESCOTO RP, 1998, PROD PLAN CONTROL, V9, P267, DOI 10.1080/095372898234244
6	CHENG CH, 1995, INT J OPER PROD MAN, V15, P41, DOI 10.1108/01443579510090327
5	BIAN S, 2021, J MANUF SYST, V61, P66, DOI 10.1016/j.jmsy.2021.08.009
5	KAMRANI AK, 1994, PROD PLAN CONTROL, V5, P450, DOI 10.1080/09537289408919517
5	CHENG CH, 1996, J OPER RES SOC, V47, P1468, DOI 10.1057/palgrave.jors.0471205

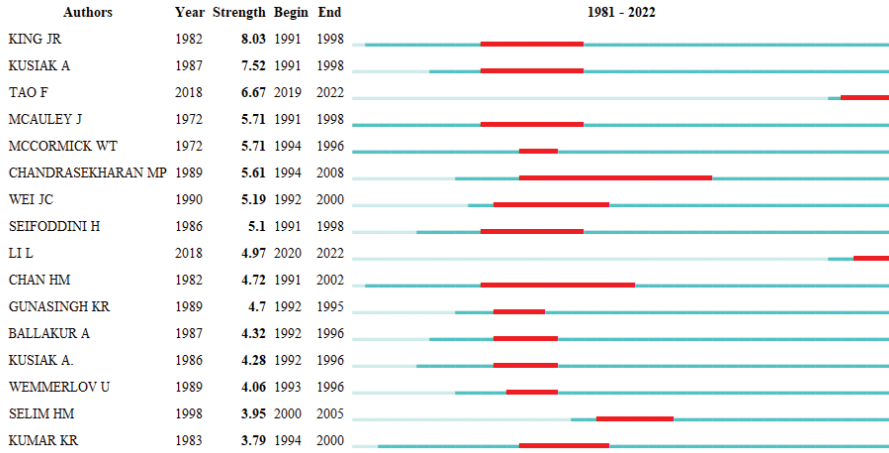
5	GANESH MV, 1994, COMPUT IND ENG, V26, P193, DOI 10.1016/0360-8352(94)90037-X
5	HERTZ A, 1994, DISCRETE APPL MATH, V50 P255, DOI 10.1016/0166-218X(92)00173-J
4	ZHANG Y, 2013, METHODS IN PRODUCT DESIGN:NEW STRATEGIES IN REENGINEERING
4	GU PH, 1991, COMPUT IND, V17, P9, DOI 10.1016/0166-3615(91)90099-U
4	SRIVASTAVA B, 1995, INT J COMP INTEG M, V8, P255, DOI 10.1080/09511929508944652
2	STRYCZEK R, 2017, GRAPH-BASED MDL IN ENG, V42, P143, DOI 10.1007/978-3-319-39020-8_11
1	HAZARIKA M, 2022, INT J SYST ASSUR ENG, VO, PO, DOI 10.1007/s13198-021-01615-9
1	ANG DS, 1998, IND MANAGE DATA SYST, V98, P3, DOI 10.1108/02635579810199681
1	CHOI KH, 1998, KSME INT J, V12, P181, DOI 10.1007/BF02947162

* Kusiak, A.(1987). The generalized group technology concept. International Journal of Production Research, 25, 561-569.

Tablo 1 incelendiğinde Kusiak'ın 1987 yılında makine imalat teknolojileri alanında gerçekleştirmiş olduğu grup teknolojisi konulu makalesine 1992-2022 yılları arasında toplam 33 atıf ve 549 ortak atıf yapıldığı görülmektedir. Andrew Kusiak, 2019 yılına kadar Manitoba Üniversitesi Makine ve Endüstri Mühendisliği bölümü öğretim üyesi olarak görev yapmış olup 2019 yılından bu yana Iowa Üniversitesi Endüstri ve Sistem Mühendisliği Bölümü öğretim üyesidir. Makalesi günümüzde de atıf olarak güncelliğini halen korumaktadır. Kusiak(1987)'in yayını bilimsel alana yön veren klasik ve köklü bir makaledir. Klasik makaleler, bilimsel literatürde yüksek görünürlüğe sahip makalelerdir ve ait oldukları alana yön verici düzeyde katkıda bulunurlar. Aşağıdaki tabloda 1981-2022 dönemine ait makine imalat teknolojileri alanında yayın yapan yazarların atıf patlaması dönemlerine ilişkin tablo yer almaktadır:

Tablo 2 yazarların yayınlarına ait atıf patlaması dönemlerini göstermektedir. Atıf patlaması yazarların yayınlarına yapılan ortak atıf sayısının en yüksek olduğu yılları ifade etmektedir. Bu yıllar tabloda kırmızı çizgi ile gösterilmektedir. Atıf patlaması düzeyi en yüksek ilk üç yazarın King, J.R.(1982/8,03), Kusiak, A.(1987/7,52) ve Tao, F.(2018) olduğu söylenebilir. Kusiak'ın 1987 tarihli makalesinin 2022 yılında da atıf almaya devam ettiği görülmektedir. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojileri alanındaki ortak atıf yayınlarında kullanılan anahtar kelimelere ilişkin bilgiler yer almaktadır.

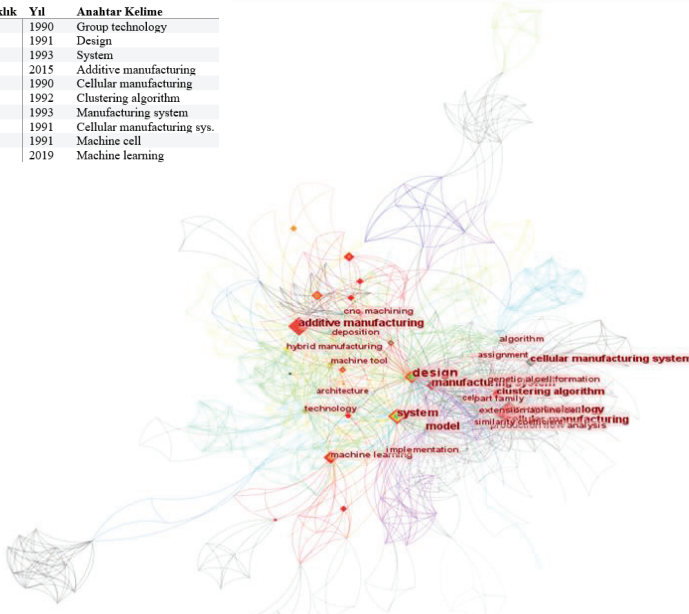
Tablo 2. Yazarların Atıf Patlaması Dönemleri(1981-2002)(CiteSpace, 2022)



3.2 Anahtar Kelime Ağ Analizi

Makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasındaki ortak atıf yayınlarında kullanılan anahtar kelimelere ilişkin ağ haritası aşağıdaki şekilde yer almaktadır.

Sıklık	Yıl	Anahtar Kelime
36	1990	Group technology
24	1991	Design
19	1993	System
17	2015	Additive manufacturing
17	1990	Cellular manufacturing
17	1992	Clustering algorithm
16	1993	Manufacturing system
13	1991	Cellular manufacturing sys.
9	1991	Machine cell
9	2019	Machine learning



Şekil 3. Anahtar Kelime Ağ Haritası

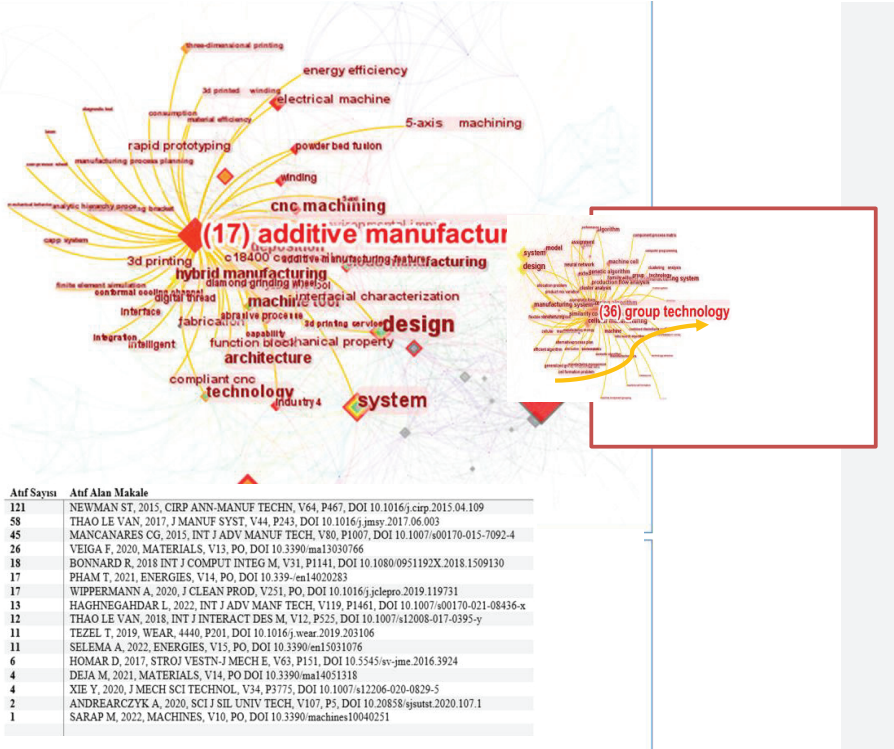
LRF=3,0; LBY=41; e=2,0; g-indeks k=30; Network=476; E=1740 (CiteSpace, 2022)

Bilimsel ağ haritasında 476 ağ ve ortak atıflarda kullanılan 1740 anahtar kelime bulunmaktadır. Anahtar kelimeler arasında grup teknolojisi, kümeleme algoritması ve eklemeli imalat ortak atıf alan yayınlarda en sık kullanılan üç anahtar kelimedir. Aşağıdaki tabloda makine imalat teknolojileri alanındaki ortak atıf yayınlarının atıf patlaması dönemlerinde en sık kullanılan anahtar kelimelere dair veriler yer almaktadır:

Tablo 3. Anahtar Kelime Frekans Değerleri(1981-2022)(CiteSpace, 2022)

Keywords	Year	Strength	Begin	End	1981 - 2022
group technology	1990	7.33	1990	2005	
clustering algorithm	1992	3.97	1992	2004	
additive manufacturing	2015	5.13	2015	2022	

Tablo 3 incelendiğinde makine imalat teknolojileri alanında 90'lı yıllarda en sık kullanılan grup teknolojisi ile kümeleme algoritması kavramlarının 1990-2005 yılları arasında ortak atıf alan yayınlarda çok sık kullanıldığı söylenebilir. 2015 yılı itibariyle makine imalat teknolojileri literatürüne giren eklemeli imalat kav-



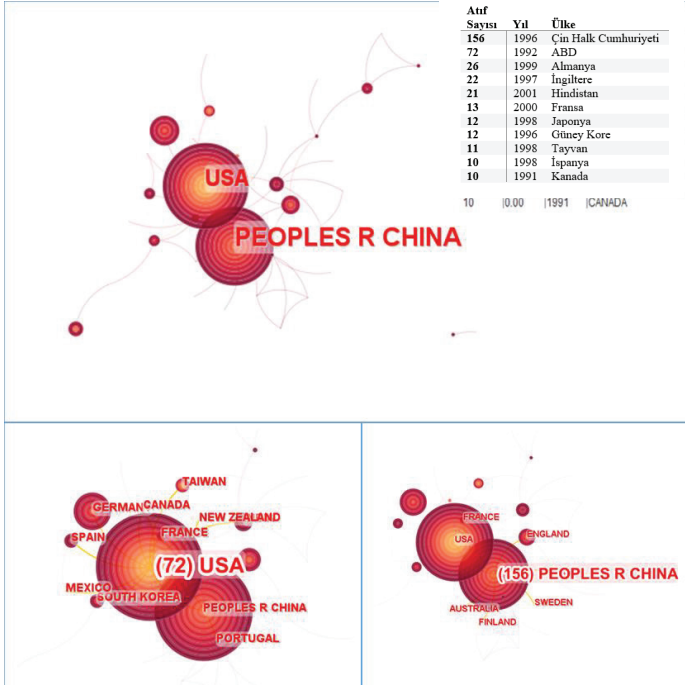
Şekil 4. Eklemeli İmalat Ağ Haritası (CiteSpace, 2022)

ramının ise 2015-2022 yılları arasında gerçekleştirilen ortak atıf alan yayınlarda çok sık kullanıldığı ifade edilebilir. Grup teknolojisi ve kümeleme algoritması kavramlarının 2005 yılı itibariyle güncelliğini yitirmeye başladığı, günümüzde ise teknolojik gelişmelere bağlı olarak üç boyutlu yazıcılarla birlikte eklemeli imalat kavramının makine imalat teknolojileri akademik literatüründe yükselen bir trende sahip olduğu ifade edilebilir. Aşağıdaki şekilde eklemeli imalat anahtar kelimesine ilişkin ağ haritası yer almaktadır.

