

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402 E-ISSN 2667-7520



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendismakina



Cilt/Vol 65 Sayı/No 714
Ocak-Mart / January-March 2024



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



Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

YIL/YEAR : 2024

CİLT/VOLUME : 65

SAYI/ ISSUE : 714



İMTİYAZ SAHİBİ / PRIVILEGE OWNER

Yunus YENER

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI / UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS

SORUMLU YAZI İŞLERİ MÜDÜRÜ / PRODUCTION DIRECTOR

Yunus YENER

EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University

EDİTÖR YARDIMCILARI / ASSOCIATE EDITORS

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

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

ALAN EDİTÖRLERİ / AREA EDITORS

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

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

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

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

YAYIN SEKRETERİ / EDITORIAL SECRETARY

Ceren YILMAZ ARAS

KAPAK VE SAYFA TASARIMI/ COVER AND PAGE DESIGN

Muazzez POLAT

TEKNİK SORUMLU / TECHNICAL ASSISTANT

Mehmet AYDIN

BASKI/PRINTED BY

Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.

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

Tel: (0312) 394 54 94

BASKI SAYISI / CIRCULATION

1000

BASKI TARİHİ / PUBLISHING DATE

29 Mart 2024



YAYIN KURULU / EDITORIAL BOARD

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

EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

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



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

Dergimizin yer aldığı veritabanları



İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

- | | Sayfalar |
|---|----------|
| Ticari Bir Soğutucuda Ürün Sıcaklık Sınıflarının Enerji Tüketimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi
Experimental Investigation of the Effect of Product Temperature Classes on Energy Consumption in A Closed Display Refrigerator
F. Mertkan ARSLAN, Hüseyin GÜNERHAN, Hakan TAVUKCU, Binnur SOYSAL, Sertan AKSOY, Bora DEVRİM | 27-48 |
| Comparison of Machinability of Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC For Multi-Layer Coated Insert: Validated Fem and Statistical Approaches
Al-4.5%Cu/TiB ₂ /3p MMC'nin Çok Katmanlı Kaplamalı Kesici Takımlarla İşlenebilirliğinin Karşılaştırılması: Doğrulanmış Fem ve İstatistiksel Yaklaşımlar
Erkan ÖZTÜRK | 49-77 |
| Tel Örgü Katmanlarının Faz Değiştiren Malzeme Üzerindeki Isıl Performansı Etkisinin Deneysel İncelenmesi
Experimental Investigation of the Thermal Performance Effect of Wire Mesh Layers on Phase Change Material
Mustafa Yasin GÖKASLAN | 78-100 |
| Evaluation of the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Designed in Different Sizes
Farklı Ebatlarda Tasarlanan Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi Performanslarının Değerlendirilmesi
Adem YILMAZ, Sinan ÜNVAR, Bünyamin AYGÜN | 101-120 |
| LPG Yakıtlı Buji Ateşlemeli Motorlarda Strok/Çap Oranı Etkilerinin Ekserji Analiziyle İncelenmesi
Investigation of Stroke/Bore Ratio Effects in LPG Fuelled Spark Ignition Engines Via Exergy Analysis
İsmet SEZER | 121-145 |
| Ploughshares Material Selection: Shannon's Entropy Based Fuzzy Topsis Application
Pulluk Uç Demiri Malzeme Seçimi: Shannon Entropi Temelli Bulanık Topsis Uygulaması
Ahmet Bilal ŞENGÜL | 177-197 |

Derleme Makaleleri / Review Articles

- | | Sayfalar |
|--|----------|
| Geleceğin Enerji Depolama Teknolojileri, Sürdürülebilirlik ve Enerji Dönüşümü
Future Energy Storage Technologies, Sustainability and Energy Conversion
Edip TAŞKESEN, Hamza ALAHMAD, Elif Nur BİLEN | 1-26 |
| Tedarik Zincirinde Direnç Konulu Literatürün Bibliyometrik Analizi
Bibliometric Review of Resilience in Supply Chain Literature
Batuhan KOCAOĞLU, Utkan ULUÇAY | 146-176 |



GELECEĞİN ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

Edip TAŞKESEN^{1*}, Hamza ALAHMAD², Elif Nur BİLEN³

¹ Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü,
Merkez/Şırnak, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-3052-9883>

² Şırnak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojileri, A.B.D,
Merkez/Şırnak, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-6261-3449>

³ Şırnak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojileri A.B.D,
Merkez/Şırnak ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7385-3704>

Anahtar kelimeler

Öz

Enerji, enerji depolama teknolojileri, piller, mekaniksel enerji depolama, elektrokimyasal enerji depolama

Ülkemizde petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması, çevresel ve sosyal kısıtlamalar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Sanayi ve teknoloji geliştikçe modern yaşamın sürdürülebilirliğini ve üretimin sürekliliğini sağlamak için enerji sürekliliği çok önemli olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılırken, enerji üretim kesintilerinin en aza indirilmesinde ve bu sistemlerin dağıtımında depolama teknolojileri çok önemli bir rol oynamaktadır. Enerji, ısıma enerjisi, kimyasal enerji, yerçekimi potansiyel enerjisi, elektrik potansiyel enerjisi, elektrik enerjisi, termal enerji, gizli ısı enerjisi ve kinetik enerji dahil olmak üzere birçok biçimde görünmektedir. Enerji depolamanın amacı, istenildiği zaman ve istenildiği yerde kullanılmaya hazır olmasıdır. Enerji depolama, enerjiyi depolaması zor olan formlardan depolaması daha kolay veya daha ucuz olan formlara dönüştürmeyi içermektedir. Enerji depolama ile gün boyunca farklı enerji gereksinimlerine hızlı ve güvenilir bir şekilde tepki vermesi sağlanılmaktadır. Enerji depolama teknolojisi; güç sistemlerini iyileştirmesi, yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlaması ve petrol bazlı yakıtlara alternatif sunması nedeniyle büyük potansiyele sahip bir teknolojidir. Enerjinin bir çok farklı depolama yöntemleri bulunmaktadır. Enerji çok değişik formlarda depolama yöntemleri vardır. Örneğin biyolojik depolama, kimyasal depolama, ısı depolama, elektriksel depolama, potansiyel enerji, yerçekimi potansiyel enerjisi, kinetik enerji vb. bu çalışmada bunlardan başlıca enerji depolama yöntemleri olan kimyasal, mekaniksel, elektrokimyasal, ısı ve elektriksel enerji depolama yöntemleri ele alınmıştır. Bu çalışmanın daha önce yapılmış çalışmalar ve standartlar açısından, literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak yapılan araştırma neticesinde en yaygın olarak elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri kullanıldığı görülmüştür.

* edip.taskesen@sirnak.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1260357

FUTURE ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES, SUSTAINABILITY AND ENERGY CONVERSION

Keywords

Energy, Energy Storage Technologies, Batteries, Mechanical Energy Storage, Electrochemical Energy Storage

Abstract

In our country, the limited reserves of fossil fuels such as oil, coal and natural gas, and environmental and social restrictions have increased the orientation to renewable energy sources. As industry and technology develop, energy continuity becomes very important to ensure the sustainability of modern life and the continuity of production. When using renewable energy sources, storage technologies play a very important role in minimizing power generation interruptions and in the distribution of these systems. Energy appears in many forms, including radiative energy, chemical energy, gravitational potential energy, electrical potential energy, electrical energy, thermal energy, latent heat energy, and kinetic energy. The purpose of energy storage should be ready to be used whenever and wherever desired. Energy storage involves converting energy from forms that are difficult to store to forms that are easier or cheaper to store. Energy storage ensures that it responds quickly and reliably to different energy requirements throughout the day. Energy storage technology; It is a technology with great potential as it improves power systems, contributes to renewable energy production and offers an alternative to petroleum-based fuels. There are many different storage methods of energy. There are many different forms of energy storage methods. For example, biological storage, chemical storage, thermal storage, electrical storage, potential energy, gravitational potential energy, kinetic energy etc. In this study, chemical, mechanical, electrochemical, thermal and electrical energy storage methods, which are the main energy storage methods, are discussed. It is thought that this study will contribute to the literature in terms of previous studies and standards. As a result of the research, it has been seen that electrochemical energy storage technologies are most commonly used.

Derleme Makalesi

Başvuru Tarihi : 05.03.2023

Kabul Tarihi : 25.09.2023

Review Article

Submission Date : 05.03.2023

Accepted Date : 25.09.2023

Extended Abstract

Introduction/ Background

In this study, we provide an overview of current energy storage technologies. By classifying energy storage technologies, the working principles and features of each technology are explained. Verimli enerji depolama, mevcut enerji altyapısında büyük ölçekte uygulanırsa, enerji endüstrisinde on yıllardır görülen en büyük değişikliklerden bazılarını beraberinde getirebilir. By enabling intermittent sources of energy, wind and solar could make their debut en masse, filling fields with wind turbines and deserts with solar arrays. By adding more renewable energy sources to the power mix, there is greater potential for decreases in harmful emissions. Additionally, energy storage would improve the reliability and dynamic stability of the power system by providing stable, abundant energy reserves that require little ramp time and are less susceptible to varying fuel prices or shortages. Energy storage can shift the higher peak load to off-peak hours in order to level the generation requirement, allowing generators to run more efficiently at a stable power level, potentially decreasing the average cost of electricity. Additionally, increased energy storage capacity can defer or avoid generation capacity increases, decrease transmission congestion (and thereby transmission losses), and help enable distributed generation such as residential solar and wind systems. Energy storage technology; It is a technology with great potential as it can improve electrical power systems, contribute to renewable energy production and offer an alternative to petroleum-derived fuels. In this study; chemical, electrical, electrochemical, mechanical and thermal energy storage systems were discussed and information was given about their structures and working principles.

Objectives/ Research Purpose

The aim of this study is to classify the types of energy storage technologies and to deal with these technologies. Providing a detailed overview of how each of the energy storage devices works so the reader can get a better idea of the potential benefits and drawbacks of each device.

Methods/ Methodology

In this section, energy storage technologies are introduced by classifying, and the working principles of these technologies are examined one by one by classifying them. Energy storage techniques can be used in a variety of applications. In energy storage systems, the form of energy converted largely determines the classification. Energy storage techniques can be divided into 5 main parts; chemical, electrochemical, electrical, mechanical and thermal storage. Energy storage systems have become more imperative than ever, due to supply-demand imbalance. But storage requires very difficult and costly equipment. The stored energy must be replaced before it is completely depleted. In order not to experience complete exhaustion, the probabilities must be calculated very well and an appropriate system must be designed by taking into account the interruption times, the instantaneous increase and decrease in demand. However, in this way, activities can be continued without interruption. Electrical energy can be stored in a variety of ways. These; chemical, electrochemical,

electrical, mechanical and thermal systems. Among these methods, thermal energy storage systems with mechanical pumps and hydro storage systems have emerged and it has been predicted that they can be extensively researched and easily applied.

Results/Findings

An energy storage system would enable smart grid concepts, one of the driving technologies of the future. Acquiring energy storage systems that eliminate fluctuations associated with energy productions can facilitate the growth of energy impacts. It can support the energy storage system systems reliability and additionally offer some auxiliary setup such as load monitoring, spin reserve, black start feature. Also, energy storage systems can be taken to eliminate peak loads, thereby throttling generator failures. The amount of energy stored can play an important role in compensating for the peak load. The capacity factor of base generation capacities can be increased in this way, also a positive factor for low-priced stored energy use. Energy storage systems seem to be locked in to adapt to the operation of new technologies, consumer services, operation and rotational systems of electricity generation and distribution systems over the past year. It can also provide many configurations such as display in network performance, fast response, upload matching capability. Important problems of energy houses such as sustainability and environmental protection lead us to diversify energy use and increase energy consumption in the future. Variations in energy/electricity generation quantities from renewable short-term sources and their long-term fluctuations require some critical measurements. Therefore, energy storage becomes significantly important for screens to which the electrical grid system responds because of easy manageability, controllability, predictability and execution. It is a research subject that cultivates batteries and energy storage systems that have taken their place in all areas of our lives, and is responsible for the areas most open to development.

Discussion and Conclusions

This study provides an overview of current energy storage technologies, categorizing them into chemical, electrochemical, electrical, mechanical, and thermal storage systems. These technologies have the potential to bring significant changes to the energy infrastructure and contribute to sustainable energy production. Energy storage systems, when integrated into the power grid, enable the concept of a smart grid, reducing energy fluctuations, facilitating the integration of renewable energy, and offering solutions for environmental sustainability.

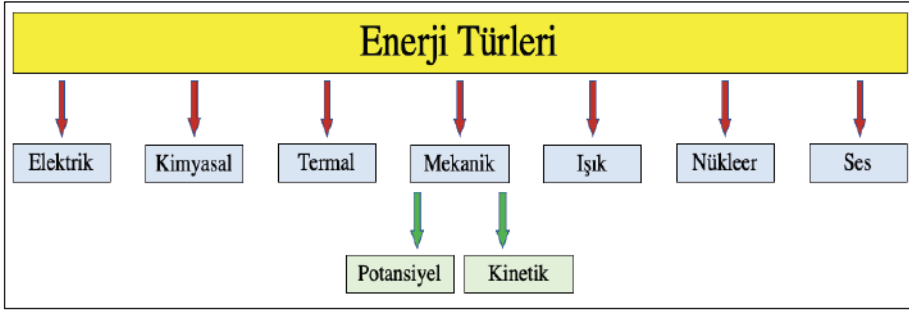
Among the various methods explored, electrochemical energy storage technologies emerged as the most commonly utilized in the research. These findings highlight the potential of energy storage technologies to play a crucial role in future energy transformation and sustainability efforts. The study suggests that these technologies can address challenges associated with energy reliability and environmental impact, positioning them as key players in the ongoing transition to a more sustainable energy landscape.

1. Giriş

Enerji, soyut bir varlık olarak kabul edilen ve yalnızca biçimlerini ve dönüşümlerini gözlemleyerek anlaşılabilen bir kavramdır. Bu kavramın çeşitli tanımları bulunmakta ve farklı perspektiflerden ele alınmaktadır (Karakoç ve diğ. 2012; Mehling, 2017). Bunlar;

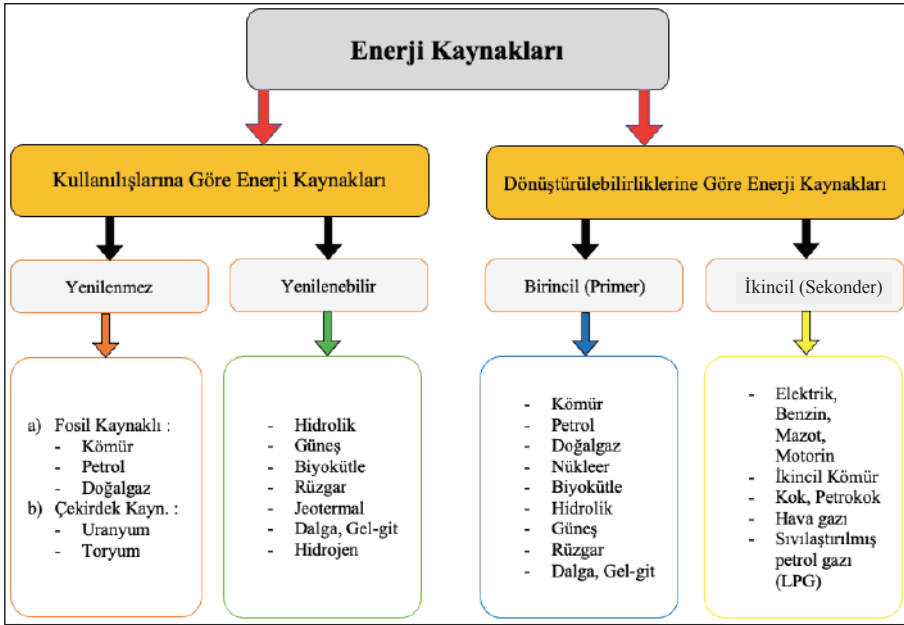
- Maddenin veya cismin iş yapabilme yeteneği,
- Bir sistemin harici bir aktivite veya aktivite üretme yeteneği (Max Planck),
- Bir atomun çekirdeğinde bir proton ve bir nötron arasında ısı, mekanik hareket veya bağlanma enerjisi şeklinde ortaya çıkan fiziksel niceliktir.

Enerji farklı formlarda bulunur (kimyasal, mekanik, termal, elektrik vb.) Şekil 1, enerjinin genel türlerini göstermektedir (Elektrik Rehberiniz, 2013; Vikipedi, 2022).



Şekil 1. Enerji Türleri (Vikipedi, 2022)

Enerji kaynakları dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil (primer) enerji ve ikincil enerji kaynakları olarak iki türden oluşmaktadır. Birincil enerji, herhangi bir değişme ve dönüşüme uğramayan bir enerji şeklidir. Birincil enerji kavramı, yenilenemeyen enerji ve yenilenebilir enerjiyi içerir ve kaynakları şöyle sıralanabilir: kömür, petrol, doğal gaz, hidro, nükleer enerji, dalga enerjisi, biyokütle, güneş ve rüzgardır. İkincil enerji ise, enerjinin doğadaki halinin (Birincil enerji) çeşitli enerji santralleri veya teknolojilerle dönüştürülerek elde edilen enerjidir. İkincil enerji kaynakları ise; benzin, elektrik, motorin, kok kömürü, petrokok, ikincil kömür, hava gazı ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi enerji kaynaklarıdır. Şekil 2’de enerji kaynaklarının genel sınıflandırması göstermektedir (Şenel ve Koç 2013; Yağlı ve diğ. 2018).

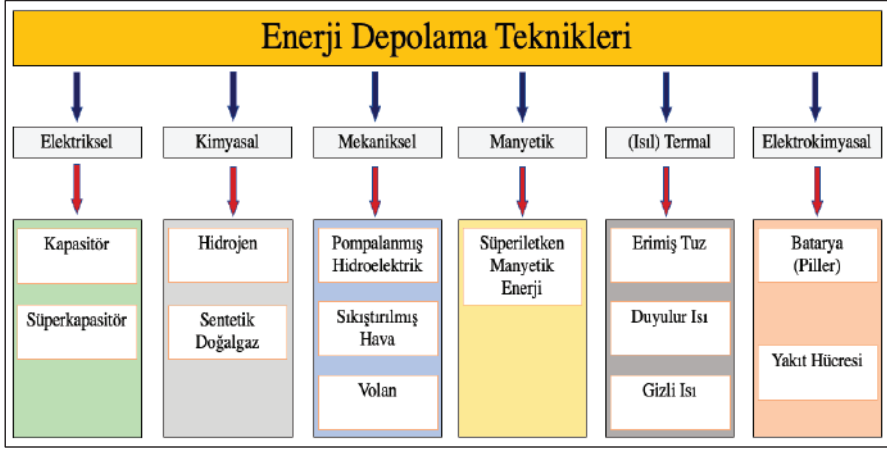


Şekil 2. Enerji Kaynaklarının Genel Sınıflandırması (Yağlı ve diğ. 2018)

Günümüzde insanlar gıda, temiz su, ulaşım, ısınma ve soğutma gibi temel ihtiyaçlarını karşılamak için farklı enerji türlerine ihtiyaç duymaktadır. Birleşmiş Milletler (BM) tahminlerine göre dünya nüfusu 2040 yılında 9,2 milyara ulaşacaktır. Bu durum, 1,9 milyar insana daha enerji sağlamamız gerektiği anlamına gelmektedir (İnan, Akbulut, ve Aslan, 2018; Worldometer, 2022).

Enerji depolama; bir tür enerjinin daha sonra yeniden kullanılmak üzere başka bir türe veya aynı türe depolanması olarak tanımlanan ve aşılması gereken önemli bir sorundur. Enerji depolama fikri uzun yıllara dayanmaktadır. Enerji depolama, maliyetli yükseltmelerden kaçınırken mevcut enerji üretim ve iletim altyapısını optimize etmektedir. Enerji depolama teknolojisinde kullanılan cihazlar, yenilenebilir enerji kaynaklarından meydana gelen büyük güç dalgalanmalarının şebeke üstündeki etkilerini önleyebilmektedir. Bu nedenle, enerji depolama teknolojisi güç kalitesini ve şebeke güvenilirliğini artırabilmektedir (Dānilā ve Lucache 2010; Emeksiz ve Kara 2022; Lott ve diğ. 2014; Özdoğan 2010; Reddy ve diğ. 2020).

Genel enerji depolama teknikleri. Kimyasal, elektrokimyasal, elektrik, mekanik, termal ve manyetik enerji depolama teknikleri olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmanın detayları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Enerji Depolama Tekniklerinin Sınıflandırılması (Lott ve diğ. 2014)

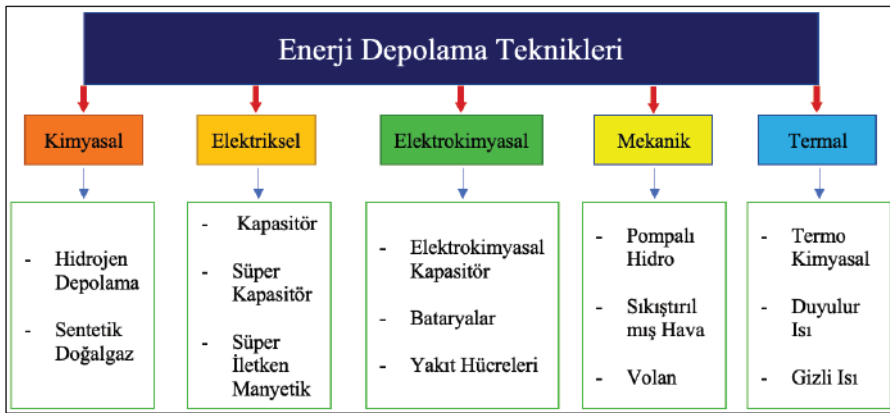
Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostudur, bu nedenle enerji üretiminde kullanımları sera gazı emisyonlarını azaltabilir. Dolayısıyla, enerji depolama teknolojisine duyulan ihtiyaç tamamen yenilenebilir enerjiye geçiş, modern enerji sistemleri için arz güvenliği ve istikrarının sağlanması, üretim sırasında enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmak, maliyetlerin en aza indirilmesi ve enerjinin iletimi ve dağıtım sorunları azaltmasında enerji depolama teknolojisine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, tüketicilerin enerji ihtiyaçlarını her koşulda başarılı bir şekilde karşılayabilmek için enerji depolama teknolojisi büyük önem taşımaktadır (Hadjipaschalis, Poullikkas, ve Efthimiou, 2009; Sarı, 2011; Whittingham, 2012).

Enerji depolama teknolojisinin avantajları ve hem de dezavantajları bulunmaktadır. Enerji depolaması, şarj/deşarj, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, maliyet, yanıt süresi ve kullanım ömrü gibi çeşitli sorunlar nedeniyle zorluklarla karşı karşıya bulunmaktadır (Lelebicioğlu, 2020). Bu çalışmanın amacı, temel enerji depolama sistemlerini incelemek ve bu teknolojilerin çalışma prensipleri incelenmiştir.

2. Enerji Depolama Teknolojileri (EDT)

Enerji tüketildiğinde, bir enerji türünden diğer bir enerji türüne dönüşmektedir. Enerji depolama teknolojileri, enerjinin daha sonra kullanılabilmesi için depolandığı ve sistemlerdir. Bu teknolojiler, enerjinin çeşitli kaynaklardan üretildiği farklı zamanlarda kullanılabilmesini sağlar. Enerji depolamasında, enerjiyi herhangi bir zamanda kullanılabilir şekilde hazırda olması beklenmektedir (Çaliker ve Özdemir, 2013).

Enerji birçok farklı biçimde depolanabilmektedir; mekanik, kimyasal, elektriksel, elektrokimyasal ve termal depolanma çeşitleridir. Şekil 4'te yaygın olarak kullanılan enerji depolama teknolojileri enerji formuna göre gruplandırılmıştır. Burada verilen sınıflandırmalardan farklı olarak enerji girdisi (elektrik, mekanik veya termik), enerji çıkışı (ısı enerjisi, sıvı-yakıt veya gaz-yakıt) veya enerji dönüşüm süreci (güç-güç, güç-gaza, güç-sıvı ve güç-ısı) tip sınıflandırması da mümkündür. Uygulama şekline, gerekli gereksinimlere ve ekonomik koşullara bağlı olarak farklı depolama alternatifleri bulunmaktadır (Mazman, 2018; Mazman ve Yılmaz, 2019; Sara Enerji, 2021; TÜBA, 2020). Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Şekil 4. Kullanılan Enerji Depolama Teknolojileri (Mazman ve Yılmaz, 2019)

2.1 Mekaniksel EDT

Bir malzeme sistemine kuvvet uygulamak ve bu kuvvet tarafından üretilen enerjiyi depolamak için kullanılabilir iki temel sistem vardır. Birincisi potansiyel enerjideki değişimlerle, ikincisi ise kinetik enerji olarak bilinen bir kütlenin hareketiyle üretilen enerjiyle ilgilidir. Bu iki enerji birbirine veya ısıya veya elektriğe dönüştürülebilir (Falk, Herrmann, ve Schmid, 1983; Landry ve Gagnon, 2015).

2.1.1 Volan

Basit bir volan kullanımı, yüzyıllardır uygulanan kinetik enerjiyi depolamanın bilinen en eski yöntemlerindedir. Bir volan, yükü dengelemek için yük talebinin arttığı dönemlerde bu enerjiyi yüke aktarmakta ve yükün titreştiği yüksek tahrik kuvveti dönemlerinde mekanik bir sistemdeki fazla enerjiyi yakalamaktadır. Bu, özellikle doğrusal hareketin dönme hareketine dönüştürüldüğü mekanik tahrik sistemleri için ideal çözümdür. Bir volan, mekanik bir pil görevi görmektedir.

Yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin ve düşük kayıplı yatakların geliştirilmesi nedeniyle günümüzde önemli bir teknoloji haline gelmiştir (Bolund, Bernhoff, ve Leijon, 2007; Yavuz, 2011).