Şekil 4 incelendiğinde, eklemeli imalat anahtar kelimesinin 2015-2022 dönemine ait 17 yayına yapılan ortak atıf yayınlarında toplam 366 kez kullanıldığı söylenebilir. Eklemeli imalatın birlikte kullanıldığı anahtar kelimeler arasında hibrit üretim, 3D yazıcı, hızlı prototip, endüstri 4.0, enerji etkinliği, dijital iplik, arayüz, üç boyutlu yazıcı hizmeti, eklemeli imalat özellikleri vb. kavramlar yer almaktadır. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojileri alanında en çok yayın yapan ve ortak atıf yayınlara sahip ülkelere ilişkin ayrıntılı analizler yer almaktadır.

3.3 Atıf Patlaması Ülke Modeli

Makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında en çok yayın yapan ve yayınlarına atıf patlaması bulunan ülkelerin bilimsel ağ haritası aşağıdaki şekilde yer almaktadır:



Şekil 5. Ortak Atıf Ülke Ağ Haritası

LRF=3,0; LBY=41; e=2,0; g-indeks k=30; Network=63; E=58

Şekil 5'te yer alan ülke bazlı bilimsel ağ haritasına göre, makine imalat teknolojileri alanında yayınlarına atıf alan 63 ülke bulunmaktadır. Bu ülkeler arasında 58 ülkenin yayınları ortak atıf almıştır. Ortak atıf sayısı en yüksek iki ülke ABD ve Çin Halk Cumhuriyetidir. ABD'de makine imalat teknolojileri alanında yayımlanan 72 yayın toplam 1990 ortak atıf almıştır. ABD'deki yazarlar tarafından üretilen yayınların ortak atıflarının bulunduğu ülkeler arasında Almanya, Meksika, Güney Kore, İspanya, Portekiz, Çin Halk Cumhuriyeti, Yeni Zellanda, Fransa, Tayvan ve Kanada yer almaktadır. Çin Halk Cumhuriyeti'ndeki yazarlar tarafından üretilen 156 yayın ise toplam 557 ortak atıf almıştır. Çin Halk Cumhuriyetinde yayımlanan yayınların ortak atıflarının bulunduğu ülkeler arasında, ABD, Finlandiya, İsveç, İngiltere, Fransa ve Avustralya bulunmaktadır. Makine imalat teknolojileri alanında dünyada yayın sayısı açısından Çin Halk Cumhuriyeti'nin, yayın performansı açısından ise ABD'nin göreceli üstünlüğe sahip ülkeler oldukları söylenebilir. Aşağıdaki tabloda ülke bazında makine imalat teknolojisi alanında üretilen yayınların atıf patlaması dönemlerine dair veriler yer almaktadır:

Tablo 4: Ülke Bazında Atıf Patlaması Dönemleri(1981-2022)(CiteSpace, 2022)

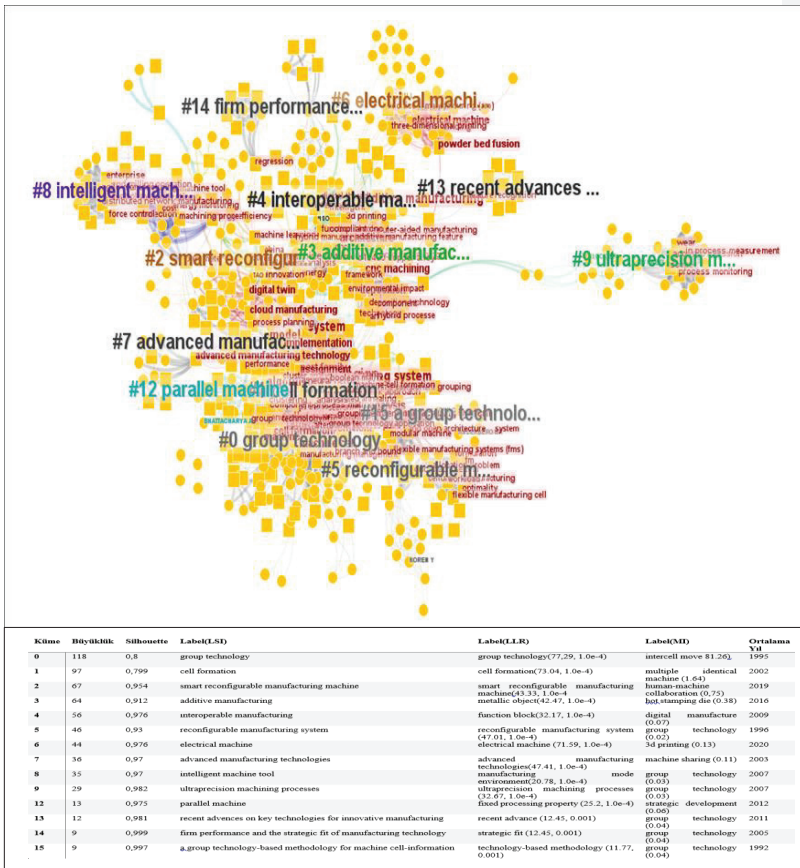
Countries	Year	Strength	Begin	End	1981 - 2022
USA	1992	16.3	1992	2000	
PEOPLES R CHINA	1996	14.5	2009	2014	
CANADA	1991	4.57	1991	2006	

Tablo 4'ün verilerine göre, makine imalat teknolojileri alanındaki yayınlarına dair ortak atıf patlaması en yüksek ülke ABD'dir. WoS bibliyografik veri setine göre ABD'de makine imalat teknolojileri alanında ilk bilimsel eserler 1992 yılında üretilmiş olup aynı yıl ortak atıf almaya başlanmıştır. Bu yayınlar Mitsuishi, M., Nagao, T., Hatamura, Y., Kramer, B. ve Warisawa, S. tarafından Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing dergisinde 24-26 Haziran 1992 yılında yayımlanan "A Manufacturing System for the Global Age" başlıklı çalışma ile Kamrani, A.K. ve Parsaei, H.R. tarafından Computers&Industrial Engineering dergisinde 1992 yılında yayımlanan "A Methodology of Forming Manufacturing Cells Using Manufacturing and Design Attributes" başlıklı çalışmadır. Bu çalışmalarla birlikte 1992-2022 yılları arasında ABD'de makine imalat teknolojileri alanında üretilen toplam 72 çalışma 1990 adet ortak atıf almış olup en yüksek atıf patlaması 1992-2000 yılları arasında yaşanmıştır. Çin Halk Cumhuriyetinde ise makine imalat teknolojileri alanında WoS bibliyografik veri setine göre ilk yayın 1996 yılında üretilmiştir. Ancak ortak atıf 2009 yılında alınmaya başlanmıştır. Çin Halk Cumhuriyetinde makine imalat teknolojileri alanında üretilen ilk yayın Gibson, I. tarafından Rapid Prototyping Journal dergisinde 1 Haziran 1996 yılında yayımlanan "A Discussion on the Concept of a Flexible Rapid Prototyping Cell" başlıklı çalışmadır. Çin Halk Cumhuriyeti'nde makine imalat teknolojileri

alanında 1996-2022 yılları arasında yayımlanan toplam 156 çalışma 557 adet ortak atıf almış olup bu yayınlara yapılan atıf patlaması 2009-2014 yılları arasında yaşanmıştır. Kanada’da ise WoS bibliyografik veri setine göre makine imalat teknolojileri alanında üretilen ilk yayın Gu, P. tarafından Computers in Industry dergisinde 1991 yılında yayımlanan “Process-Based Machine Grouping for Cellular Manufacturing Systems” başlıklı çalışmadır. Kanada’da 1991-2006 yılları arasında yayımlanan toplam 10 çalışmaya 99 ortak atıf yapılmış olup atıf patlaması da bu yıllar arasında yaşanmıştır. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojisi literatüründeki akademik çalışmaların ortak atıf kümelerine ilişkin ağ analizi verileri yer almaktadır.

3.4 Atıf Patlaması Küme Analizi

Makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında gerçekleştirilen yayınların yazar ve anahtar kelime kapsamında bilimsel haritalama analizi



Şekil 6. En Yüksek Ortak Atıf Alan Kümeler

LRF=3,0; LBY=41; e=2,0; g- indeksi k=30; Network=945; E=3842 (CiteSpace, 2022)

gerçekleştirilmiş olup, ortak atıf kümelerine ait ağ haritası aşağıdaki şekilde yer almaktadır.

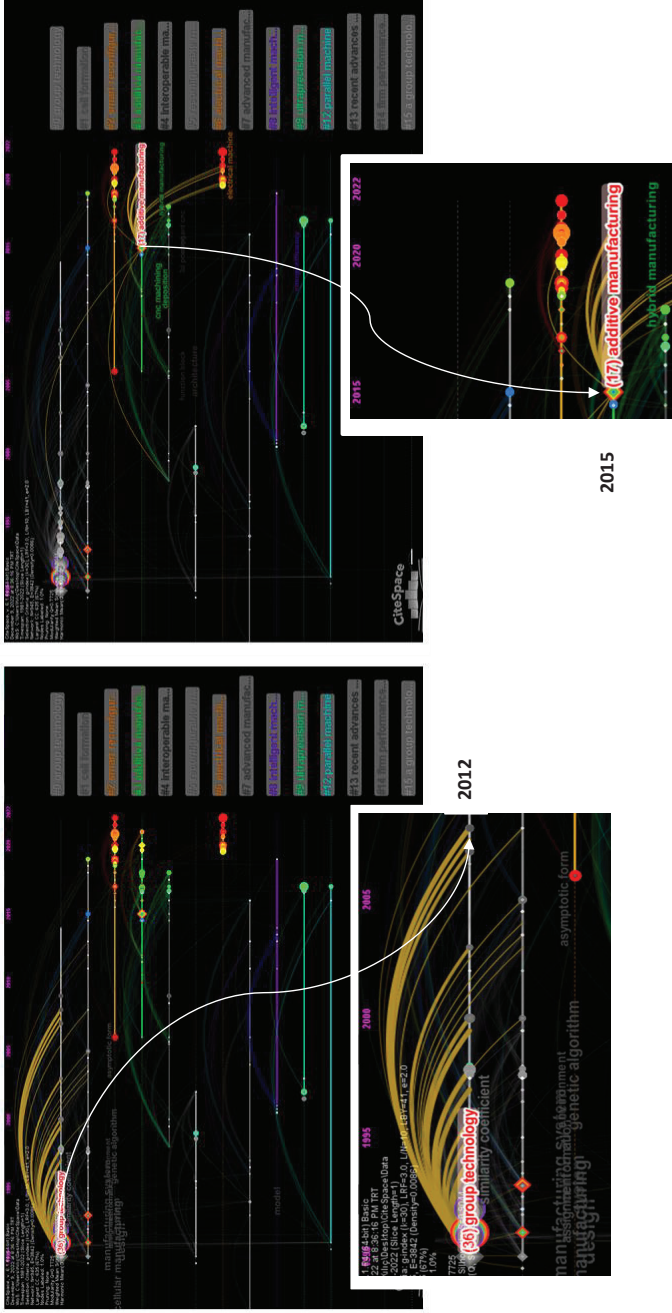
Şekil 6'da kümeleme analizi sonucunda en yüksek ortak atıf sayısına sahip 15 küme olduğu belirlenmiştir. Bilimsel ağ haritasında 945 atıf ağı ve 3842 ortak atıf ağı bulunmaktadır. "#0 grup teknolojisi" kümesinde, ortak atıf alan 118 yayın yer almaktadır. Kümenin Sihhouette indeksi %80'dir. Bu durumda #0 grup teknolojisi kümesinde yer alan verilerin birbirine yakınlıklarının iyi olduğu ve kümeleme başarısının yüksek olduğu ifade edilebilir. Kümenin ortalama atıf yılı 1995'dir. Kümede ortak atıf alan yayınlarda en sık kullanılan ortak kavram "hücrelerarası hareket"tir. Kümenin ortak atıf yayınlarında en sık kullanılan anahtar kelimesi "grup teknolojisi"(36 adet yayında)ve en çok atıf yapılan kaynakları Kusiak, A(1987) ve Chandrasekharan ve Rajagopalan(1989)'a ait makalelerdir. Kümenin ana atıf makalesi "Heragu, S.S. (1994) Group technology and cellular manufacturing. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS MAN AND CYBERNETICS, V24, P13 DOI 10.1109/21.281420"dir.