Volan çalışma sistemi, hızlı dönen bir rotorun ataletini depolamaktadır. Sistemden enerji çekildikçe, enerjinin korunumu yasasına göre yavaşlamaktadır. Tersine, sistem uyarıldığında hız artmaktadır. Dönme hızı yaklaşık 75.000 rpm'ye ulaşmaktadır (Willis ve Scott, 2018).

Volan çarkı çelikten ziyade kompozitten, kompozit dönme kuvvetlerinde karşı daha dirençlidir. Volan, hava direncini indirmek için boşaltılmış bir vakum ortamında kapalı bir alanda bulunmaktadır. Volana gömülü mıknatıslar, dönüş sırasında bobin üzerinde uçmaktadır. Volan üzerindeki bu mıknatıslar, dönerken bobinde bir voltaj indüklemektedir. Bu, volanın dönme enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir (Bryan ve Andrews, 2004). Tablo 1'de Volan enerji depolama yöntemlerinin teknik özellikleri gösterilmiştir.

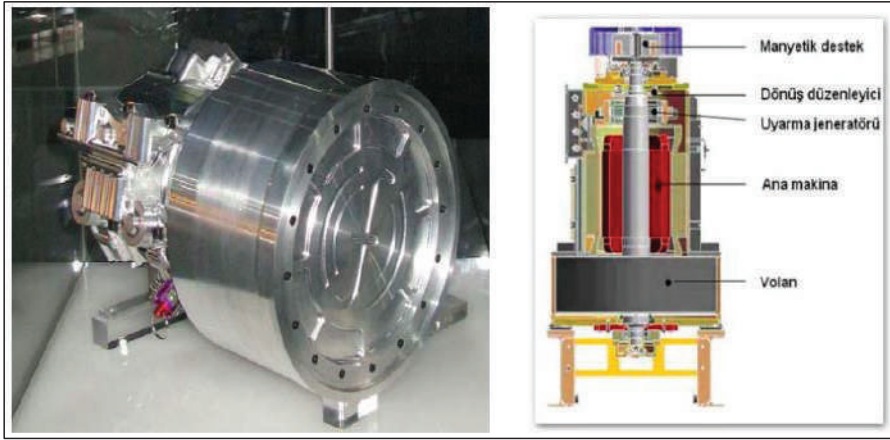
Tablo 1. Volanın Depolama Teknik Özellikleri (Açıkgöz, 2019)

Birim Hacimdeki Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	20 –80
Güç Kapasitesi (MW)	0.1 – 20
Kalıcı Enerji Depolama Süresi*	saniye – dakika
Ömrü (Yıl)	15 – 20
Deşarj Süresi*	1 saniye – 15 dakika
Döngü Sayısı (Döngü)	~20000 – 10000000
Verimliliği (%)	~89 – 95
Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS)	Yeni Ticarileşmiş/Uygulanamaz

Volanda depolanan enerji denklem (1) ile ifade edilir.

$$J = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (1)$$

Denklemde J: Enerji (J veya Wh), I: Atalet momenti (kg.m²) ve ω : Açısal hız (rad/s)'dir (Sahay & Dwivedi, 2009). Gelişmiş yüksek hızlı volan sistemi Şekil 5'te gösterilmektedir.

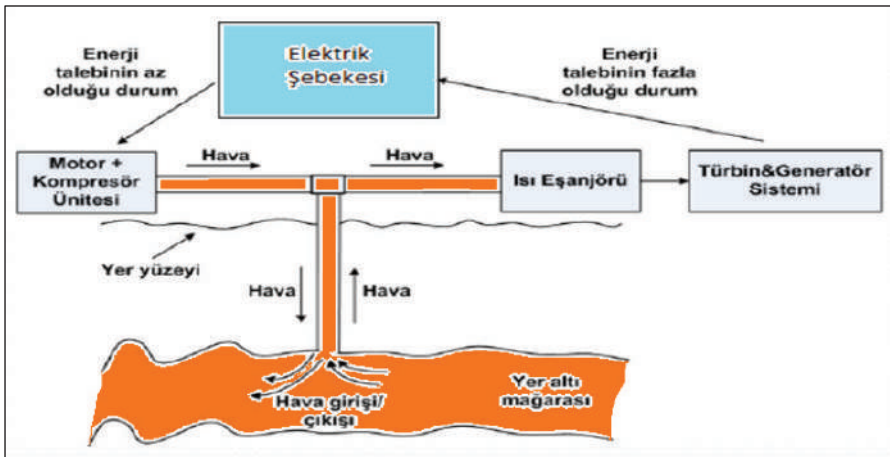


Şekil 5. Gelişmiş yüksek hızlı volan sistemi (Özdemir ve Hadra, 2016)

2.1.2 Pompalı Hidroelektrik Depolama (PHD)

19. yüzyıldan beri, hava enerjisi maden motorlu lokomotiflere ve bir zamanlar savaş gemisi torpidolarına güç sağlamaktadır. Hava enerjisi ve bu enerjiden yararlanma yeni bir fikir değildir (Schaber, Mazza, ve Hammerschlag, 2004).

Basıncı hava sistemleri, yüksek basınçta bir tanka hava zorlamak ve bir kompresör yardımıyla enerji sağlamak amacıyla elektrik enerjisi kullanılarak oluşturulmaktadır. Daha sonra, bu basınçlı hava, ihtiyaç duyulduğunda bir piston veya türbin vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülerek güç üretilmektedir. Bu süreç, havanın enerji depolama ve dönüşümü için kullanılan bir sistemdir ve birçok endüstriyel ve uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6. PHD akış diyagramı (Kocaman, 2013)

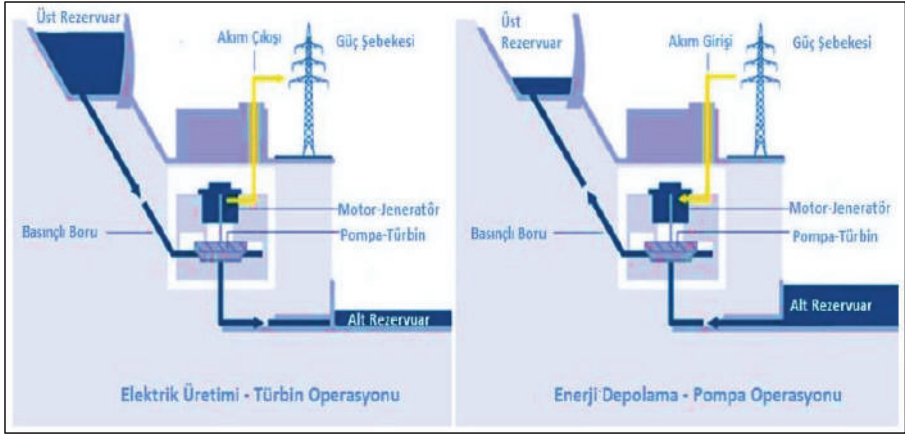
(PHD) sistemleri, basınçlı havayı yer altı su katmanları, terkedilmiş tuz ve diğer maden yatakları gibi jeolojik yapılarında depolamaktadır (Şekil 6). Bu sistemler oldukça maliyetlidir. PHD sistemlerinde pratik olarak en düşük güç 10 MW ve en yüksek enerji depolama kapasitesi 100 MW/saat olarak ifade edilmektedir. PHD teknolojisi, basınçlı su depolama teknolojilerine kıyasla daha yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahiptir (Parrilla, Gonzalez, ve Aguado, 2023; Sahay ve Dwivedi, 2009).

Hidro enerji depolama sistemleri, potansiyel enerji kullanımı kavramına dayanmaktadır. Yoğun saatler dışında elektrik, suyu yüksek tepelere ve dağ rezervuarlarına pompalamak için kullanılmaktadır (Şekil 7 ve 8). Yoğun zamanlarda, su borulardan hidro jeneratöre yönlendirilmektedir. Bu tür bir depolama tipik olarak yoğun talebi karşılamak için kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerin en büyük dezavantajı, ekosisteme zarar veren büyük bir rezervuar oluşturmalarıdır. Diğer bir dezavantaj, en az iki su deposuna ihtiyaç duyulmasıdır (Sahay ve Dwivedi, 2009).



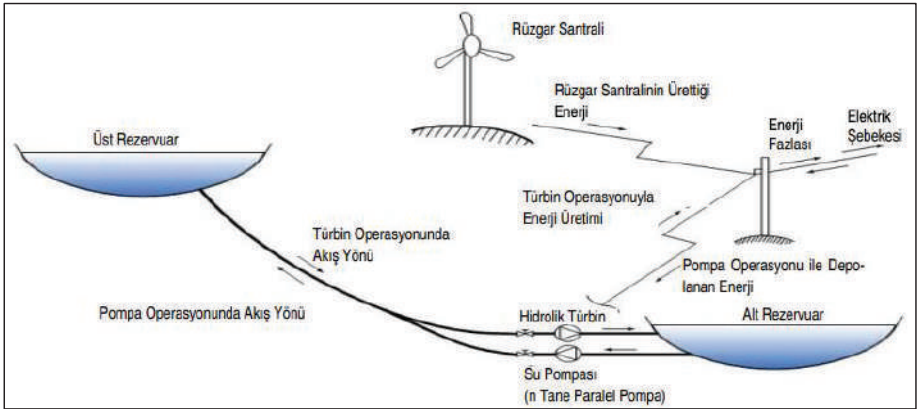
Şekil 7. Basınçlı su depolama şeması (Parrilla ve diğ., 2023)

Pompajlı depolamalı enerji santrallerinde pompa ve türbin elemanlarının tersinir olarak kullanılması büyük avantajlar sunmaktadır. Tersinir pompa-türbin ile sistem, yoğun zamanlarda bir türbin gibi çalışmakta ve bir üst rezervuara su pompalayarak depolanabilecek enerjiyi üretmektedir. Şekil 8'de, pompa çalışması sırasında şebekeden güç çekerek ve suyu alt rezervuardan üst rezervuara depolayarak ve türbin çalışması sırasında suyu üst rezervuardan alt rezervuara indirerek enerji dönüşümünü göstermektedir (Aras, 2017; Özarslan, 2012).

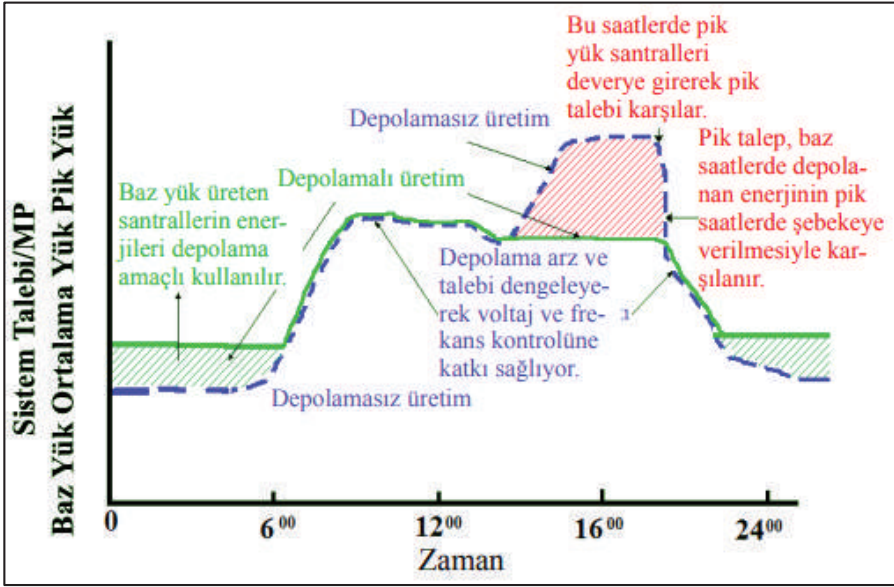


Şekil 8. Pompaj Depolamalı HES Şematığı (Aras, 2017)

Pompaj depolamalı enerji santralleri, yenilenebilir enerji santrallerine entegre edilebilmektedir. Rüzgar enerjisi ve pompalı depolama sistemlerinin entegrasyonunun dünya çapında örnekleri bulunmaktadır. Şekil 9'da bir rüzgar çiftliği ve bir pompalı depolama sisteminin entegre çalışma prensibi gösterilmektedir (San Martín ve diğ. 2011). PHD sistemler için yük profili Şekil 10'da verilmiştir



Şekil 9. Rüzgar-Pompaj Depolamalı HES Şematığı (San Martín ve diğ., 2011)



Şekil 10. PHD Sistemler İçin Yük Profili .(Tanrıöven, 2013)

2.2 Kimyasal EDT

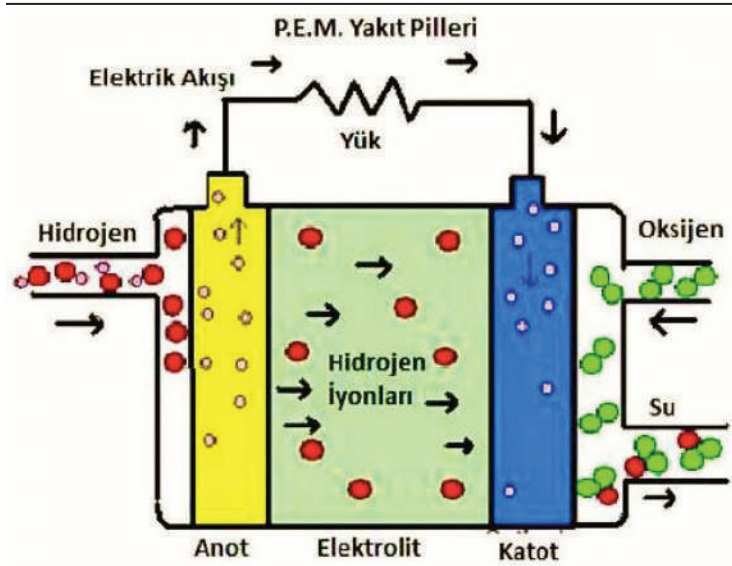
Atomların kimyasal bağlarında depolanan ve yalnızca kimyasal bir ortamda serbest bırakıldığında görülebilen moleküler reaksiyonlara kimyasal enerji denilmektedir. Kimyasal enerji açığa çıktığında madde tamamen farklı bir maddeye dönüşmektedir (Miller ve diğ. 2021). Kimyasal yakıtlar yaygın olarak enerji üretimi, enerji taşıma ve enerji depolama için kullanılmaktadır. En çok kullanılan kimyasal yakıtlar; motorin, işlenmiş kömür, doğal gaz, benzin, LPG, hidrojen, etanol, bütan, propan, biyodizeldir. Bu kimyasallar, ısı motorları tarafından itme gücü olarak kullanıldığında, sıvıya dönüşmekte ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Elektrik üretimi için depolanan bu kimyasal enerji doğrudan elektronlar transfer reaksiyonları ile serbest bırakılmaktadır (Schlögl, 2017).