İkinci en büyük küme "#1 hücre oluşumu" kümesidir. Kümede ortak atıf alan 97 adet çalışma bulunmaktadır. Kümenin Sihhouette indeksi %79,9'dur. Kümenin ortalama atıf yılı 2002'dir. Dolayısıyla kümede yer alan yayınların ortalama 2002 yılı itibarıyla atıf almaya başladığı ifade edilebilir. Kümede ortak atıf alan yayınlarda en sık kullanılan ortak kavram "çoklu özdeş makine"dir. Ana atıf makalesi "Caux, C. (2000) Cell formation with alternative process plans and machine capacity constraints: a new combined approach. INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS DOI 10.1016/S0925-5273(99)00065-1"dir. Kümenin ortak atıf yayınlarında en sık kullanılan anahtar kelimeleri "tasarım" (23 adet yayında), "sistem"(17 adet yayında) ve "hücreli imalat"(17 adet yayında)'tır. Üçüncü en büyük küme "#2 akıllı yeniden yapılandırılabilir imalat makinesi" kümesidir. Kümede ortak atıf alan 67 çalışma bulunmaktadır. Kümenin Sihhouette indeksi %95,4'tür. Kümenin ortalama atıf yılı 2019'dur. Kümede ortak atıf alan yayınlarda en sık kullanılan ortak kavram "insan-makine işbirliği"dir. Kümenin ana atıf makalesi "Morgan, J (2021) Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. JOURNAL OF MANUFACTURING SYSTEMS, V59, P26 DOI 10.1016/j.jmsy.2021.03.001"dir. Kümenin ortak atıf yayınlarında en sık kullanılan anahtar kelimesi "makine öğrenmesi"(9 adet yayında), en çok atıf yapılan kaynakları Tao, F.(2018) ve Lee, J.(2015)'dir. Dördüncü en büyük küme "#3 eklemeli imalat" kümesidir. Kümede ortak atıf alan 64 çalışma bulunmaktadır. Kümenin Sihhouette indeksi %91,2'dir. Kümenin ortalama atıf yılı 2016'dır. Kümede ortak atıf alan yayınlarda en sık kullanılan anahtar kelime "sıcak presleme kalıbı"dir. Kümenin ana atıf makalesi "Bonnard, R (2018) Step-nc digital thread for additive manufacturing: data model, implementation and validation. INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING, V31, P20

DOI 10.1080/0951192X.2018.1509130”dir. Kümenin ortak atıf yayınlarında en sık kullanılan anahtar kelimeleri “eklemeli imalat”(17 adet yayında), “teknoloji”(7 adet yayında)’dir.

Makine imalat teknolojileri alanında yapılan yayınlarda 2015 yılı dönüm noktası olmuştur. Eklemeli imalat konusunda Newman, S.T., Zhu, Z., Dhokia, V. ve Shokrani A. tarafından 2015 yılında CIRP Annals-Manufacturing Technology dergisinde yayımlanan “Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies” başlıklı makalenin 2016 yılı itibariyle ortak atıf almaya başlamasıyla birlikte makine imalat teknolojileri alanında insan-makine işbirliği, makine öğrenmesi, yeniden yapılandırılabilir imalat makinesi, üç boyutlu yazıcı, dijital ipilik, hibrit üretim, hızlı protipleme, vb. kavramlar literatüre girmeye başlamıştır. Yaklaşık 2020 yılı itibariyle üç boyutlu yazıcı kavramı makine imalat teknolojileri alanında yapılan yayınlarda daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Öyle ki “#6 elektrikli makine” kümesinde yer alan “Szabo, L. (2022) The key role of 3d printing technologies in the further development of electrical machines. MACHINES DOI 10.3390/machines10050330” yayın, en fazla atıf alan makaledir. Makalede, elektrikli makinelerin gelişmesinde üç boyutlu yazıcıların rolü tartışılmaktadır. Bu kümenin en fazla atıf yapılan kaynakları Li, L.(2018)(10 adet yayında), Simpson, N.(2018)(7 adet yayında), Garibaldi, M.(2016)(6 adet yayında) olarak ifade edilebilir.

WoS bibliyografik veri tabanından elde edilen 1981-2022 yılı veri seti analiz edildiğinde 2015 yılı itibariyle makine imalat teknolojileri alanında eklemeli imalat teknolojisinin yükselen trend izlediği söylenebilir. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojileri literatüründe temel kavramların gelişim dönemlerine ilişkin zaman çizelgesi grafiği yer almaktadır.

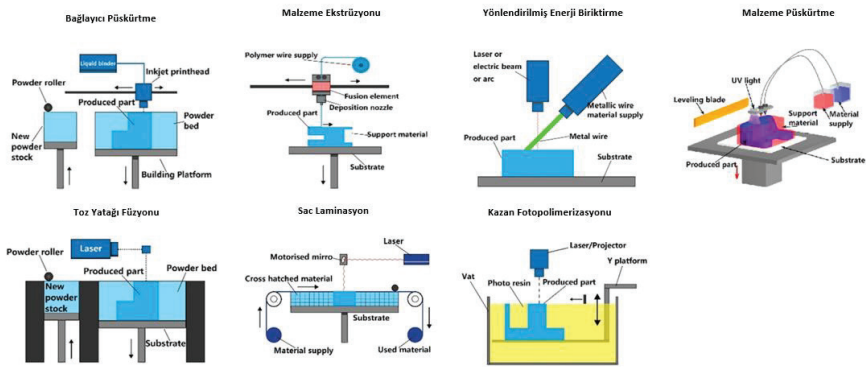


Makine imalat teknolojileri literatüründe 90'lı yıllarda hakim olan grup teknolojisi kavramı 2012 yılı itibarıyla önemini yitirmeye başlamış ardından üç boyutlu yazıcıların gelişmesiyle birlikte eklemeli imalat, makine imalat teknolojileri literatüründe yükselen bir eğilim göstermeye başlamıştır. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojileri literatüründe eklemeli imalat kavramının akademik gelişim süreci incelenmektedir.

Şekil 8. Grup Teknolojisinden Eklemeli İmalata Zaman Çizelgesi
LRF=3,0; LBY=4,1; e=2,0; g-indeks k=30; Networkk=945; E=3842 (CiteSpace, 2022)

3.5 Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, birçok endüstri için geleceğin üretim teknolojisi olarak ifade edilmektedir. Eklemeli imalat üç boyutlu yazıcılarla birlikte karmaşık fonksiyonların kolay entegrasyonunun sağlanmasına imkan tanımakta, pahalı takım tezgahlarına ihtiyaç duyulmadan karmaşık veya kişiselleştirilmiş bileşenlerin hızlıca üretilmesini sağlamaktadır. Katmanlı imalat olarak da ifade edilen eklemeli imalat, katmanların birbiri üzerine dizilmesiyle istenilen bir şeklin üretilbildiği bir teknolojidir (Qin ve diğ., 2022). Aşağıdaki şekilde yedi farklı eklemeli imalat süreci ve unsurları yer almaktadır:



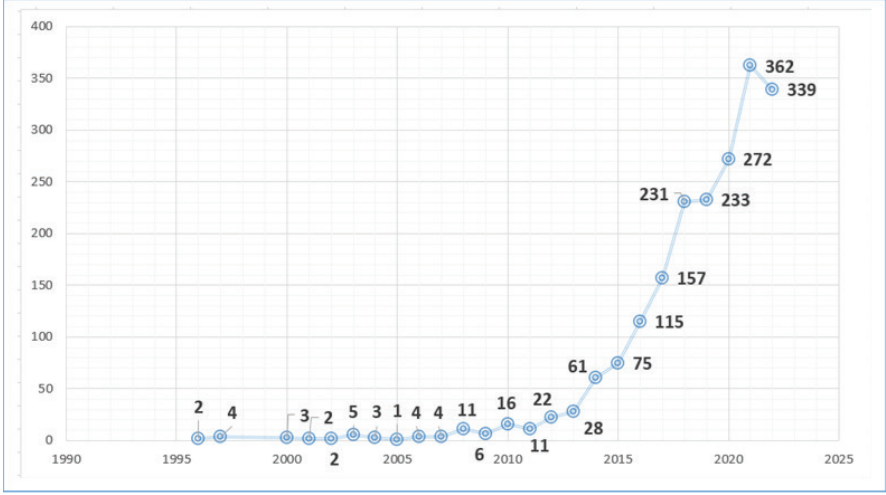
Şekil 9. Eklemeli İmalat Süreci (Qin ve diğ., 2022)

Şekil 9’da eklemeli imalatın yedi farklı üretim süreci yer almaktadır. Bağılayıcı Püskürtme, Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme, Malzeme Ekstrüzyonu, Malzeme Püskürtme, Toz Yatağı Füzyonu, Sac Laminasyonu ve Kazan Fotopolimerizasyonu olmak üzere bu yedi farklı sürecin her biri kendine has üretim özelliklerine sahiptir (Quan ve diğ., 2015). Geçen yirmi yılda eklemeli imalat alanında önemli teknolojik gelişmeler yaşanmıştır. Eklemeli imalat teknolojisine uygun malzeme ve uygulamalar konusunda her geçen gün yeni gelişmelerin yaşanması, uygun malzeme çeşitliliğini ve bu sayede eklemeli imalatın tüm sektörlerde uygulanmasını mümkün hale getirebilecektir (Yang, Li, Pan ve Sun, 2017). Eklemeli imalat konusu özellikle makine imalat teknolojileri alanında sahip olduğu avantajları nedeniyle dikkat çekmiş ve pek çok akademik çalışmaya konu olmuştur. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojileri literatüründe eklemeli imalat konusundaki çalışmalara ilişkin ayrıntılı analizler yer almaktadır.