2.3 Hidrojen Depolama

Hidrojen yenilenebilir bir yakıt olup bol bulunan, temiz ve enerji taşıyan bir maddedir. Hidrojen, ancak yanma reaksiyonundan sonra su buharı salmaktadır, diğer hidrokarbonlardan daha yüksek olan 142 kJ/kg enerjiye sahiptir (Niaz, Manzoor, ve Pandith, 2015).

Hidrojen depolama yöntemleri; fiziksel (gaz ve sıvı) depolama ve malzeme depolama olarak iki türe ayrılmaktadır. Gaz depolama genellikle 350 ile 700 bar arası yüksek basınçlı tanklarda yapılabilmektedir. Sıvı hidrojenin depolanması,

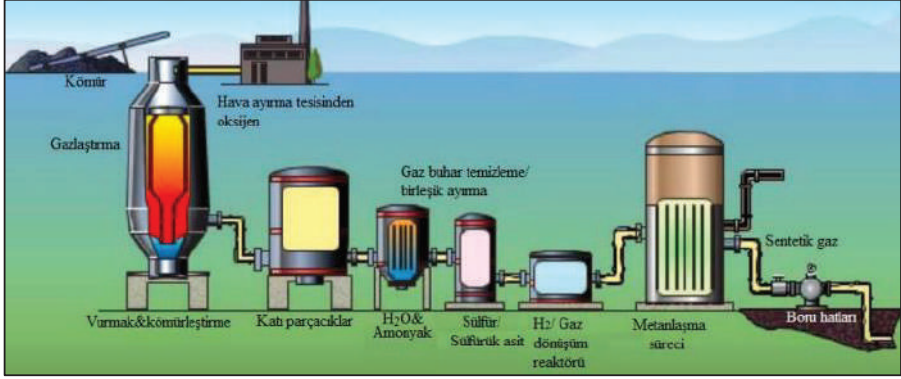
kaynama sıcaklığından (1 atm) -252.8°C dolayla kriyojenik bir soğutma işlemi gerektirmektedir. Enerji depolama sisteminde hidrojen kapasitesi çok yüksektir. Yapılan hesaplamalara göre, 1 kilogram hidrojenin yaklaşık 33 kWh enerji içerdiğini göstermektedir. Şekil 11’de hidrojen hücresinin yapısını göstermektedir. Hidrojen; petrol ithalatını azaltarak enerji güvenliğini iyileştirerek şehirleri, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak sürdürülebilirliği sağlamak, kirliliği azaltmak ve kullanım noktasında sıfıra yakın karbon, hidrokarbon vb. üreterek hava kalitesini iyileştirmek gibi birçok avantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, hidrojen dünya çapında tanınan bir temiz enerji kaynağıdır (Niaz ve diğ. 2015; Nowotny ve Veziroglu 2011).



Şekil 11. Hidrojen pil yapısı (Deneysan, 2020)

2.3.1 Sentez Gazı Depolama

En yaygın fosil kaynaklı yakıt doğal gazdır ve esas olarak Metan’dan (CH_4) oluşmaktadır. Biyogaz, sentez gazı, biyosentetik doğal gazı, çöp gazı ve diğer gaz yakıtlardır. Biyogaz, ayrılmış organik maddeden oluşmakta ve metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) içermektedir. Düzenli depolama alanlarının biyogazın bileşimine benzemektedir. Katı besinlerin gazlaştırma yoluyla kısmen dönüştürülmesi sentetik doğal gazı ifade etmektedir. Üretilen sentetik doğal gaz basınçlı tanklarda, yer altında depolanabilmekte veya doğrudan gaz şebekesine verilebilmektedir. Sentez gazı hem karbondioksit (CO_2) açısından zengin hem de elektrik açısından zengin yerlerde tercih edilmektedir (Chandel ve Williams, 2009; Zwart, Boerrigter, Deurwaarder, Van der Meijden, ve Van Paasen, 2006). Sentetik doğal gazın üretim prensipi Şekil 12’de verilmiştir.



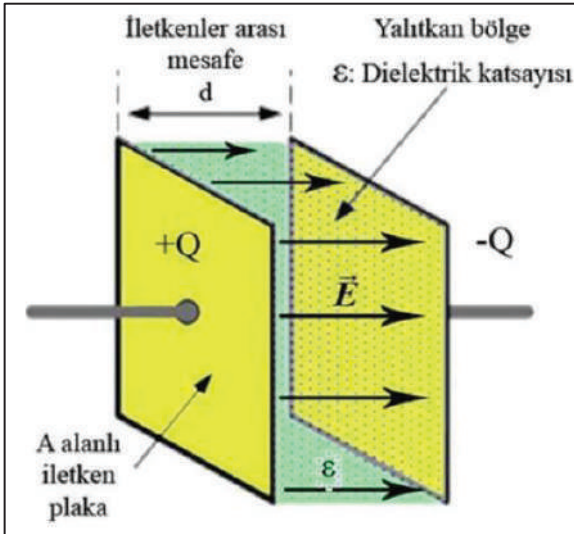
Şekil 12. Sentetik Doğal Gazın Üretimi (Kocaman, 2021)

2.3 Elektrik EDT

Elektrik enerjisi depolama teknolojisi; kapasitörler, süper kapasitörler ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Kapasitörler genel olarak yüksek akım koşullarında kullanılabilirler ancak çok az kapasite üretirler, bu nedenle yalnızca çok kısa süreler için kullanılabilirler (Kocaman, 2021).

2.3.1 Kapasitör (Kondansatör)

Kondansatörler elektriği depolamanın en doğru yoludur. Şekil 13'te bir kapasitörün iç yapısı gösterilmiştir. Genel olarak yapısı, dielektrik adı verilen iletken

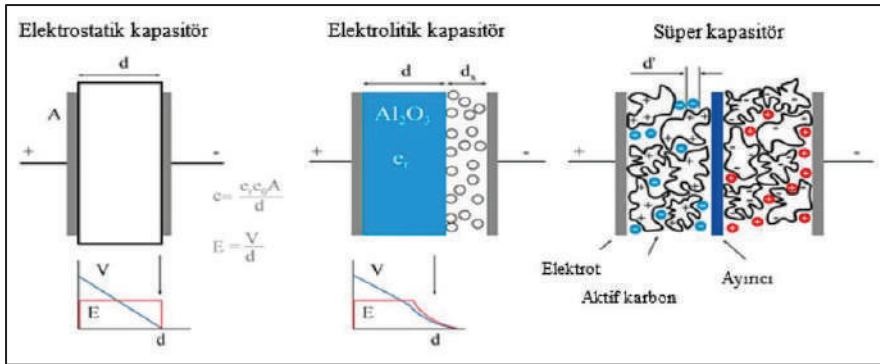


Şekil 13. Kapasitör yapısı (Kocaman, 2021)

olmayan bir katmanla ayrılmış iki metal plakadan oluşmaktadır. Bu plakalar DC kaynağından gelen akımla yüklendiğinde, diğer plakada zıt işaretli bir yük indüklenmektedir. Metalize veya metalize elektronların yüzeyinde enerji depolamaktadırlar. Kondansatörler, çok düşük enerji yoğunlukları nedeniyle büyük akımları taşıyabilirler, ancak bu sadece çok kısa süreler için kullanılmaktadır (Kocaman, 2021; Zakeri ve Syri, 2015).

2.3.2 Süper Kapasitör

Çift katmanlı kapasitörler, geleneksel kapasitörler ile elektronikte kullanılan genel amaçlı piller arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Şekil 14'te bir süper kapasitörün iç yapısı gösterilmiştir. Süper kapasitörler, ince bir moleküler yapıya sahip elektrolit tabakası kullanılmakta ve çok geniş bir yüzey alanına sahip aktif karbon yapısına sahiptir. Pillere göre çok daha verimli şarj ve deşarj edilebilirler. Bu tür kapasitörler enerji depolama kapasitesi, geleneksel kapasitörlerin kapasitesinden önemli ölçüde daha yüksektir (Chen ve diğ. 2009; STM ThinkTech 2022).



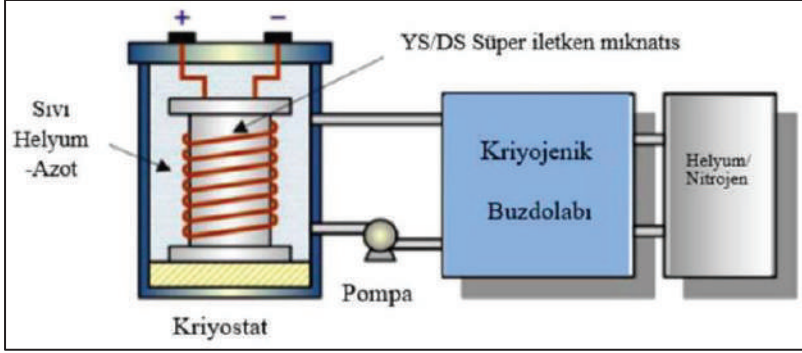
Şekil 14. Kapasitörlerin yapıları (Arslan, 2012)

Elektrostatik elektrokimyasal pil sistemlerinden farklılık gösteren süper kapasitör enerji depolamasıdır. Grafen süper kapasitörlerin çok daha hafif ve kullanımlarının daha kolay olduğuna inanılmaktadır. Lityum-iyon piller aynı enerji depolama kapasitesine sahiptir ancak on binlerce kez yeniden şarj edilebilmektedir (Petrovan, 2022).

2.3.3 Süper İletken Manyetik (SİM)

Süper iletken manyetik (SİM) enerji depolama sistemleri elektrodinamik ilkesine göre çalışmaktadır. Enerji, süper iletkenliğin kritik sıcaklığının altında tutulan doğru akım tarafından oluşturulan bir manyetik alanda süper iletken bir bobinde depolanmaktadır. Kriyojenik olarak soğutulmuş süper iletken malzeme ve depolanan enerji, bobini kırarak şebekeye geri salınabilmektedir (Root, 2011; Zake-

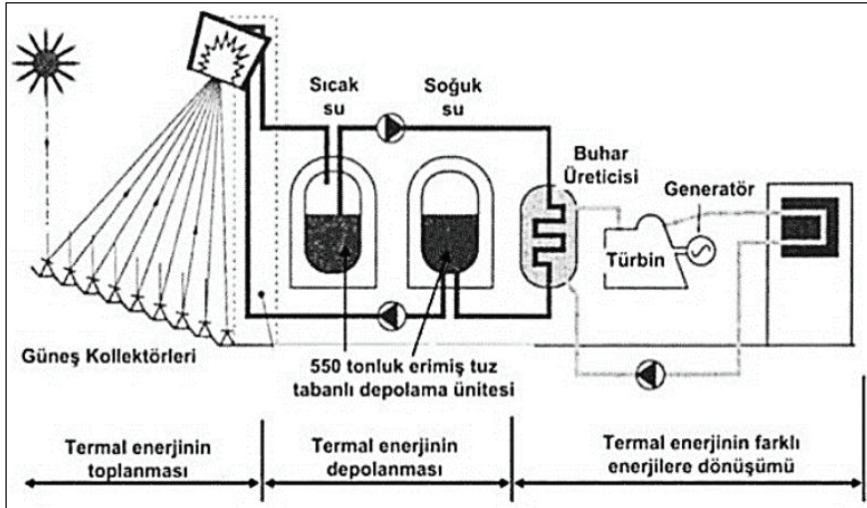
ri ve Syri, 2015). Süper iletken manyetik enerji depolama sisteminin yapısal bir resmi Şekil 15'ta gösterilmektedir.