3.5.1 Eklemeli İmalat WoS İstatistikleri

WoS bibliyografik veri tabanında gelişmiş arama bölümüne “TS=machine AND

TS=manufacturing AND TS=Technologies AND TS=additive” anahtar kelimeleri yazılarak 30 Kasım 2022 tarihinde yapılan tarama sonucunda makine imalat teknolojileri alanında 1.976 adet bilimsel çalışmaya ulaşılmıştır. 1996-2022 yılları arasında üretilen bilimsel eserlerin 2021 yılında önceki yıllara göre artış gösterdiği söylenebilir. Makine imalat teknolojileri alanında üretilen eklemeli imalat konulu çalışmaların yıllara göre dağılım sayıları aşağıdaki şekilde yer almaktadır:

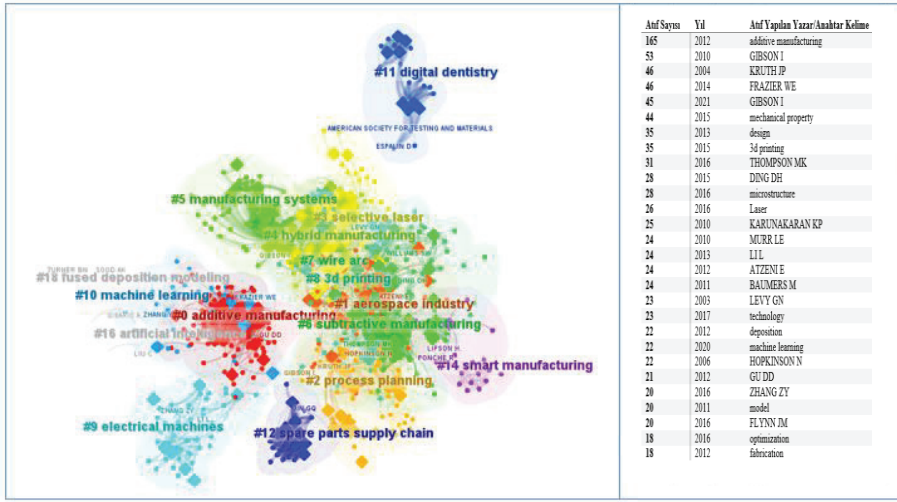


Şekil 10: Makine İmalat Teknolojileri Alanında Üretilen Bilimsel Eserler (WoS, 2022).

WoS bibliyografik veri tabanından elde edilen veri setine göre makine imalat teknolojileri alanında eklemeli imalat konusunda 10'dan fazla bilimsel eser üreten yazarlar Wicker, Ryan, B.(21 adet), Paris, Henri Modor(12 adet), Revilla-Leon, Marta(11 adet) ve Vaimann, Toomas(10 adet) olarak ifade edilebilir. Üretilen bilimsel eserlerin 1.222 tanesi araştırma makalesi, 162 tanesi inceleme makalesi ve 616 tanesi bildiri niteliğindedir. Diğer yayınlar arasında kitap bölümü, editöre mektup ve erken görünüm yayınları bulunmaktadır. Aşağıdaki bölümde makine imalat teknolojileri alanında üretilen eklemeli imalat konulu çalışmalara ilişkin bilimsel haritalama analizleri yer almaktadır.

3.5.2 Eklemeli İmalat Bilimsel Haritalama Analizleri

WoS bibliyografik veri setinde yer alan makine imalat teknolojileri literatüründeki eklemeli imalat konulu çalışmaların yazar ve anahtar kelime kapsamında CiteSpace bilimsel haritalama programında analizi gerçekleştirilmiş olup ayrıntılı bilgi aşağıdaki şekilde yer almaktadır:



Şekil 11. Eklemeli İmalat Bilimsel Ağ Haritası

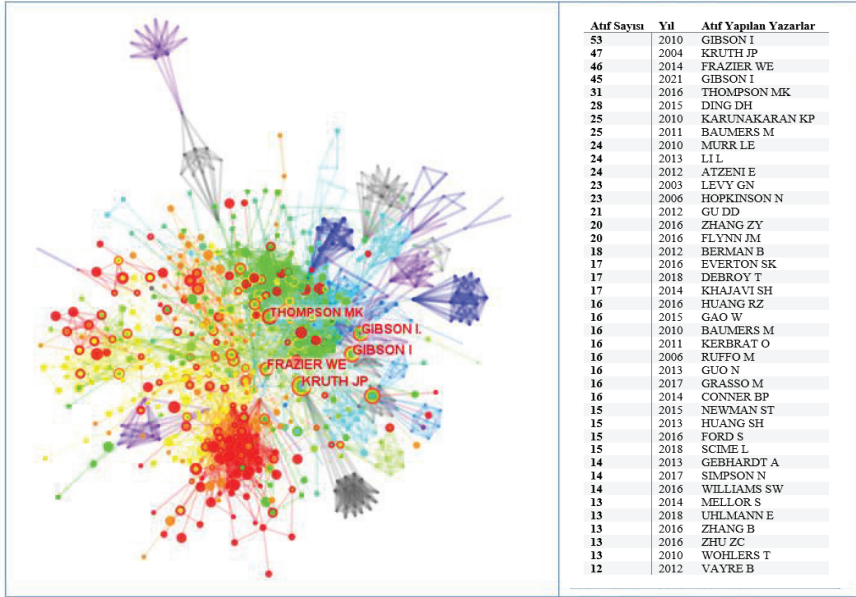
LRF=3,0; LBY=26; e=2,0; g-indeks k=57; Network=971; E=4491(CiteSpace, 2022)

Makine imalat teknolojileri literatüründe yer alan eklemeli imalat konulu bilimsel eserler atıf ve ortak atıf sayılarına göre 16 alt kümede sınıflandırılmıştır. Bilimsel ağ haritasında 971 atıf ve 4491 ortak atıf yer almaktadır. Çalışmaların yoğunlaştığı kümeler; #0 eklemeli imalat; #1 havacılık endüstrisi; #2 süreç planlama; #3 seçici lazer; #4 hibrit imalat; #5 imalat sistemleri; #6 çıkarmalı imalat; #7 geniş ark; #8 3D yazıcı; #9 elektrikli makineler; #10 makine öğrenmesi; #11 dijital diş hekimliği; #12 yedek parça tedarik zinciri; #14 akıllı imalat; #16 yapay zeka; #18 fused deposition modelling-FDM'dir. FDM, üç boyutlu baskı teknolojileri içerisinde ölçüsel doğruluğu ve tekrarlanabilirliğiyle stabil parçalar oluşturmak için kullanılan teknoloji olarak ifade edilebilir. Kümelerde en çok atıf yapılan anahtar kelime "eklemeli imalat"tır. Kümelerin en çok ortak atıfta bulunan makalelerine dair ayrıntılı bilgi aşağıda yer almaktadır:

- Qin, J (2022) Research and application of machine learning for additive manufacturing. ADDITIVE MANUFACTURING DOI 10.1016/j.addma.2022.102691.
- Pinkerton, AJ (2016) [invited] lasers in additive manufacturing. OPTICS AND LASER TECHNOLOGY DOI 10.1016/j.optlastec.2015.09.025.
- Thao, Le Van (2018) Extracting features for the manufacture of parts from existing components based on combining additive and subtractive technologies. INTERNATIONAL JOURNAL OF INTERACTIVE DESIGN AND MANUFACTURING - IJIDEM, V12, P12 DOI 10.1007/s12008-017-0395-y.
- Thao, Le Van (2018) The development of a strategy for direct part reuse using additive and subtractive manufacturing technologies. ADDITIVE MANUFACTURING, V22, P13 DOI 10.1016/j.addma.2018.06.026.

- Chong, L (2018) A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing processes. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, V95, P20 DOI 10.1007/s00170-017-1345-3.
- Brajlili, T (2011) Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. RAPID PROTOTYPING JOURNAL, V17, P12 DOI 10.1108/13552541111098644.
- Norrish, J (2021) A review of wire arc additive manufacturing: development, principles, process physics, implementation, and current status. JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS DOI 10.1088/1361-6463/ac1e4a.
- Gargalis, L (2020) Additive manufacturing and testing of a soft magnetic rotor for a switched reluctance motor. IEEE ACCESS DOI 10.1109/ACCESS.2020.3037190.
- Ghilan, A (2020) Trends in 3d printing processes for biomedical field: opportunities and challenges. JOURNAL OF POLYMERS AND THE ENVIRONMENT, V28, P23 DOI 10.1007/s10924-020-01722-x.
- Roberson, DA (2013) 3d printer selection: a decision-making evaluation and ranking model. VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING DOI 10.1080/17452759.2013.830939.
- Khajavi, SH (2014) Additive manufacturing in the spare parts supply chain. COMPUTERS IN INDUSTRY, V65, P14 DOI 10.1016/j.compind.2013.07.008.
- Rosen, DW (2014) What are the principles for design for additive manufacturing?. PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROGRESS IN ADDITIVE MANUFACTURING DOI 10.3850/978-981-09-0446-3_027.
- Phua, A (2022) A digital twin hierarchy for metal additive manufacturing. COMPUTERS IN INDUSTRY DOI 10.1016/j.compind.2022.103667.
- Wu, H (2016) In situ monitoring of fdm machine condition via acoustic emission. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, V84, P13 DOI 10.1007/s00170-015-7809-4.

Makine imalat teknolojileri literatüründe eklemeli imalat konulu en çok atıf alan bilimsel eserlerin 2011-2022 yılları arasında üretildiği söylenebilir. Bu konuda en çok kullanılan anahtar kelimeler ise eklemeli imalat, üç boyutlu yazıcı, makine özellikleri, makine öğrenmesi, mikro yapı, lazer, tasarım, fabrikasyon, model, optimizasyon, FDM(fused deposition modelling) ve yapay zeka olarak ifade edilebilir. Aşağıdaki şekilde makine imalat teknolojileri literatüründe eklemeli imalat konulu çalışmalarına en çok atıf yapılan yazarlara dair bilimsel ağ haritası yer almaktadır:



Şekil 12. Ekllemeli İmalat Yazar Bazlı Bilimsel Ağ Haritası

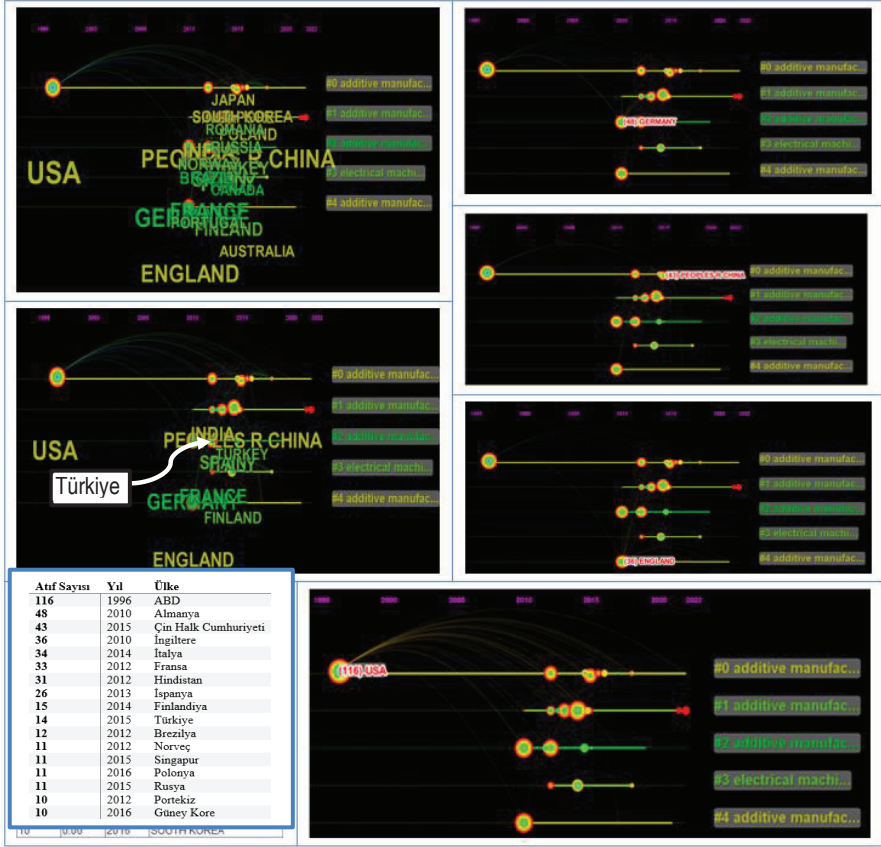
LRF=3,0; LBY=26; e=2,0; g- indeks k=57; Network=947; E=4114 (CiteSpace, 2022)

Şekil 12’de yer alan bilimsel ağ haritasında 947 atf ve 4114 ortak atf yer almaktadır. Yayınlarına en çok atf yapılan ilk beş yazar sırasıyla Gibson, I.(2010/53 atf), Kruth, J.P.(2004/47 atf), Frazer W.E.(2014/46 atf), Gibson, I.(2021/45 atf) ve Thompson, M.K.(2016/31 atf) olarak sıralanabilir. En çok Atf alan iki çalışmaya ilişkin ayrıntılı bilgi aşağıda yer almaktadır:

- Gibson, I, Rosen, D. W., and Stucker, B., (2010). “Additive Manufacturing Technologies,” Springer, 2010.
- Gibson, I, Rosen, D. W., Stucker, B., ve Khorasani, M. Khorasani. (2021). Additive Manufacturing Technologies, 3. Baskı, Springer, 2021.

Aşağıdaki şekilde makine imalat teknolojileri literatüründeki ekllemeli imalat konulu çalışmaların yer aldığı ülkelere ilişkin bilimsel ağ haritası yer almaktadır:

Şekil 13’te yer alan ülke bazlı bilimsel ağ haritasına göre, makine imalat teknolojileri literatüründe ekllemeli imalat konusunda üretilen bilimsel eserlerine atf alan 62 ülke ve bu bilimsel eserlerine ortak atf alan 151 ülke bulunmaktadır. Ekllemeli imalat konusundaki yayınlarına en çok ortak atf alan ülkeler sıralandığında ABD’nin 116 yayını, Almanya’nın 48 yayını, Çin Halk Cumhuriyeti’nin 43 yayını ve İngiltere’nin 36 yayını olduğu söylenebilir. Türkiye’nin ortak atf alan 14 yayını bulunmaktadır. Ülkelere göre gerçekleştirilen kümeleme analizi sonucunda ortak atf sayısı en yüksek olan ülkeler 5 kümeye ayrılmıştır. Birinci



Şekil 13. Ekllemeli İmalat Ülke Bazlı Bilimsel Ağ Haritası

LRF=3,0; LBY=26; e=2,0; g-İndeks k=57; Network=62; E=151 (CiteSpace, 2022)

kümede ABD, Çin Halk Cumhuriyeti ve Hindistan yer almaktadır. Bu kümede ana atıf makalesi Gutowski, T. (2017) Note on the rate and energy efficiency limits for additive manufacturing. JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY, V21, P11 DOI 10.1111/jiec.12664. olarak ifade edilebilir. Birinci kümede elektrikli makineler, fiber kompozit ürün ve ekllemeli imalat en sık tekrar eden anahtar kelimelerdir. İkinci kümede İtalya, İspanya ve Türkiye yer almaktadır. Bu kümenin ana atıf makalesi Moehring, H.C. (2015) A testpart for interdisciplinary analyses in micro production engineering. 3RD CIRP GLOBAL WEB CONFERENCE - PRODUCTION ENGINEERING RESEARCH ADVANCEMENT BEYOND STATE OF THE ART (CIRPE2014) DOI 10.1016/j.procir.2015.04.018. olarak ifade edilebilir. İkinci kümede elektrikli makine, düşük maliyetli ekllemeli imalat en sık tekrar eden anahtar kelimelerdir. Üçüncü kümede Almanya, Fransa ve Brezilya yer almaktadır. Bu kümenin ana atıf makalesi Czelusniak, T. (2019) Materials used for sinking edm

electrodes: a review. JOURNAL OF THE BRAZILIAN SOCIETY OF MECHANICAL SCIENCES AND ENGINEERING DOI 10.1007/s40430-018-1520-y olarak ifade edilebilir. Üçüncü kümede en sık tekrar eden anahtar kelimeler yedek parça, eklemeli imalat ve fused deposition modelling(FDM)'dir. Dördüncü kümede Finlandiya, Portekiz ve Estonya yer almaktadır. Bu kümenin ana atıf makalesi Ghahfarokhi, P.S. (2021) Opportunities and challenges of utilizing additive manufacturing approaches in thermal management of electrical machines. IEEE ACCESS DOI 10.1109/ACCESS.2021.3062618 olarak ifade edilebilir. Dördüncü kümede en sık tekrar eden anahtar kelimeler, elektrikli makine ve eklemeli imalatdır. Beşinci kümede İngiltere, Avustralya ve Güney Afrika yer almaktadır. Bu kümenin ana atıf makalesi, Nyika, J. (2021) Advances in 3d printing materials processing-environmental impacts and alleviation measures. ADVANCES IN MATERIALS AND PROCESSING TECHNOLOGIES DOI 10.1080/2374068X.2021.1945311 olarak ifade edilebilir. Beşinci kümede en sık tekrar eden anahtar kelimeler, üç boyutlu yazıcı malzemeleri, eklemeli imalat ve fiber kompozit üründür.

4. Bulgular

Çalışmanın amacı, makine imalat teknolojileri ve eklemeli imalat literatüründeki akademik çalışmaların entelektüel gelişiminin görselleştirilmesidir. Bu amaçla, makine imalat teknolojileri ve eklemeli imalat alanındaki başlıca çalışma konularının neler olduğu, klasik ve geçici yayınlar, alanın gelişim tarihindeki kritik geçişler ve dönüm noktaları ile atıf patlaması olan yazar, anahtar kelime ve ülke modelleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda WoS bibliyografik veri tabanından elde edilen makine imalat teknolojileri ve eklemeli imalat konusundaki akademik eserler CiteSpace bilimsel haritalama programında analiz edilerek aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Makine imalat teknolojileri alanında 1981-2022 yılları arasında WoS bibliyografik veri tabanında yer alan uluslararası bilimsel dergilerde toplam 13.551 makale yayımlanmıştır.
- Makine imalat teknolojileri literatürüne yön veren ortak atıf performansı en yüksek dönüm noktası iki çalışma Kusiak, A.(1987) ile Chandrasekharan ve Rajagopalan(1989)'a aittir. Her iki bilimsel eser grup teknolojisi konulu çalışmalardır.
- Makine imalat teknolojisi alanında grup teknolojisi 2012 yılına kadar alanda güncelliğini korumaya devam etmiştir. Ancak 2015 yılı itibarıyla makine imalat teknolojileri alanında eklemeli imalat teknolojisine yönelik çalışmaların giderek artış eğilimi gösterdiği söylenebilir. Anahtar kelime analizi yapıldığında 2015-2022 tarihleri arasında "eklemeli imalat" anahtar kelimesinin ortak atıf yayınlarında 366 kez kullanıldığı belirlenmiştir.

- Makine imalat teknolojileri yayınlarının ortak atıf performansı en yüksek ilk iki ülke ABD ve Çin Halk Cumhuriyeti'dir. ABD'de yayımlanan 72 yayın 1.990 ortak atıf alırken, Çin Halk Cumhuriyeti'nde yayımlanan 156 yayın 557 ortak atıf almıştır.
- Makine imalat teknolojileri alanındaki bilimsel eserlerin çalışma konuları itibariyle birbirine yakınlıkları oranında kümeleme analizi yapılmış ve en güncel çalışmaların yer aldığı kümeler değerlendirildiğinde makine imalat teknolojileri alanında 2015 yılının dönüm noktası olduğu, eklemeli imalat konusunda Newman, S.,T., Zhu, Z., Dhokia, V ve Shokrani, A. tarafından 2015 yılında çalışılan, CIRP Annals-Manufacturing Technology dergisinde yayımlanan "Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies" başlıklı çalışmanın 2016 yılı itibariyle ortak atıf almaya başlamasıyla birlikte insan-makine işbirliği, makine öğrenmesi, yeniden yapılandırılabilir imalat makinesi, üç boyutlu yazıcı, dijital iplik, hibrit üretim, hızlı prototipleme vb. kavramların makine imalat teknolojileri literatürüne girmeye başladığı söylenebilir.
- Eklemeli İmalat konusunda ortak atıf yakınlığı en yüksek yazarlar Newman ve diğ.(2018), Simpson(2018) ve Karunakaran(2010) olarak belirlenmiş olup, doğrudan ilgi düzeyi en yüksek anahtar kelimeler "hibrit üretim", "hızlı prototipleme" ve "elektrikli makine"dir.
- Eklemeli imalat konusunda en çok atıf alan yayın Gibson ve diğ. tarafından 2010 yılında yayımlanan "Eklemeli İmalat Teknolojileri" konulu bilimsel bir kitaptır. Kitabın ilerleyen yıllarda ikinci ve üçüncü baskıları da yayımlanmıştır.
- Eklemeli imalat konusunda üretilen bilimsel eserlerine ortak atıf alan 151 ülke bulunmaktadır. Yayınlarına en çok ortak atıf alan ilk üç ülke, ABD, Almanya ve Çin Halk Cumhuriyeti'dir. Türkiye'nin eklemeli imalat konusunda ortak atıf alan 14 yayını bulunmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, makine imalat teknolojileri alanında üretilen bilimsel eserlerinin ortak atıf performansı en iyi olan ülkeler ABD, Çin Halk Cumhuriyeti ve Almanya'dır. Makine imalat teknolojileri alanındaki bilimsel gelişmelere bağlı olarak ve üç boyutlu yazıcı endüstrisindeki teknolojik ilerlemeler dikkate alındığında bilimsel literatürde yer alan araştırma ve çalışmaların da bu alana doğru eğilim gösterdiği söylenebilir. Çalışma kapsamında yapılan analizlerin, makine imalat teknolojileri literatüründeki güncel gelişmelerin değerlendirilmesi ve bu alanda çalışan akademik ve uzman araştırmacılara fayda sağlayabileceği öngörülmektedir.

5. Sonuç

WoS bibliyografik veri tabanında yer alan makine imalat teknolojileri akademik literatürü incelendiğinde, bu alandaki ilk bilimsel çalışmaların 1981 yılı itibarıyla uluslararası dergilerde yayımlanmaya başladığı söylenebilir. Makine imalat teknolojileri alanında 90'lı yıllarda grup teknolojisi kavramı en çok tartışılan kavramlardan biri olmuştur. Grup teknolojisi, Kusiak(1987) tarafından, üretimde hazırlık süreleri ve süreçteki stokları azaltmak amacıyla hücreli üretim sistemi mantığına dayanan bir üretim yönetimi felsefesi olarak önerilmiştir. Grup teknolojisi, bir üretim sisteminde yer alan parça ailelerinin tasarım ve üretim benzerliklerine göre gruplandırılması ve bu gruplara uygun hücrelerin oluşturulması süreçlerini içerir. 1987 yılında önerilen bu yeni konsept, parça ailelerinin ve makine hücrelerinin kalitesini iyileştirmeyi amaçlamaktadır(Kusiak, 1987). Günümüz şartlarında yaşanan teknolojik gelişmeler sonucunda, grup teknolojisine dayandığı üretim yönetimi felsefesine benzer şekilde, üretim sürecinde kaliteyi arttırmak, hızlı ve düşük maliyetli üretim sağlamak amacıyla makine imalat teknolojileri literatüründe eklemeli imalat teknolojisi tartışılmaya başlanmıştır.