Şekil 15. SİM enerji depolama sistemi ayrıntılı yapısal görünüm (Molina, 2010)

2.4 Termal EDT

Sıcaklık, konum veya güç gibi diğer koşullar altında daha fazla kullanım için bir sıcaklıkta bir depolama ortamında ısıyı veya soğluğu depolamaya uygun sistemlerdir. Termal EDT; sıcak su temini, ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi gibi endüstriyel uygulamalar ve konut için kullanılabilir. Termal EDT; duyulur, gizli ve termokimyasal ısı olmak üzere üç farklı kategoride ayrılabilir (Abedin ve Rosen, 2011; Emeksiz ve Kara, 2022). Termal enerji depolama sistemlerinin şeması Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. Örnek termal EDT şeması (Emeksiz ve Kara, 2022)

2.4.1 Termokimyasal Depolama

Termokimyasal enerji depolama, yüksek verimli ve temiz enerji sistemleri sağlayabilen gelişmiş bir termal enerji depolama teknolojisidir. Termokimyasal, yüksek enerji yoğunluklarında depolama potansiyeli olan yeni bir yöntemdir. Bu nedenle, alan sınırlı olduğunda, termokimyasal TED'ler, gerekli kompakt termal enerji depolamasını elde etmek için en büyük potansiyele sahiptir (Abedin ve Rosen 2011; Pflieger ve diğ. 2015).

2.4.2 Duyulur Isı Depolama

Havanın kuru termometre sıcaklığını artırmak için (özgül nemin sabit olması koşuluyla) ısı dış ortama yayılır, bu ısıya duyulur ısı denir. Duyulur ısı depolama işleminde sıcaklık değişimlerine neden olmaktadır. Özgül ısı kapasitesi, kullanılan ortamın kütlesi ile birlikte depolama sisteminin kapasitesini belirlemektedir. Depolama ortamı sıvı (örnek; su, erimiş tuz veya kızgın yağ), katı (örnek; taş, beton, metal veya toprak) veya içi katı dolu sıvı gibi çeşitli aşamalarda olabilmektedir (TÜBA, 2020).

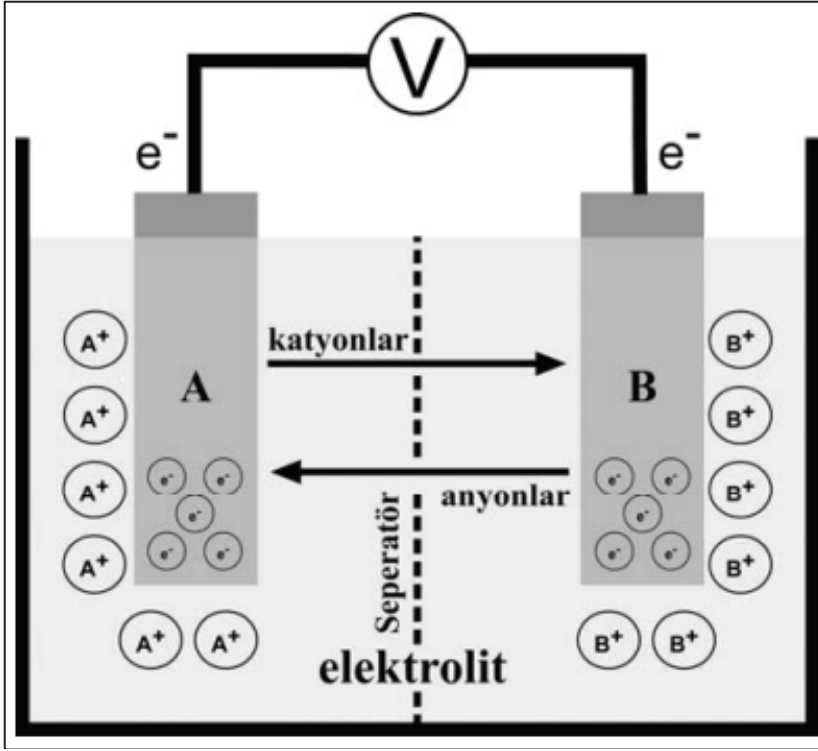
2.4.3 Gizli Isı Depolama

Bir maddenin faz değişimi sırasında ortamdaki emdiği veya ortamdaki saldıdığı ısıdır. Gizli ısı sıcaklık değişimleri ile tespit edilmez. Gizli ısı depolama, bir ısı depolama ortamı oluşturmak için faz değiştiren malzemeleri kullanır. Isıl iletkenlik gizli ısı sistemlerinde önemli bir araçtır. Ayrıca yoğunluk ve entalpi, hacimsel depolama kapasitesini belirlediği için faz geçişlerinde önemlidir. Gizli ısı depolama sistemlerinde organik (parafinler), inorganik ve tuz hidratları kullanılabilir. Gizli ısı enerjisi depolamanın bir yöntemi, buzda enerji depolamadır. Bu işlem, bir binanın soğutma yükünü daha sonra kullanmak üzere depolamak için su ve buzun faz değişimi sırasında üretilen termal enerjiyi kullanmak için kullanılır. Temel amaç, kapalı mekanları soğutmak için kullanılan klimaların enerji tüketim maliyetlerini azaltmaktır (TÜBA, 2020).

2.5 Elektrokimyasal EDT

Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için elektrokimyasal enerji kaynakları kullanılır, bu dönüştürme işlemi sırasında en az iki genel kimyasal reaksiyon sürecinden geçmektedir. Elektrokimyasal enerji kaynakları, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir (Scrosati ve diğ. 2013).

Genel olarak basit pil sistemi bir elektrokimyasal (galvanik) hücreden oluşmaktadır. Hücreler, elektrik enerjisinin elektrokimyasal reaksiyona neden olmasına veya kimyasal reaksiyon sonucunda elektrik enerjisi oluşmasına göre adlandırılmaktadır. İlk durumda elektrolitik hücrelerden ve ikinci durumda galvanik hücrelerden bahsetmekteyiz (Reddy ve diğ. 2020). Şekil 17'de basit pil şeması verilmiştir.



Şekil 17. Basit pil sistemi (Reddy ve diğ. 2020)

Bu hücre tipik olarak 0,5 ile 5V arasında değişen nispeten düşük bir voltaj sağlar. Daha yüksek voltaj değerleri için hücreler seri bağlanır. Büyük kapasite için paralel bağlanırlar. Her iki durumda da bu hücrelerin birbirine bağlanmasıyla oluşan yapıya 'batarya' adı verilir (Daniel ve Besenhard, 2012).

En basit haliyle, bir pil, iyonik olarak iletken, elektriksel olarak yalıtkan bir elektrolit ile ayrılmış, biri pozitif diğeri negatif olan iki elektrottan oluşur. Bu elektrolit sıvısı bir sıvı, bir iyonomer polimer veya gözenekli bir matris içinde emprenye edilmiş bir katı olabilir. Bazı piller yeniden şarj edilerek birden çok kez kullanılabilir. Diğerleri yalnızca bir kez boşaltılabilir. Boşaldıktan sonra kullanılmak üzere tasarlanmış pillere "birincil piller" denir. "İkincil pil", şarj edilebilir bir pildir (Scrosati ve diğ. 2013).

Elektrokimyasal depolama teknolojisinin iki ana alanı vardır. Bunlar; elektrokimyasal hücreler ve elektrokimyasal kapasitörlerdir. Elektrokimyasal depolama sistemleri tasarım, yapısal özellikler ve kimyasal reaksiyon türü bakımından farklılık göstermektedir. Elektrokimyasal piller ve hücreler çalışma prensibine göre dört kategoriye ayrılabilir. Birincil hücreler veya piller, ikincil hücreler veya piller, yedek piller ve yakıt hücreleridir. Ayrıca pillerin üretiminde kullanılan kimyasal-

ların türüne göre de sınıflandırılmaktadırlar (Gotham, Nderitu, ve Preckel, 2013; Güngör ve Efe, 2021).

• **Çalışma Prensibine Göre Piller :**

- Birincil piller,
- İkincil piller,
- Yedek piller,
- Yakıt pilleri (Güngör ve Efe, 2021).

• **Kullanılan Kimyasalın Çeşidine Göre Piller**

- Kurşun Asit Piller,
- Sodyum İyon Piller,
- Lityum Sülfür Piller,
- NanoBolt Lityum Tungsten Piller,
- Redox Akım Pilleri,
- Alüminyum Grafit Piller,
- Lityum İyon Piller,
- Biyoelektrokimyasal Piller,
- Organosilikon Elektrolit Piller,
- Katı Hal Pilleri,
- Nikel Kadmiyum Piller,
- Altın Nanokablolu Jel Elektrolit Piller (Güngör ve Efe, 2021).

3. Enerji Depolama Avantajları

- Enerji üretimi için kullanılan sistemlerin operasyonel verimliliğini, dayanıklılığını ve esnekliğini sağlayarak enerji sürdürülebilirliğini artırmak,
- Enerji talebi ve arzı arasındaki uyumsuzluğu azaltmak,
- Şebeke gerilimi ve frekans regülasyonu sağlamak,
- Kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından her zaman enerji üretememe sorunu, enerji depolama teknolojisi ile hafifletilebilir (Güneş enerji ve rüzgar enerji gibi),
- Enerji santrallerinin ilk yatırım ve işletme maliyetlerini düşürerek ekonomik olarak katkı sağlamak,
- Güç kalitesini artırmaya yardımcı olmak,
- Bazı enerji depolama teknolojileri, atık enerji sisteme geri döndürüldüğü için enerji üretim sistemlerinin verimliliğini artırarak yakıt tüketimini azaltabilir (Kocaman, 2013).

4. Sonuçlar

Enerji depolama teknolojileri (EDT), çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları ile güç sisteminin verimliliğinin güvenilirliğini ve kalitesini sağlamak için güç şebekesiyle entegre olduğundan dolayı depolama ile ilgili sorunlara bir çözümdür. Enerji depolama sistemleri, geleceğin itici teknolojilerinden biri olan akıllı şebeke kavramını mümkün kılmaktadır. Enerji üretimindeki değişkenliği azaltan enerji depolama, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Sürdürülebilirlik ve çevre koruma gibi temel enerji konuları, bizi enerji kaynaklarımızı çeşitlendirmeye ve yenilenebilir enerji kullanımımızı artırmaya itmektedir. Yenilenebilir kaynaklardaki kısa ve uzun vadeli dalgalanmaların neden olduğu enerji/üretim değişkenliği, birkaç önemli ölçüm gerektirmektedir. Kolay yönetilebilirliği, kontrol edilebilirliği, öngörülebilirliği ve esnekliği enerji depolamayı şebeke yanıt verme yeteneğini iyileştirmek için gerekli kılmaktadır. Hayatımızın her alanına nüfuz eden piller ve benzeri enerji depolama sistemleri, teknolojinin geleceğini iyileştirecek araştırmaların konusu ve gelişmeye en açık alanlardan biridir. Bu çalışmayla birlikte enerji depolama ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar ve standartlar ele alınmış ve literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır. Sonuç olarak yapılan araştırma neticesinde en yaygın olarak elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri kullanıldığı görülmüştür.