Eklemeli imalat genellikle, 3D yazıcı, hızlı prototipleme, hızlı takımlama, hızlı teknolojiler, hızlı imalat, serbest biçimli imalat, ileri imalat, eklemeli fabrikasyon, eklemeli katmanlı imalat, doğrudan dijital imalat ve doğrudan imalat gibi kavramlarla birlikte anılmaktadır(Neil Hopkinson ve Hague, 2006). Ancak eklemeli imalat, bu kavramlarla aynı şey değildir. Buna karşılık bu kavramların dayandığı teknolojilerle aynı prensip üzerine inşa edilmiştir. Bu prensip, alet ve fiyestürlere ihtiyaç duymadan malzeme katmanlarını istifleyerek çok karmaşık geometrilere sahip parçalar üretebilme yeteneğidir. Bu teknoloji, başlangıçta hızlı prototipleme için bir uygulama olarak kabul edilmiştir. Günümüzde ise havacılık, tıp, otomotiv, inşaat ve sanat da dahil olmak üzere farklı endüstrilerde geniş çapta kullanılmaktadır. Daha düşük bir fiyata daha yüksek kalitede malzemelerin mevcudiyeti, önümüzdeki birkaç yıl içerisinde daha büyük hassasiyet seviyelerinde daha büyük ürünler üretebilme yeteneği sağlayarak(Zhou, Chen ve Epstein, 2010) bu teknolojinin sadece tasarım açısından değil aynı zamanda imalat açısından da önemli tedarik zinciri avantajları sağlayabileceği söylenebilir. Üretilen ürün türü ve imalatın nerede gerçekleştirileceği konusundaki esneklik, çok sayıda şirketin yanında CAD-CAM tasarımlarını sadece endüstriyel düzeyde değil aynı zamanda tüketiciler düzeyinde de sunabilmelerine imkan tanıyabilecektir. Bu tasarımlar, nihai tüketiciler pazarında indirilebilir CAD-CAM tasarım kitapları aracılığıyla kitlesel kişiselleştirme imkanı sağlayacaktır(Berman, 2012). Eklemeli imalatın sahip olduğu avantajlar sadece özgür ürün tasarımına imkan vermesiyle sınırlı değildir. Tasarım kısıtlamalarını ortadan kaldıran, malzeme tasarrufu ve geometrik açıdan karmaşık tasarımlara imkan sunması gibi tasarım özgürlüğü sayesinde endüstriye başka potansiyel faydalar da sunmaktadır. Örneğin en önemli potansiyel avantajlarından biri lojistik sistemini daha verimli hale getirebilecek olmasıdır(Appleton,

2014). Eklemeli imalat hem tasarım aşamasından pazara sunum aşamasına kadar geçen pazara çıkış süresini hem de tam ölçekli imalat hacmine ulaşma süresini azaltma potansiyeline sahiptir. Ürünlerin tam zamanında imalat yaklaşımına göre değil, doğrudan sipariş edildiği gibi basıldığı tam imalat moduna göre üretildiği bir gelecek sunar. Böylesine yeni bir paradigma, küresel tedarik zincirine önemli sonuçlar sağlayacaktır. Parçaların nakliyesi ve depolama ihtiyacının bir kısmı ortadan kalkacaktır. Ayrıca, montaj hattı çalışanlarının karmaşık ürünleri bir araya getirme ihtiyacı da azalacaktır(Campbell ve Ivanova, 2013). Eklemeli imalatın sağladığı diğer avantajlar arasında, ürünlerin pazara çıkış sürelerinin kısalmaya olacağı olması, dünya çapındaki şirketlerin atık ve enerji tüketimlerinin azalması, eski ürünlerin yeniden üretilebilmesi, onarılabilmesi ve yeniden kullanılabilmesine imkan sağlaması gibi konular söylenebilir(Hull, 2014).

Eklemeli imalatın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için tasarım, malzeme, teknoloji, yazılım ve kalite kontrol olmak üzere beş ana alanda ilerleme gerekmektedir. Bu nedenle daha fazla alanda daha fazla araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç vardır. Eklemeli imalat teknolojisinin sunmuş olduğu tüm bu avantajlar makine imalat teknolojileri alanında yeni fırsat alanları yaratırken, bu alandaki bilimsel çalışmalara da ilham olmaktadır. Makine imalat teknolojileri literatüründeki akademik eserlerin gelişim sürecinin incelendiği bu çalışmanın gelecekte bu alanda yapılması planlanan akademik çalışmalara rehberlik edeceği düşünülmektedir.

Kaynakça

- Appleton, R., W. (2014). Additive manufacturing overview for the United States Marine Corps. R W Appleton&Company, Inc. Erişim adresi: <http://www.rwappleton.com/3Dprinting.pdf>.
- Beach, R., Muhlemann, A., P., Price, D., H., R., Paterson, A. ve Sharp, J., A. (2000). Manufacturing operations and strategic flexibility: survey and cases. *International Journal Operation Production Management*, 20(1), 7-30. Doi: <https://doi.org/10.1108/01443570010301056>.
- Berman, B.(2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizon*, 55(2), 155-162.Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- Chandrasekharan, M. P., ve Rajagopalan, R. (1989). Groupability: Analysis of the properties of binary data matrices for group technology. *International Journal of Production Research*, 27(6), 1035-1052. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207548908942606>.
- Chen, C. (2004). Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization. *PNAS*, 101(1), 5303-5310, Erişim Adresi: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0307513100.

- Chen, C. (2016). *CiteSpace: A practical guide for mapping scientific literature*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Chen, C. (2017). Science mapping: A systematic review of the literature. *Journal of Data and Information Science*, 2(2), 1-40. Doi: <https://doi.org/10.1515/jdis-2017-0006>.
- Egghe, L. (2006). Theory and practice of the g-index. *Scientometrics*, 69(1), 131-152. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11192-006-0144-7>.
- Esmailian, B., Behdad, S. ve Wang, B. (2016). The evolution and future manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 39, 79-100. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>.
- Garfield, E. (1955). Citation indexes for science: A new dimension in documentation through association of ideas. *Science*, 122(3159), 108-111. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.122.3159.108>.
- Hirsch, J., E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(46), 16569-16572. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>.
- Hull, C. (2014). 3D systems: Empowering our customers to manufacture the Future. *3D Printing* 1(1), 55-59.
- Katz, J. (2015). Advanced manufacturing: Where is America today? *Industry Week*, 259(10), 26-30. Erişim adresi: <https://www.industryweek.com/the-economy/public-policy/article/21942827/advanced-manufacturing-where-is-america-today>.
- Kuhn, T., S. (1962). *The Structure of Scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kusiak, A. (1987). The generalized group technology concept. *International Journal of Production Research*, 25, 561-569. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207548708919861>.
- Liu, J., Lai, Z., Kristiansen, H. ve Khoo, C. (1998). *Overview of conductive adhesive joining technology in electronics packaging applications*. Proceedings of 3rd International Conference on Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing 1998. Presented at adhesives '98. IEEE.org 1-18. Doi: <https://doi.org/10.1109/ADHES.1998.741996>.
- Merklein, M., Lechner, M. ve Kuppert, A. (2012). Enhancement of formability of aluminum alloys in multi-stage forming operations by a local intermediate heat treatment. *Production Engineering*, 6(6), 541-549. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.070>.

- Nassehi, A., Newman, S. Dhokia, V., Zhu, Z. ve Asrai, R. (2012). Using formal methods to model hybrid manufacturing processes. Edt, ElMaraghy H., A. *Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability SE-8*. Berlin Heidelberg: Springer, 52-56.
- Neil Hopkinson, P., D. ve Hague, R. (2006). *Rapid manufacturing: An industrial revolution for the digital age*. England, West Sussex: John Wiley&Sons.
- Nieslony, P. ve Grzesik, W. (2011). Optimization procedures for machining operations on cnc machine tools. *Pomiary Automatyka Kontrola R*, 57(2), 224-227. Erişim Adresi: <https://www.infona.pl//resource/bwmeta1.element.baztech-article-BSW4-0098-0025>
- Quan, Z., Wu, A., Keefe, M., Qin, X., Yu, J., Suhr, J., Byun, J.H., Kim, B.S. ve Chou, T.W. (2015). Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: Opportunities and challenges. *Materials Today*, 18(9), 504-512. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.05.001>.
- Wohlers Report (2014). *Tracking global growth in industrial-scale additive manufacturing*. Erişim adresi: <https://wohlersassociates.com/product/wohlers-report-2014/>.
- Wohlers Report (2020). 3D printing and additive manufacturing state of the industry: Annual worldwide progress report. *Wohlers Associates*. Erişim adresi: <https://wohlersassociates.com/product/wohlers-report-2020/>.
- Yang, Y., Li, L., Pan, Y. ve Z. Sun, Z. (2017). Energy consumption modeling of stereolithographybased additive manufacturing toward environmental sustainability. *Journal of Industrial Ecology*, 21168–S178. <https://doi.org/10.1111/jiec.12589>.
- Zhou, C., Chen, Y. ve Epstein, D., J. (2010). Additive manufacturing based on multiple calibrated projectors and its image planning. *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information In Engineering Conference*, 439-449.
- Zhou, C. ve Chen, Y. (2012). Additive manufacturing based on optimized mask video projection for improved accuracy and resolution. *Journal of Manufacturing Process*, 14(2), 107-118. Doi: <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2011.10.002>.
- Zhu, Z., Dhokia, V.G., Nassehi, A. ve Newman, S.T. (2013). A review of hybrid manufacturing processes-state of the art and future perspectives. *International Journal Computer Integrated Manufacturing*, 26(7), 596-615. Doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530>.



DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF A MULTIBLOCK STRUCTURED GRID SOLVER FOR 3D EULER/NAVIER-STOKES EQUATIONS

Defne KIRAN¹, Ali Ruhşen ÇETE²

¹Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Fakültesi,
Uçak Mühendisliği Bölümü, Ankara, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2654-9686>

²Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Ankara, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5877-4223>

Keywords

Euler solver, multiblock solver, LU-ADI

Abstract

A multiblock structured grid solver for 3D Euler/Navier-Stokes equations is developed in this study. The solver employs the finite difference method together with the lower-upper factored scheme to provide fast solutions, while the use of multiblock structured grids allows the algorithm to be applied to complex geometries.

The developed solver is then tested on a "body-only" axisymmetric model with a single-engine fighter aft-end which was previously investigated experimentally. The numerical results of the pressure distributions on the model's body obtained by the solver are compared to the experimental results. The numerical and experimental results were found to be in good agreement, indicating that the solver can sufficiently solve the flow equations, and represent the physical properties of the flow.

¹ Sorumlu yazar; e-posta: dkiran@thk.edu.tr
doi : [muhendismakina.1319195](https://doi.org/10.1501/1319195)

ÜÇ BOYUTLU EULER/NAVIER-STOKES DENKLEMLERİ İÇİN ÇOK BLOKLU YAPISAL AĞLI ÇÖZÜCÜ GELİŞTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI

Anahtar kelimeler

Öz

Euler çözücü, çok bloklu çözücü, yukarı-aşağı yaklaşık çarpanlarına ayırma

Bu çalışmada üç boyutlu Euler-Navier Stokes denklemleri için çok boyutlu yapısal ağı bir çözücü geliştirilmiştir. Çözücü, denklem çözümleri için sonlu farklar metodu ve yukarı-aşağı yaklaşık çarpanlarına ayırma algoritması kullanmaktadır. Çok bloklu yapısal ağ kullanımı ise algoritmanın kompleks geometriler için kullanımına olanak sağlamaktadır. Geliştirilen çözücünün doğruluğu, daha önce deneysel olarak test edilen tek motor arka gövde etkileşimi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen çözücünün kullanımıyla elde edilen sayısal veriler, deneysel verilerle uyumluluk gösterdiğinden, geliştirilen çözücünün akış fiziğini yeteri kadar temsil edebildiği gösterilmiştir.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 17.02.2023

Submission Date : 17.02.2023

Kabul Tarihi : 17.03.2023

Accepted Date : 17.03.2023

1. Introduction

The use of numerical methods in the solution of aerodynamic engineering problems provides great convenience when compared to experimental studies. It is not always feasible to reproduce an entire system to test in wind tunnels, and even so, experimental testing requires time and is a costly process. On the other hand, it is possible to quickly evaluate and apply the modifications proposed during the design process, using numerical methods. For this reason, numerical aerodynamic analyses gain great importance in the overall design process, from conceptual design to detailed design, and it is of great importance to develop a solver that can quickly and accurately model aerodynamic analyzes of complex geometric structures.

Solvers for three-dimensional (3D) Euler/Navier Stokes equations of compressible flows were developed in several different studies. The foundations on this subject were laid by the pioneering work of Pulliam and Steger (1980). They developed an implicit, finite difference method to solve compressible unsteady inviscid or thin-layered viscous 3D flows, which provided reasonably accurate solutions for simple aerodynamic configurations. Obayashi and Fujii (1985) successfully applied the lower-upper alternating-direction implicit (LU-ADI) factored scheme to solve the thin layer Navier-Stokes equations. Other studies applied these methods to multiblock structured grids (Leyland & Vos, 1995; Rizzi et al., 1993; Siclari et al., 1989; Yadlin & Caughey, 1991).

The use of multiblock structured grids in numerical analysis has many advantages. By decomposing the grids into a number of topologically simpler blocks, it is straightforward to conduct numerical analyses of complex geometries and flows (Blazek, 2005). Since each block can be solved independently of the others, the multi-block approach can easily be applied to parallel computing (Takaki et al., 2002). The computational time can be greatly reduced in this manner.

This study aims to develop a 3D multiblock Euler/Navier Stokes equations solver, using the finite difference method and lower-upper (LU) factored scheme, and to verify the accuracy of the solver by comparing it with the experimental data. A multiblock structured grid, consisting of two blocks, is used for the computational domain. The numerical results obtained by the solver are compared to Berrier's experimental work on AGARD AR-303 (Berrier, 1994). The pressure coefficients along the body of the model are considered for the comparison of the numerical and experimental data.

2. Formulation of the Numerical Method

The nondimensionalized form of the three-dimensional Navier-Stokes equations

for an unsteady compressible viscous flow in the curvilinear space (ξ, η, ζ, τ) can be written as

$$\partial_{\tau} q + \partial_{\xi} E + \partial_{\eta} F + \partial_{\zeta} G = k \partial_{\zeta} S / Re \tag{1}$$

where

$$q = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix}, \quad E = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho u U + \xi_x p \\ \rho v U + \xi_y p \\ \rho w U + \xi_z p \\ (e + p)U - \xi_t p \end{bmatrix}, \quad F = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ \rho w V + \eta_z p \\ (e + p)V - \eta_t p \end{bmatrix}, \quad G = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho u W + \zeta_x p \\ \rho v W + \zeta_y p \\ \rho w W + \zeta_z p \\ (e + p)W - \zeta_t p \end{bmatrix}$$

$$\hat{S} = J^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \mu(\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)u_{\zeta} + (\mu/3)(\zeta_x u_{\zeta} + \zeta_y v_{\zeta} + \zeta_z w_{\zeta})\zeta_x \\ \mu(\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)v_{\zeta} + (\mu/3)(\zeta_x u_{\zeta} + \zeta_y v_{\zeta} + \zeta_z w_{\zeta})\zeta_y \\ \mu(\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)w_{\zeta} + (\mu/3)(\zeta_x u_{\zeta} + \zeta_y v_{\zeta} + \zeta_z w_{\zeta})\zeta_z \\ \{(\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)[0.5\mu(u^2 + v^2 + z^2)_{\zeta} + \kappa Pr^{-1}(\gamma - 1)^{-1}(a^2)_{\zeta}] \\ + (\mu/3)(\zeta_x u + \zeta_y v + \zeta_z w) \times (\zeta_x u_{\zeta} + \zeta_y v_{\zeta} + \zeta_z w_{\zeta})\} \end{bmatrix} \tag{2}$$

and $k=0$ for inviscid flow, and $k=1$ for viscous flow. μ is the dynamic viscosity, and Re and Pr represent the Reynolds and Prandtl numbers, respectively. U, V and W terms in Eqs. 1 are defined as

$$U = \xi_t + \xi_x u + \xi_y v + \xi_z w$$

$$V = \eta_t + \eta_x u + \eta_y v + \eta_z w \tag{3}$$

$$W = \zeta_t + \zeta_x u + \zeta_y v + \zeta_z w$$

and the pressure term, p is defined as follows:

$$p = (\gamma - 1)[e - 0.5(u^2 + v^2 + w^2)] \tag{4}$$

where γ is the specific heat ratio of the ideal gas, and is equal to 1.4. The speed of sound term, a in Eq. 2 is expressed by using the ideal gas law, as follows:

$$a = \sqrt{\gamma p / \rho} \tag{5}$$

The metrics required to solve Eqs. 1 are as follows:

$$\xi_x = J(y_{\eta} z_{\zeta} - y_{\zeta} z_{\eta}) \quad \eta_x = J(z_{\xi} y_{\zeta} - y_{\zeta} z_{\xi})$$

$$\xi_y = J(z_{\eta} x_{\zeta} - z_{\zeta} x_{\eta}) \quad \eta_y = J(x_{\xi} z_{\zeta} - x_{\zeta} z_{\xi})$$

$$\xi_z = J(x_{\eta} y_{\zeta} - y_{\eta} x_{\zeta}) \quad \eta_z = J(y_{\xi} x_{\zeta} - x_{\xi} y_{\zeta})$$

$$\begin{aligned} \zeta_x &= J(y_\xi z_\eta - z_\xi y_\eta) & \xi_t &= -x_\tau \xi_x - y_\tau \xi_y - z_\tau \xi_z \\ \zeta_y &= J(x_\eta z_\xi - x_\xi z_\eta) & \eta_t &= -x_\tau \eta_x - y_\tau \eta_y - z_\tau \eta_z \\ \zeta_z &= J(x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta) & \xi_t &= -x_\tau \zeta_x - y_\tau \zeta_y - z_\tau \zeta_z \\ J^{-1} &= x_\xi y_\eta z_\zeta + x_\zeta y_\xi z_\eta + x_\eta y_\zeta z_\xi - x_\xi y_\zeta z_\eta - x_\eta y_\xi z_\zeta - x_\zeta y_\eta z_\xi \end{aligned}$$

The interior points are evaluated using the second-order central difference method, and the boundaries are evaluated using three-point one-sided formulas. The nondimensionalization of the Eqs. 1 is realized by the following terms:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_\infty}, \quad \bar{u} = \frac{u}{u_\infty}, \quad \bar{v} = \frac{v}{v_\infty}, \quad \bar{e} = \frac{e}{\rho_\infty a^2}, \quad \bar{p} = \frac{p}{\rho_\infty a^2}, \quad \bar{t} = \frac{ta}{l}, \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_\infty}, \quad Re = \frac{\rho_\infty l a_\infty}{\mu_\infty}$$

where the subscript ∞ corresponds to the freestream conditions and l corresponds to the reference length.

An implicit method is chosen to solve the Eqs. 1, since implicit methods can help to avoid the restrictive stability conditions of the time-step size when using small grid sizes. Applying this implicit method to Eqs. 1 yields:

$$\Delta \hat{Q}^n + h(\hat{E}_\xi^{n+1} + \hat{F}_\eta^{n+1} + \hat{G}_\zeta^{n+1} - Re^{-1} \hat{S}_\zeta^{n+1}) = 0 \tag{6}$$

where n corresponds to the time-step, and the first term on the left-hand side of the equation is expressed as follows:

$$\Delta \hat{Q}^n = \hat{Q}^{n+1} - \hat{Q}^n \tag{7}$$

and $\hat{Q}^n = \hat{Q}(n\Delta t)$.

The flux vectors, E,F,G, and S, which are the nonlinear functions of Q can be expressed using the Taylor expansion as follows:

$$\begin{aligned} \hat{E}^{n+1} &= \hat{E}^n + \hat{A}^n \Delta \hat{Q}^n + O(h^2) \\ \hat{F}^{n+1} &= \hat{F}^n + \hat{B}^n \Delta \hat{Q}^n + O(h^2) \\ \hat{G}^{n+1} &= \hat{G}^n + \hat{C}^n \Delta \hat{Q}^n + O(h^2) \\ Re^{-1} \hat{S}^{n+1} &= Re^{-1} [\hat{S}^n + J^{-1} \hat{M}^n \Delta \hat{Q}^n] + O(h^2) \end{aligned} \tag{8}$$

The delta-form is derived by substituting Eqs. 7 and 8 into Eq. 6, as follows:

$$[I + h\partial_\xi \hat{A}^n + h\partial_\eta \hat{B}^n + \partial_\zeta \hat{C}^n - Re^{-1} h J^{-1} \hat{M}^n] \Delta \hat{Q}^n = -h(\hat{E}_\xi^n + \hat{F}_\eta^n + \hat{G}_\zeta^n - Re^{-1} \partial_\zeta \hat{S}^n) \tag{9}$$

Spatial partial derivatives are discretized using second-order central-difference

method. In this way, the algorithm becomes second-order accurate in space, and first-order accurate in time. The solver developed in this study uses the implicit factorization method (Beam and Warming, 1976, 1978; Briley and McDonald, 1973; Lindemuth and Killeen, 1973; Pulliam and Steger, 1980) and the LU-ADI scheme (Beam and Warming, 1976, 1978; Obayashi and Fujii, 1985) to solve the Eq. 9. The stability problem arising from the non-linear terms is solved by adding artificial dissipation terms to the algorithm.

3. Grid Structure and Boundary Conditions

The numerical method developed in this study is tested by using the “body-only” axisymmetric model with a single-engine fighter aft-end with convergent divergent nozzles, as described by Berrier (1994). The planform view of the tested model can be seen in Figure 1.



Figure 1 Planform View of Model Configurations Tested (adapted from Berrier (1994)). Dimensions are in Fractions Of Body Length (L)

A semi-cylinder is used to model the flow around the model. The length of the model is taken as $1.0L$, and the semi-cylinder is $5.0L$ in length and $4.0L$ in diameter. Even though the geometry of the model is simple, the flow has complex characteristics, especially in the exhaust region. That is why, this region is meshed using different blocks. Figure 2 shows the multiblock structured grid used in this study. The multiblock structured grid consists of a block named as 2nd Block, and shown with green lines, and another block, named as 1st Block, shown with red lines in Figure 2. The 2nd block starts as in the form of an O-grid structure around a single axis at the inlet, at $x = -1L$, passing around the body, which is placed along the axis of the cylinder at $x = 0$, and continuing till the outlet ($x = 4L$). The 1st Block rotates around a single line, at the exhaust region, starting at the tail of the model and continuing till the outlet. The grids at points very close to the model's boundaries have fine mesh size, while the grid size increases towards the outer boundaries.