Kaynakça

- Abedin, A. H. (2011). A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems. *The Open Renewable Energy Journal*, 4(1), 42–46. Doi: <https://doi.org/10.2174/1876387101004010042>
- Açıkgöz, İsmail. Cem. (2019). *Volan ve lityum-iyon batarya enerji depolama sistemlerinin kıyaslanması ve hibrit enerji depolama sisteminin farklı yük profilleri üzerinde performans analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi (Fen Bilimleri Enstitüsü), İstanbul. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=wFyfHcyXZVzh>
- Aras, E. (2017). Importance of pumped storage hydroelectric power plant in Turkey. *Advances in Energy Research*, 5(3), 239–254. Doi: <https://doi.org/10.12989/eri.2018.5.3.239>
- Arslan, A. (2012). *Bazı iletken Polimerlerin Süperkapasitör Uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=La>
- Bolund, B., Bernhoff, H., ve Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(2), 235–258. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.004>

- Bryan, B. P., ve Andrews, J. A. (2004). *Advence in Flywell Energy Storages Systems*. Tezas.
- Çaliker, A., ve Özdemir, E. (2013). Modern enerji depolama sistemleri ve kullanım alanları. *V. Energy Efficiency And Quality Symposium (5'inci Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu)*. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/ekler/0a55200ff16175a_ek.pdf
- Chandel, M., ve Williams, E. (2009). Synthetic Natural Gas (SNG): Technology, Environmental İmplications, and Economics. *Climate Change Policy Partnership*. Erişim adresi: <https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/natgas-paper.pdf>
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., ve Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- Daniel, C., ve Besenhard, J. O. (2012). *Handbook of battery materials*. John Wiley & Sons. Retrieved from http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H142426_v2.pdf
- Dănilă, E., ve Lucache, Dorin. Dumitru. (2010). History of the first energy storage systems. *3rd International Symposium on the History of Electrical Engineering and of Tertiary-Level Engineering Education* (pp. 27-29). Iași: IEEI. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/profile/Elena-Danila-2/271371039.pdf>
- Deneysan. (2020). Bölüm-8 Hidrojen Enerjisi. Erişim adresi: http://deneysan.com/Content/images/documents/es-08_59355631.pdf
- Elektrik Rehberiniz. (2013). Elektrik Enerjisi Nedir? Erişim adresi: <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik/elektrik-enerjisi-nedir-5035/>
- Emeksiz, C., ve Kara, B. (2022). Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 6(2), 134-142. Erişim adresi: <https://dergi-park.org.tr/en/pub/ijmsit/issue/73364/1192595>
- Falk, G., Herrmann, F., ve Schmid, G. Bruno. (1983). Energy Forms or Energy Carriers? *American Journal of Physics*, 51(12), 1074-1077. Erişim adresi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1119/1.13340>
- Gotham, D. J., Nderitu, D. G., ve Preckel, P. V. (2013). Utility Scale Energy Storage Systems. Erişim adresi: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:168571077>

- Güngör, Z. A., ve Efe, Ş. (2021). Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 947–955. Erişim adresi: <https://doi.org/https://doi.org/10.31590/ejosat.1048673>
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., ve Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1513–1522. Erişim adresi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.028>
- İnan, İ., Akbulut, İ., ve Aslan, E. (2018). Enerji Sorununun Çözümünde Yenilenebilir ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yeri ve Önemi. *Türk Dünyası Araştırmaları*, 120(237), 11–40. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tda/issue/58714/847773>
- Karakoç, H., Karakoç, N., Erbay, B., ve Aras, H. (2012). *Enerji Analizi*. (Y. Ergün & M. Tanışlı,Eds.) (1st ed.). Eskişehir: T. C. Anadolu Üniversitesi.
- Kocaman, B. (2013). Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 119–127. Erişim adresi <https://dergipark.org.tr/en/pub/bitlisfen/issue/3702/49005>
- Kocaman, B. (2021). *Enerji Depolama Teknolojileri*. Ankara: İksad Yayınevi. Erişim adresi <https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2021/12/Enerji-Depolama>.
- Landry, M., ve Gagnon, Y. (2015). Energy Storage: Technology Applications and Policy Options. *Energy Procedia*, 79, 315–320. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.494>
- Leblebicioğlu. (2020). Enerji Depolama Nedir? Enerji Depolama Yöntemleri Nelerdir?. Erişim adresi: <https://muhendistan.com/enerji-depolama-nedir>
- Lott, M. C., Kim, S.-I., Tam, C., Houssin, D., ve Gagné, J. F. (2014). Technology Roadmap: Energy Storage. *International Energy Agency (IEA), France*, 1–59. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/80b629ee-597b-4f79-a236>
- Mazman, M. (2018). Enerji depolamada gelecek beklentileri. *11. Uluslararası Enerji Kongresi ve Fuarı*. Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası.
- Mazman, M., ve Yılmaz, C. H. (2019). Enerji Depolama Çözümleri ve Genel Eğilimler. *Elektrik Mühendisliği Bilimsel Dergisi*, (466), 32–40. Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/ekler/da7b5bd048a3e14_ek.pdf?dergi=1210
- Mehling, H. (2017). What is energy, and why is it conserved? A review, analysis, and suggested explanation and definition. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/312071321_What_is_energy_and_why_is_it_cons

- Miller, M. A., Petrasch, J., Randhir, K., Rahmatian, N., ve Klausner, J. (2021). Chemical energy storage. *Thermal, mechanical, and hybrid chemical energy storage systems* (pp. 249–292). Elsevier.
- Molina, M. G. (2010). Dynamic modelling and control design of advanced energy storage for power system applications. *Dynamic Modelling*, 300.
- Niaz, S., Manzoor, T., ve Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457–469.
- Nowotny, J., ve Veziroglu, T. N. (2011). Impact of hydrogen on the environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 13218–13224.
- Özarıslan, A. (2012). Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Büyük Ölçekli Enerji Depolama Yöntemleri. *DEKTMK Türkiye*, 12, 14–16.
- Özdemir, N., ve Hadra, M. (2016). Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Depolama Yöntemleri. *Güç Sistemleri Konferansı, İstanbul, Kasım*.
- Özdoğan, M. (2010). *Bir enerji depolama sisteminin tasarımı ve çalışma parametrelerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir. Erişim adresi: <https://acikerisim.deu.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12397/8129/283628.pdf>
- Parrilla, Á. P., Gonzalez, J. M., ve Aguado, J. A. (2023). Mechanical energy storage technologies.
- Petrovan, B. (2022). 10 alternatives to lithium-ion batteries: Which new tech will power the future?. Erişim adresi <https://greenauthority.com/>
- Pfleger, N., Bauer, T., Martin, C., Eck, M., ve Wörner, A. (2015). Thermal energy storage–overview and specific insight into nitrate salts for sensible and latent heat storage. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 1487–1497.
- Reddy, M. V, Mauger, A., Julien, C. M., Paoella, A., ve Zaghıb, K. (2020). Brief history of early lithium-battery development. *Materials*, 13(8), 1884.
- Root, M. (2011). *The TAB battery book : an in-depth guide to construction, design, and use*. McGraw-Hill/TAB. Retrieved 13 February 2024 Erişim adresi: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270968450176.bib?lang=en>
- Sahay, K., ve Dwivedi, B. (2009). Development of Techno-Economical Objective Function for Supercapacitors Energy Storage System Implemented in Distribution System. *Electrical Power Quality and Utilisation. Journal*, 15(2), 29–33.
- San Martín, J. I., Zamora, I., San Martín, J. J., Aperribay, V., & Eguia, P. (2011).

Energy storage technologies for electric applications. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (Vol. 13, p. 15).

Sara Enerji. (2021). Enerjisi Depolama Sistemleri. Retrieved 13 February 2024, Erişim adresi: <http://www.saraenerji.com.tr/index.php/tr/enerjisi-depolama-sistemleri>

Sarı, A. (2011). Faz Değişimi Yoluyla Isıl Enerjinin Depolanması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar. *Kimya Lisans Öğrencileri Araştırma Projesi Çalıştayı*, 20–28.

Schaber, C., Mazza, P., ve Hammerschlag, R. (2004). Utility-scale storage of renewable energy. *The Electricity Journal*, 17(6), 21–29.

Schlögl, R. (2017). Chemical energy storage: Part of a systemic solution. *EPJ Web of Conferences* (Vol. 148, p. 00015). EDP Sciences.

Scrosati, B., Abraham, K. M., van Schalkwijk, W. A., ve Hassoun, J. (2013). *Lithium batteries: advanced technologies and applications*. John Wiley & Sons.

Şenel, Mahmut. Can., ve Koç, E. (2013). Rüzgar Türbinleri Dinamik Davranış Analizi Teorik Boyutsuz Bir Model. 2. *Anadolu Enerji Sempozyumu (2. AES)* (pp. 301–313). Diyarbakır. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/326831490>

STM ThinkTech. (2022). *Enerji Depolama Teknolojilerindeki Son Gelişmeler*. Erişim adresi: <https://thinktech.stm.com.tr>

Tanrıöven, K. (2013). Enerji Depolama Sistemleri ve Yeni Açılımlar. *V. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*. Kocaeli: Elektrik Mühendisleri Odası (EMO). Erişim adresi: <https://www.emo.org.tr>

TÜBA. (2020). *TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu*. (İ. Dinçer & Mehmet. Akif. Ezan,Eds.). Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net>

Wikipedi. (2022). Enerji Biçimleri. Erişim adresi: <https://tr.wikipedia.org>

Whittingham, M. S. (2012). History, Evolution, and Future Status of Energy Storage. *Proceedings of the IEEE*, 100 (Special Centennial Issue), 1518–1534. Doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2190170>

Willis, H. L., & Scott, W. G. (2018). *Distributed Power Generation*. (H.L. Willis,Ed.), Distributed power generation: planning and evaluation (1st Edition). Florida: CRC Press. Doi: <https://doi.org/10.1201/9781315215006>

Worldometer. (2022). World Population Projections. Erişim adresi: <https://www.worldometers.info/world-population/world-population-projections/>

- Yağlı, H., Koç, A., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86–114. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/muhendismakina/issue/48388/614281>
- Yavuz, B. (2011). *Enerji depolama sistemlerinin modellenmesi ve analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Erişim adresi: <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/1/7824/0075923.pdf>
- Zakeri, B., ve Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569–596. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>
- Zwart, R. W. R., Boerrigter, H., Deurwaarder, E. P., Van der Meijden, C. M., ve Van Paasen, S. V. B. (2006). Production of Synthetic Natural Gas (SNG) from Biomass. Development and operation of an integrated bio-SNG system. Non-confidential version.



TİCARİ BİR SOĞUTUCUDA ÜRÜN SICAKLIK SINIFLARININ ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

F. Mertkan ARSLAN^{1*}, Hüseyin GÜNERHAN², Hakan TAVUKCU³, Binnur SOYSAL⁴, Sertan AKSOY⁵, Bora DEVRİM⁶,

¹ Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Bornova-İzmir, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8359-7743>

² Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Bornova-İzmir, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-4256-2418>

³Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0006-6318-2683>

⁴Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0008-1165-0785>

⁵Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0006-5524-9657>

⁶Uğur Soğutma Makinaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., Nazilli-Aydın, ORCID No: <https://orcid.org/0009-0008-8749-1012>

Anahtar kelimeler

Öz

Ticari soğutucular, enerji verimliliği, enerji tüketimi, kutu ve şişe sıcaklıkları, ürün sıcaklık sınıfları

Bu çalışmada, 680 litre hacim kapasiteli dikey, kapalı ve ısı cam kapılı bir ticari kutu soğutucusunun gece-gündüz modlarında ve farklı ürün sıcaklık sınıflarındaki enerji tüketimi deneysel olarak incelenmiştir. Ticari kutu soğutucusu R290 (propan) soğutma akışkanı ile çalışmakta ve buhar sıkıştırma soğutma çevrimi içerisinde adyabatik olmayan kılcal boru (emiş hattı ısı değiştiricisi) sistemi kullanılmaktadır. Deneysel düzenek, TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak kalibre edilmiş ve kurulmuştur. Deneyler; 25°C ± 0.8°C sıcaklık ve %60 ± %2 bağıl nem sağlayan bir iklimlendirme odasında 24 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Ticari soğutucu tam yük altında (700 adet 330 ml kutu), gece - gündüz modlarında ve iki farklı sıcaklık sınıfında (K1 ve K4) test edilmiştir. K1 ve K4 sıcaklık sınıfları, alüminyum içecek kutularının test sürecindeki sıcaklıklarını ifade eden bir test standarttır. K1 sıcaklık sınıfında test edilen kutu sıcaklıkları; 0°C-7°C ve K4 sıcaklık sınıfında test edilen kutular ise; 1°C-9°C sıcaklıkları arasında kalması sağlanmıştır. K1 sıcaklık sınıfına ait deneylerde gündüz ve gece sırasıyla, 24 saatte 3.255 kWh ve 1.379 kWh enerji harcanmıştır. K4 sıcaklık sınıfına ait deneylerde ise bu değerler gündüz modunda 3.089 kWh ve gece gece modunda 1.341 kWh olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, K1 sıcaklık sınıfındaki enerji tüketimi K4 sıcaklık sınıfına göre gündüz ve gece modlarında sırasıyla %5.37 ve %2.83 daha yüksektir.

* mertkan.arslan@gmail.com

doi : 10.46399/muhendismakina.1330336

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRODUCT TEMPERATURE CLASSES ON ENERGY CONSUMPTION IN A CLOSED DISPLAY REFRIGERATOR

Keywords

Display cabinet refrigerator, Energy efficiency, energy consumption, can and bottle temperatures, temperature classes

Abstract

In this study, the energy consumption of a vertical closed display refrigerator (680 Liters) in day-night modes and in different product temperature classes was experimentally investigated. Closed display refrigerator works with R290 (propane) refrigerant. Moreover, non-adiabatic capillary tube (suction line heat exchanger) system is used in the vapor compression refrigeration cycle. The experimental setup was carried out and calibrated in accordance with the TS EN ISO 22044:2022 standard. Experiments were carried out for 24 hours in a test room providing a temperature of $25^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity of $60\% \pm 2\%$. The commercial refrigerator has been tested under full load (700 pcs. 330 ml cans), in day and night modes, and in two different temperature classes (K1 and K4). Can temperatures which tested in the K1 temperature class were kept between 0°C - 7°C . These temperature values for the K4 temperature is between 1°C - 9°C . In the experiments of the K1 temperature class, 3.255 kWh/24h and 1.379 kWh/24h energy were consumed during the day and night, respectively. In the experiments of K4 temperature class, these values were measured as 3.089 kWh/24h in day mode and 1.341 kWh/24h in night mode. As a result, the energy consumption in the K1 temperature class was 5.37% and 2.83% higher in day and night modes, respectively, compared to the K4 temperature class.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 20.07.2023

Kabul Tarihi : 25.09.2023

Research Article

Submission Date : 20.07.2023

Accepted Date : 25.09.2023

Extended Abstract

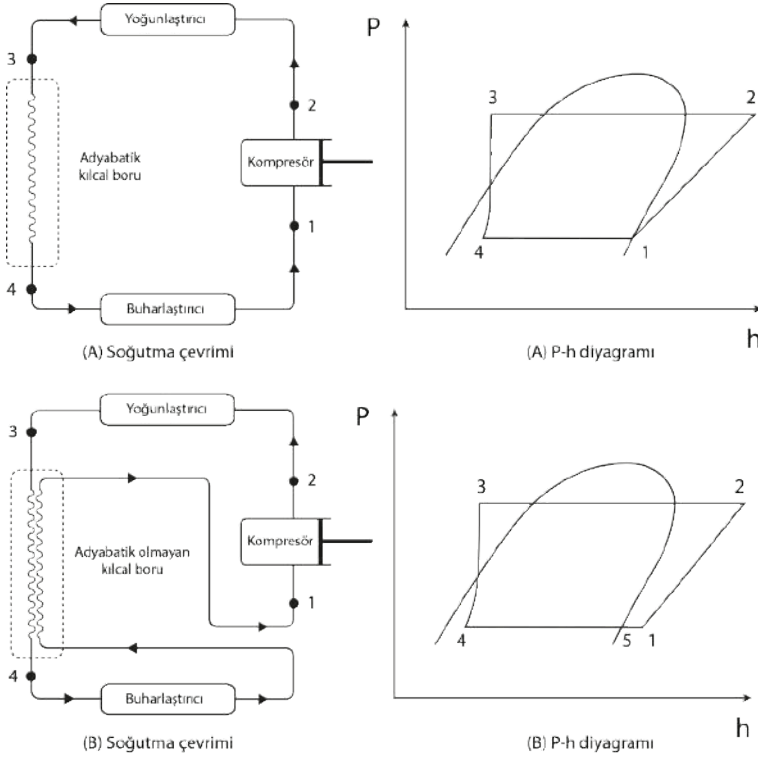
In this study, the energy consumption of a vertical closed display refrigerator (680 Liters) in day-night modes and in different product temperature classes was experimentally investigated. Closed display refrigerator works with R290 (propane) refrigerant. Moreover, non-adiabatic capillary tube (suction line heat exchanger) system is used in the vapor compression refrigeration cycle. The experimental setup was carried out and calibrated in accordance with the TS EN ISO 22044:2022 standard. Experiments were carried out for 24 hours in a test room providing a temperature of $25^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity of $60\% \pm 2\%$. Cans are filled with 33% propylene glycol and 67% water. The commercial refrigerator has been tested under full load (700 pcs. 330 ml cans), in day and night modes, and in two different temperature classes (K1 and K4). K1 and K4 temperature classes are a test standard that expresses the temperatures of aluminum beverage cans during the testing process. Can temperatures which tested in the K1 temperature class were kept between 0°C - 7°C . These temperature values for the K4 temperature is between 1°C - 9°C . In the experimental setup, thermocouples were placed on the surface of the cans, on the suction-discharge line of the compressor, on the outer upper surface of the compressor, on the dryer surface, and on the air and inlet and outlet parts of the evaporator. Thermocouples on the cans are positioned at the corners of the cans on each shelf. As a result, temperature measurements were made from 26 points in total within the scope of experiments. T-type thermocouples used in the experiments are connected to a panel and the mV change of the thermocouples with the Seebeck effect can be read through a program. The Power Analyzer is connected to power outlet of the closed display refrigerator to measure the total power consumed by the system (compressor, fans, lighting, electronic devices, etc.). The data obtained from the sensors in the test setup were recorded for 24 hours with a time interval of a minute. In the day mode and K1 temperature class tests, it was observed that the temperatures of all cans remained between 0°C - 7°C , which are the limit values of the TS EN ISO 22044:2022 standard. The maximum temperature of the measured cans during the test is 4.7°C . In this experiment, it was measured that the average temperature of all 20 cans varied between 3.4°C and 2.8°C . As a result, it has been shown that average can temperatures in the K1 temperature class and day mode experiments are kept below the average temperature limit of 3.5°C . In the experiments of the K4 temperature class and the day mode, it was observed that all can temperatures were between the limit values (1°C - 9°C), similar to the experiments belonging to the K1 temperature class. The maximum temperature of the measured cans throughout the experiment was measured as 6°C . The average temperature of cans was 4.6°C . In the experiments of K4 temperature class and day mode, it was observed that the average can temperatures were kept below the average temperature limit of 5°C . In the experiments of temperature class K1 and night mode, the minimum, average and maximum can temperatures measured throughout the experiment are 3.2°C , 5.2°C and 7.4°C , respectively. In the experiments of K4 temperature class and night mode, the measured minimum, average and maximum can temperatures are 4.7°C , 6.8°C and 9°C , respectively. In K1 day mode has the highest compressor operating percentage at 23.54%. In K4-night mode, which has the lowest compressor operating percentage, this value was 13.68%. K1-day mode has the highest compressor operating percentage, which was 23.54%. In K4-night mode, which has the lowest compressor operating percentage, this value was 13.68%. In 24 hours experiments in K1 temperature class, 3,255 kWh and 1,379 kWh energy were consumed during the day and night, respectively. In the experiments of the K1 temperature class, 3,255 kWh and 1,379 kWh energy were consumed during the day and night, respectively. In the experiments of K4 temperature class, these values were measured as 3,089 kWh in day mode and 1,341 kWh in night mode. As a result, the energy consumption in the K1 temperature class was 5.37% and 2.83% higher in day and night modes, respectively, compared to the K4 temperature class.

1. Giriş

Ticari soğutucular dolabın yerleştirilme şekline göre basitçe; yatay, dikey, yarı dikey, kombine ve açık veya kapalı olmasına göre sınıflandırılabilir (TS EN ISO 22044). Çalışma kapsamında, dikey ve kapalı cam dolaplı bir ticari kutu soğutucu kullanılmıştır.

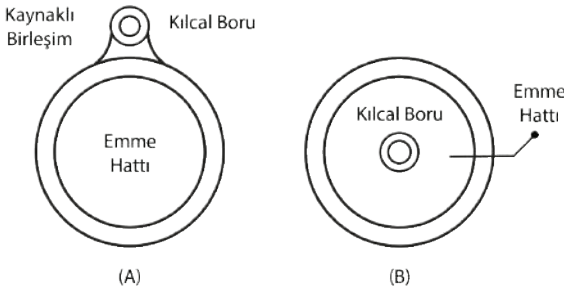
Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi, soğutma etkinlik katsayısının (COP) ve soğutma kapasitesinin yüksek olması gibi olumlu özelliklerinden dolayı, ticari soğutucularda yaygın olarak kullanılmaktadır. Buhar sıkıştırımlı soğutma sistemi temel olarak kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve kısılma vanasından oluşmaktadır (bkz. Şekil 1). Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimini kısaca özetlemek gerekirse; öncelikle, düşük basınçlı, düşük sıcaklıklı ve buhar fazındaki bir soğutucu akışkan kompresöre girer ve kompresöre iş girişi ile bu soğutucu akışkan sıkıştırılır. Kompresörden çıkan yüksek basınç ve yüksek sıcaklıktaki soğutucu akışkan yoğuşturucuya girer ve sabit basınç (borulardaki basınç kaybı hariç) altında ortama ısı verir ve yoğunlaşma gerçekleşir. Daha sonra kısılma vanasına gelen soğutucu akışkan, yüksek basınçtan düşük basınca genişler ve sıcaklığı düşer. Sonraki aşamada, soğutucu akışkan buharlaştırıcı yardımıyla soğutulmak istenen ortamdan ısı çeker. Bu döngü kompresör çalıştıkça devam etmektedir (Kulkarni, Chavali ve Dikshit, 2023; Çengel ve Boles, 2015).

Soğutma çevrimlerinde genel olarak kılcal borular, geometrilerine bağlı olarak düz veya sarmal olarak ve sistemin emiş hattına ısı transferi olup olmamasına göre adyabatik veya adyabatik olmayan kılcal boru sistemleri olarak sınıflandırılabilirler. Şekil 1A ve Şekil 1B ile adyabatik ve adyabatik olmayan kılcal boru içeren buhar sıkıştırımlı sistemlerin, genel şeması ve P-h (basınç-entalpi) diyagramı gösterilmiştir. Adyabatik bir kılcal borulu sistemlerde, çevre ile ısı alışverişi ihmal edilebilir ölçüdedir. Adyabatik olmayan kılcal borulu sistemlerde ise, kılcal boru emiş hattına lehimlenmiştir. Böylelikle, kılcal boru ile emiş hattında ısı değişimi gerçekleşebilmektedir (Şekil 1B). Soğutucu akışkan adyabatik kılcal boruda genellikle izentalpik bir süreç gerçekleşirken, adyabatik olmayan kılcal boruda entalpi değeri azalmaktadır. Soğutma sistemlerinde, adyabatik olmayan kılcal boru kullanıldığında, kılcal borudan emiş hattına bir ısı geçişi gerçekleştiği için, buharlaştırıcı girişindeki kuruluk derecesi ve özgül entalpi düşmektedir. Bu da soğutma kapasitesinde yani buharlaştırıcının ortamdan elde ettiği ısı miktarında artışa yol açmaktadır. Buna ek olarak, bu sistemin bir avantajı ise, soğutucu akışkanın kompresöre kızgın buhar olarak girmesini sağlamak ve kompresörün buhar fazında çalışmasını garanti etmektedir. Böylelikle, kompresörün zarar görmesi ve sistemin emme hattındaki havadaki nemden kaynaklı oluşan yoğuşma engellenir. Ancak, emme hattındaki bu sıcaklık artışı kompresörün harcadığı enerjiyi arttırmaktadır.



Şekil 1. Soğutma Çevrimi. A) Adyabatik B) Adyabatik Olmayan Kılcal Boru Sistemi (Rasti, Ban ve Jeong, 2017; Xu ve Bansal, 2002)

Yanal ve eş merkezli olmak üzere iki tip adyabatik olmayan kılcal boru sistemi olmasına rağmen, üretimi kolaylığı ve yüksek ısı değişim verimliliği nedeniyle yanal tip kılcal boru daha sık kullanılmaktadır (bkz. Şekil 2) (Rasti ve diğ., 2017; Sarker ve Jeong, 2012). Bu çalışmada deneyleri gerçekleştirilen soğutma sisteminde, yanal adyabatik olmayan kılcal boru sistemi kullanılmıştır.



Şekil 2. Adyabatik Olmayan Kılcal Boru Tipi A) Yanal B) Merkezi (Sarker ve Jeong, 2012)

Soğutma sistemlerinde, HCFCs, HFCs (R134a, R404A, R410A, R32, vb.), HFOs (R1234yf, R1234ze, ve karışımları), HCs (R290, R600a, vb.), Doğal soğutucular (R717, R744, vb.), ve birçok akışkan tipi, soğutucu akışkan olarak kullanılabilir (Gao, Cui, Jing, Zhang ve Zhang, 2021). CFC ve HCFC soğutucu akışkanlar, yüksek ozon inceltme potansiyeline (ODP) ve/veya küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahiptir. R134a, R125, R32 ve R410A gibi HFC soğutucu akışkanlarının ODP değeri sıfır olmasına rağmen GWP değerleri çok yüksektir. Bununla birlikte, ultraviyole ışınımın etkisi altında, Cl serbest radikalleri içeren bu tür soğutucu akışkanların ozon tabakasına zarar verdiği ve küresel ısınmaya sebep olduğu doğrulanmıştır (Zheng ve diğ., 2022). Ozon tabakasına zarar veren ve küresel ısınmaya yol açan bu tip soğutucu akışkanların kullanımı, Kyoto protokolü, Montreal protokolü, F-Gaz Avrupa Konseyi düzenlemeleri gibi protokoller ve düzenlemeler ile kısıtlanmıştır (Roy ve Halder, 2020).

Bir doğal hidrokarbon olan R290 (Propan) diğer soğutma akışkanlarına göre daha düşük viskozite, yüksek termal iletkenlik gibi iyi termofiziksel özelliklere sahiptir (Zhao, Yuan, Gao, Wang ve Yan, 2019). Bunun yanında, düşük üretim sıcaklığı, metallerde korozyon oluşturmaması, sıfır ODP ve ihmal edilebilir GWP değerine sahip olması neticesinde, R290 diğer soğutucu akışkanlara kıyasla rekabetçi bir alternatif olduğu gösterilmiştir. Çabuk tutuşma özelliği R290 akışkanın bir dezavantajı olmasına rağmen, çevre dostu olması ve yüksek soğutma performansına sahip olması neticesinde bu dezavantajını dengelemektedir (Gao, He, Cai ve Fan, 2020; Yadav, Liu ve Kim, 2022). Bilimsel literatürde R134a akışkanının düşük GWP alternatifi olarak birçok akışkan test edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, R290, R600a ve bu hidrokarbon akışkanların karışımlarının birçok açıdan R134a akışkanına uygun alternatifler oldukları gösterilmiştir (Jwo, Ting ve Wang, 2009; Kulkarni, Chavali ve Dikshit, 2023; Sánchez ve diğ., 2017, Sánchez ve diğ., 2022; Wongwises ve Chimres, 2005).