Next, the boundary conditions are defined for the multiblock structured grid. It is very important to define the boundary conditions correctly, and to provide relevant information at each block's boundaries. The boundary conditions for this

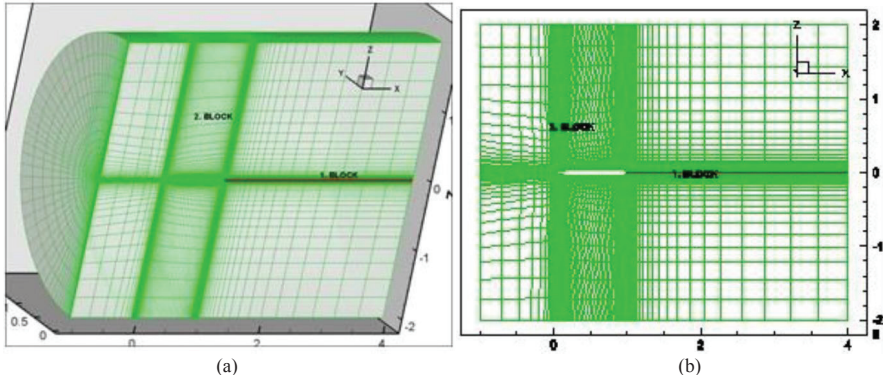


Figure 2. Grid Structure Used for the Computational Domain in a 3D view (a) and an Orthographic View at the Plane, $y = 0$ (b)

study are based on the experimental study of Berrier (1994), since the results of this numerical simulation are compared to the experimental results of that study. In his experiments, Berrier (1994) uses jet-exhaust total pressures (p_e), which are nondimensionalized by the static pressure of the free stream ($p_{0,\infty}$). Values of velocity, density, and energy at the boundaries are set using these pressure ratios, assuming the flow is isentropic. For an isentropic flow, the Mach number (M) is calculated as follows:

$$M = \sqrt{\left\{ \left(\frac{P_e}{P_{0,\infty}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\} \frac{2}{\gamma-1}} \tag{10}$$

Using Eq. 10, the velocity at the inlet boundary is set, and the density and pressure are set from the following equations:

$$\rho / \rho_\infty = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_\infty^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} / \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{11}$$

$$\frac{P_e}{P_\infty} = \frac{P_e}{P_{0,\infty}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_\infty^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{12}$$

In this study, the Mach number at the inlet ($x = -L$) is taken as 0.9, outlet boundary is defined as a pressure outlet, and the pressure ratio of jet exhaust to outlet boundary is taken as 2.0. The plane at $y = 0$ is defined as symmetry boundary condition. Research and publication ethics were adhered to in this study.

4. Results and Discussion

Figure 3a shows the pressure distribution in terms of pressure coefficient, c_p , over the body and the symmetry plane at $y = 0$. Figure 3b shows a close-up image of the pressure distribution, around the exhaust region, where the flow is expected to be complex.

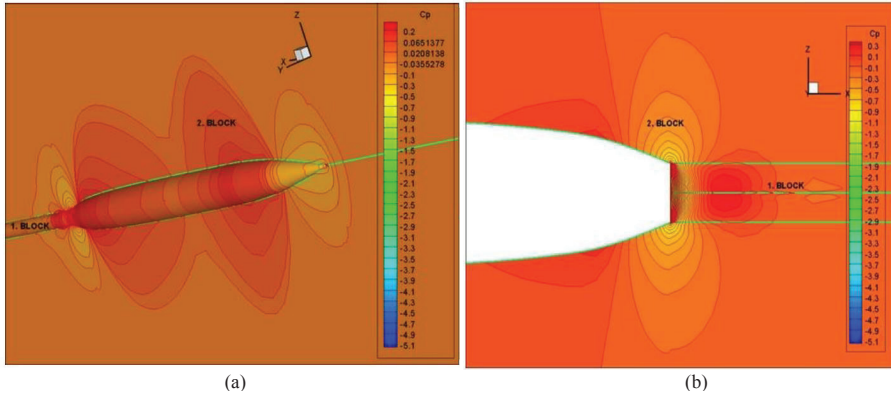


Figure 3. Pressure Distribution in Terms of Pressure Coefficient c_p Over the Body and at the Symmetry Plane at $y = 0$ (a), and Around the Exhaust Region at $y = 0$ (b)

Figure 4 shows the comparison of the numerical data and experimental data of pressure coefficients on the body of axisymmetric single-engine fighter. Horizontal axis shows the axial distance downstream from the nose (x), nondimensional

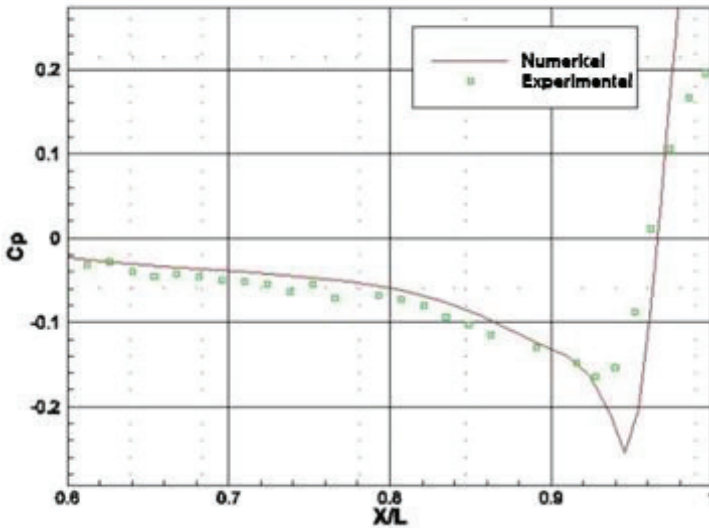


Figure 4. Numerical and Experimental Data of Pressure Coefficients (c_p) Along the Body of Axisymmetric Single-Engine Fighter

lized by the model length (L), and the vertical axis shows the pressure coefficients (c_p). The figure shows that the numerical results, obtained by the solver developed in this study, is in agreement with the experimental results. This shows that the 3D solver developed in this study can sufficiently represent the flow around the tested model.

5. Conclusion

In this study, a multiblock structured grid solver for 3D Euler/Navier-Stokes equations was developed. The solver uses the finite difference method together with LU scheme, which gives fast solutions, while the applicability of the multiblock structured grids allows the algorithm to be used for complex geometries.

The developed solver was then tested on a “body-only” axisymmetric model with a single-engine fighter aft-end with convergent divergent nozzles. This model was previously investigated experimentally by Berrier (1994). The numerical results of the pressure distributions on the body of the model, were compared to the experimental results. The numerical and the experimental results were found to be in agreement with each other, showing that the solver can sufficiently solve the equations of the flow, and can represent the flow physics.

References

- Beam, R. M., Warming, R. F. (1976). An Implicit Finite-difference Algorithm for Hyperbolic Systems in Conservation-law Form. *Journal of Computational Physics*, 22(1), 87–110. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(76\)90110-8](https://doi.org/10.1016/0021-9991(76)90110-8)
- Beam, R. M., Warming, R. F. (1978). An Implicit Factored Scheme for the Compressible Navier-Stokes Equations. *AIAA Journal*, 16(4), 393–402. <https://doi.org/10.2514/3.60901>
- Berrier, B. L. (1994). Single-Engine Tail Interference Model. In *A Selection of Experimental Test Cases for the Validation of CFD Codes* (Vol. 2, Issue 303, pp. 452–475). NTRS-NASA.
- Blazek, J. (2005). Introduction. In *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications* (pp. 1–4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044506-9/50003-5>
- Briley, W. R., McDonald, H. (1977). Solution of the Multidimensional Compressible Navier-Stokes Equations by a Generalized Implicit Method. *Journal of Computational Physics*, 24, 312–397.
- Leyland, P., Vos, J. B. (1995). NSMB: A Modular Navier-Stokes Multiblock Code for CFD. *33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibition*. <https://doi.org/10.2514/6.1995-568>

- Lindemuth, I., Killeen, J. (1973). Alternating Direction Implicit Techniques for Two-dimensional Magnetohydrodynamic Calculations. *Journal of Computational Physics*, 13(2), 181–208. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(73\)90022-3](https://doi.org/10.1016/0021-9991(73)90022-3)
- Obayashi, S., Fujii, K. (1985). Computation of Three-Dimensional Viscous Transonic Flows with the LU Factored Scheme. *7th Computational Physics Conference*, 192–202.
- Pulliam, T. H., Steger, J. L. (1980). Implicit Finite-Difference Simulations of Three-Dimensional Compressible Flow. *AIAA Journal*, 18(2), 159–167. <https://doi.org/10.2514/3.50745>
- Rizzi, A., Eliasson, P., Ingemar Lindblad, I., Charles Hirsch, I., Lacor, C., and Haeuser, J. (1993). The Engineering of Multiblock/Multigrid Software for Navier-Stokes Flows on Structured Meshes. *Computers Fluids*, 22(3), 341–367.
- Sıcları, M., Delgüdice, P., and Jameson, A. (1989). A Multigrid Finite Volume Method for Solving the Euler and Navier-Stokes Equations for High Speed Flows. *27th Aerospace Sciences Meeting*. <https://doi.org/10.2514/6.1989-283>
- Takaki, R., Makida, M., Yamamoto, K., Yamane, T., Enomoto, S., Yamazaki, H., Iwamiya, T., and Nakamura, T. (2002). Current Status of CFD Platform - UPACS -. In P. Wilders, A. Ecer, N. Satofuka, J. Periaux, & P. Fox (Eds.), *Parallel Computational Fluid Dynamics 2001* (pp. 339–346). North-Holland. <https://doi.org/10.1016/B978-044450672-6/50094-3>
- Yadlin, Y., Caughey, D. A. (1991). Block Multigrid Implicit Solution of the Euler Equations of Compressible Fluid Flow. *AIAA Journal*, 29(5), 712–719. <https://doi.org/10.2514/3.10645>

ARAşTIRMA MAKALELERİ

Research Articles

- Eskişehir İlinde Karayolu Taşımacılığında Yakıt Tüketiminden Kaynaklanan CO₂ Emisyonlarının Tier 1 Yöntemine Göre Tespiti ve Değerlendirilmesi
Determination and Evaluation of CO₂ Emissions From Fuel Consumption In Road Transportation In Eskişehir According To Tier 1 Method
Çisil TİMURALP 194-210
- AA5754-H22 VE AA2024-T3 Levhaların Zn Ara Tabaka Kullanarak Sürtünme Karştırma Ekstrüzyon Lehinlerle Yöntemiyle Birleştirilmesi
Joining AA5754-H22 and AA2024-T3 Plates By Friction Stir Extrusion Brazing Method Using Zn İnter
Neslişah KURNAZ, Berna SALVAZLIOĞLU, Yahya BOZKURT 211-227
- Tersanelerde İş Sağlığı ve Güvenliğinin Göstergeler Üzerinden İrdelenmesi
Examination of Occupational Health and Safety in Shipyards Based on İndicators
Tuncay AYVAZ, Osman Alpaslan ERĐÖR 259-296
- Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri
Renewable Energy Status and Installation Costs in The World and Turkey
Seyda ÖZBEKTAŞ, Mahmut Can ŞENEL, Bilal SUNGUR 317-351
- Makine İmalat Teknolojileri ve Eklmeli İmalat Literatürünün Görselleştirilmesine Dair Bibliyometrik Bir Analiz
A Bibliometric Analysis to Visualization of Machine Manufacturing Technologies and Additive Manufacturing Literature
Sabiha KILIÇ 352-385
- Development and Verification of A Multiblock Structured Grid Solver For 3D Euler/Navier-Stokes Equations
Üç Boyutlu Euler/Navier-Stokes Denklemleri İçin Çok Bloklu Yapısal Ağlı Çözücü Geliştirilmesi ve Doğrulanması
Defne KIRAN, Ali Ruřen ÇETE 386-395

DERLEME MAKALELERİ

Review Articles

- A Review On Laboratory Scale Machines Supporting R&D Studies Used İn Filament Yarn Technology
Filament İplik Teknolojisinde Kullanılan ve Ar-Ge Çalışmalarını Destekleyen Laboratuvar Ölçekli Makinalar Üzerine Bir İnceleme
Selcen ÖZKAN HACIOĞULLARI, Osman BABAARSLAN 228-258
- Floropolimerlerin Geri Dönüşürnü ve Sızdırmazlık Sektöründeki Uygulama Alanları
Recycling of Fluoropolymers and Applications in The Sealing İndustry
Ezgi ÖZGÜNERGE FALAY, Burcu ÇALIŞKANELLİ, Öz Erman ARUSAN, Lütfiye ALTAY, Mehmet SARIKANAT 297-316