Bu çalışmalara örnek olarak; Sanchez ve diğ. (2022), R134a, R152a, R1234yf, R290, R1270, R600a ve R744 soğutma akışkanları kullanarak bir ticari kutu soğutucusu üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, enerji harcama bakımından en verimli akışkanın R290 olduğunu ve R290 akışkanının R134a akışkanına oranla %27.5 daha az enerji tükettiğini gözlemlemişlerdir. Elbel, Visek ve Hrnjak (2016), R134a akışkanına alternatif olarak doğal soğutucu akışkanlar olan R744 (CO₂) ve R290 kullanarak, ticari bir kutu soğutucusu üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, R744 akışkanı R134a akışkanına göre %27 daha fazla enerji harcarken, R290 akışkanı R134a akışkanına göre %9 daha az enerji harcamıştır. Bu çalışmanın bir diğer sonuçlarından bir diğer ise R744 akışkanı R290 akışkanı gibi yanıcı olmamasına rağmen R744 sistem maliyeti yüksektir ve yüksek hava sıcaklıklarında enerji verimliliği düşmektedir. Ancak, R744 akışkanın yüksek hava sıcaklıklarında bile tatmin edici sonuçlar elde ettiklerini yayınlamışlardır.

Literatürde araştırmacılar ticari soğutucuların enerji tüketimlerini incelemek ve azaltmak için birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Chaomuang, Flick ve Laguerre (2017) yayınladıkları derleme çalışmasında, açık ve kapalı ticari soğutucularının performansını, hem sıcaklık dağılımı hem de enerji tüketimi bakımından, deneysel ve sayısal yaklaşımlarla iyileştirme girişimlerini incelemişlerdir. Ticari soğutucuların enerji tüketiminin azaltılmasındaki en önemli girişimlerden biri, ticari soğutucuyu kapalı (ön kapılı) olarak tasarlamaktır. Bu çözüm ile daha iyi sıcaklık homojenliğinin yanı sıra %70'e varan enerji tasarrufu sağlanabileceği kanıtlanmıştır. Fricke ve Becker (2010), birbiri ile aynı özellikteki iki farklı süpermarkette açık ve kapalı ticari soğutucuların enerji harcaması bakımından karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, açık olarak tasarlanan ticari soğutucunun 1.3 kat daha fazla enerji harcadığı tespit edilmiştir. Benzer bir sonuç da, 2015 yılında Yeni Zelanda'da yayınlanan raporda elde edilmiştir. Ticari soğutuculara kapı eklenmesi halinde, %42 enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir (Robertson, 2015).

Chaomuang, Flick, Denis ve Laguerre (2019), yayınladıkları makalede, kapalı ticari soğutucularının çalışma koşullarını, kapı açma sıklığını, ortam sıcaklığı etkilerini ve kullanılan hacimlerin yüzdesi gibi enerji ve ısıl performansı önemli ölçüde etkileyen değişkenleri deneysel olarak incelemişlerdir. Kapı açma sıklığı saatte sırasıyla 10 ve 60 olarak ayarlandığında kompresörün çalışma yüzdesinin %25'den %44'e yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Dahası, ürün sıcaklığının dış ortam sıcaklığından ve kapı açıp kapama sıklığından doğrudan etkilendiği ve özellikle ön bölgedeki ürünlerin yüksek sıcaklığa en fazla maruz kalan bölge olduğu bu çalışmada vurgulanmıştır.

Ocak, Koşan, Erten, Erdoğan ve Öder (2023) yayınladıkları makalede, kapalı ticari soğutucularında kullanılan kompresör teknolojilerinin enerji verimliliğine önemli ölçüde katkı sağladığını göstermişlerdir. Çalışmada, sabit hızlı kompresör ve değişken hızlı kompresör karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak değişken hızlı kompresör %25.9 daha az enerji harcadığı gösterilmiştir.

Ticari soğutucularda enerji verimliliği bakımından gelecek vaat eden bir başka yöntem ise faz değiştirici malzemelerin kullanılmasıdır. Selvnes, Allouche, Manescu ve Hafner (2021), hazırladıkları derleme çalışmasında, soğutma sistemlerine uygulanan faz değiştiren malzemeler hakkındaki son gelişmeleri kapsamlı olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzemelerin kullanılması sonucunda, birçok ticari soğutucuda toplam enerji harcaması düşmüştür ve maksimum kabin sıcaklığında ise iyileşmeler sağlanmıştır. Beek ve Hans (2014), gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, ticari kutu soğutucusunun arka kanalına uyguladıkları faz değiştirici malzeme sayesinde, soğutucudaki enerji harcamasında %4-10 arasında bir düşme sağlamışlardır (Beek ve Hans, 2014). Mađerić, Pavković ve Lenić

(2019), gizli ısı depolu (buzlu su) kutu soğutucusu üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, termostatı bir buz bankası rölesiyle değiştirilmesi neticesinde, enerji tüketiminde %15'e varan bir azalma elde etmişlerdir.

Bilimsel literatürde, kapalı ticari kutu soğutucularındaki ortalama kutu sıcaklıklarının enerji harcamasına etkisinin yeterince araştırılmadığı tespit edilmiştir. Bu açıdan, çalışma kapsamındaki deneylerde, ticari kutu soğutucusu, K1 ve K4 kutu sıcaklık sınıflarında ve gece - gündüz modlarında enerji tüketimi deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, R290 (90 gr) soğutucu akışkanına sahip, yanal tip adyabatik olmayan kılcal boru sistemli, aç/kapa kontrolü ile çalışan pistonlu kompresör içeren, dikey ve kapalı cam kapılı bir ticari kutu soğutucusu kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı gece-gündüz modlarının ve kutu sıcaklıklarının enerji verimliliğine etkisini araştırmaktır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma neticesinde, soğutucudaki kutu sıcaklıklarının ortalama $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ değiştirilmesinin enerji tüketiminde %2.83-%5.37 azalmaya yol açtığı gösterilmiştir. Bu noktada, ticari soğutucularının içerisindeki kutuların sıcaklıklarının en uygun sıcaklıkta ayarlanmasının enerji tüketimi açısından gerekliliği bu çalışmanın önemli sonuçlarından biridir.

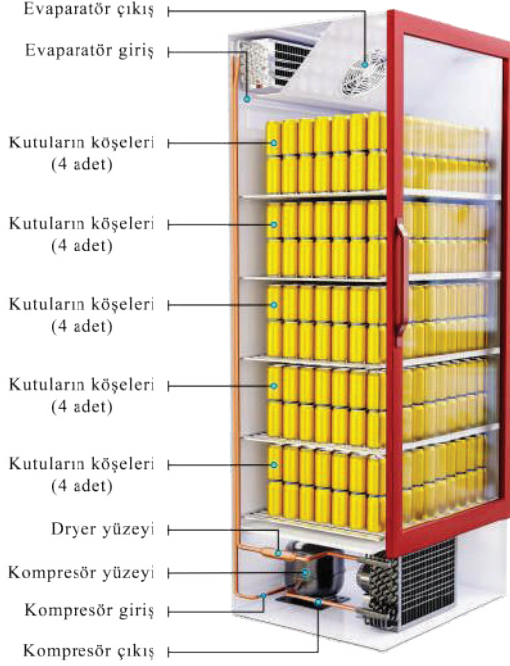
2. Metodoloji

Bu çalışmada, üzerinde testleri gerçekleştirilen ticari kutu soğutucusu Şekil 3 ile gösterilmiştir. Ticari kutu soğutucusun testleri toplam 700 adet kutu ile tam dolu olarak gerçekleştirilmiştir. Kutuların içerisi %33 oranında propilen glikol ve %67 oranında su ile doldurulmuştur. Deneyler, $25^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\pm 2\%$ bağıl nem sağlayan PID (Oransal İntegral, Türevsel) deneyleyici algoritması ile kontrol edilen bir iklimlendirme odasında gerçekleştirilmiştir.



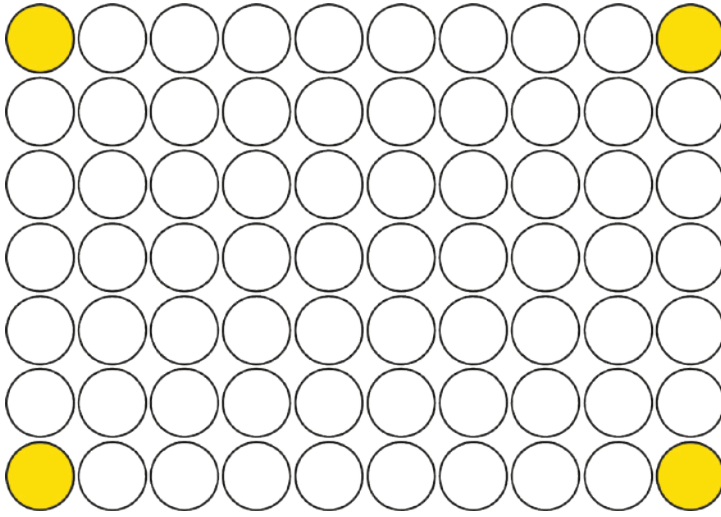
Şekil 3. Testi Gerçekleştirilen Ticari Kutu Soğutucusu

İklimlendirme odası ve deney düzeneği TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak kalibre edilmiş ve kurulmuştur. Ticari kutu soğutucunun üzerine kurulan deney düzeneği ve sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 4 ile gösterilmiştir. Şekil 4’de anlatım ve açıklama kolaylığı açısından ticari soğutucu sistemi basitleştirilerek gösterilmiştir.



Şekil 4. Sıcaklık Ölçüm Noktaları

Deney düzeneğinde termokupllar, kutuların yüzeyine, kompersörün emme - basma hattı üzerine, kompresörün dış üst yüzeyine, dryer yüzeyine ve evaporatörün hava ve giriş çıkış kısımlarına yerleştirilmiştir. Kutuların üzerindeki termokupllar, her bir raftaki kutu paketlerinin köşelerinde olacak şekilde konumlanmıştır (bkz. Şekil 5). Böylelikle, kutular üzerinden toplam 20 noktadan sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, deney kapsamında toplam 26 noktadan sıcaklık ölçümü sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan t tipi termokupllar bir panele bağlanmakta ve termokuplların Bakır ve Nikel telleri ucunda seebeck etkisiyle gerçekleşen mV değişimi bir program sayesinde okunabilmektedir.



Şekil 5. Bir Raf Üzerindeki Ölçülen Kutuların Konumları. Sarı Renkteki Kutulardan Ölçüm Alınmıştır (TS EN ISO 22044:2021)

Güç Analizörü, sistemin (kompresör, fanlar, ısıtkılandırıcılar, elektronik cihazlar, vb.) toplam harcadığı gücü ölçmek için soğutucunun güç çıkışına bağlanmıştır. Test düzeneğindeki sensörlerden elde edilen veriler 1 dakikalık zaman aralığı ile 24 saat boyunca kaydedilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan sensörlerin verileri Tablo 1 ile gösterilmiştir.

Tablo 1. Sensörlerin Özellikleri

Tipi	Marka	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
Güç Analizörü	Yokogawa	V= 0-2kV A=0-20A	0.1% (V) 0.1% (mA)
T tipi Termokupl	Agilent Technologies	Sıcaklık -200/350°C	±1°C
Nem Sensörü	HT-6830	10-95%RH	±1%RH

Ticari kutu soğutucusu enerji tasarrufu sağlamak amacıyla gece ve gündüz modlarına sahiptir. Gece modunda, led ışıklar kapatılmakta, kutu sıcaklıklarının daha yüksek sıcaklıklarda olmasına izin verilmekte ve soğutma sistemindeki bileşenlerin çalışma yüzdeleri değişmektedir (kompresör, fanlar, vb). Burada izin verilen sıcaklık değerleri soğutucu dolabın gece modundan gündüz modundaki sıcaklık aralıklarına maksimum 4 saatte tekrardan ulaşabilecek şekilde belirlenir. Çalış-

ma kapsamında, ticari kutu soğutucusu gece ve gündüz modlarında ve iki farklı sıcaklık sınıfında (K1 ve K4) test edilmiştir. K1 ve K4 sıcaklık sınıfları, TS EN ISO 22044:2022 standartına bağlı olarak, alüminyum içecek kutuları için uygulanan bir test standartıdır. Test edilen içecek kutuları, test sürecinde bu standartlar ile belirlenen sıcaklık aralıklarında sabit tutulmaktadır. Tablo 2 ile K1 ve K4 sıcaklık sınıflarının sıcaklık aralıklarını göstermektedir. Gece ve gündüz modları ve kutu sıcaklık sınıfları, bir soğutucu elektronik termostat yardımıyla kontrol edilmektedir. Bu açıdan, her bir deney gerçekleştirilmeden önce soğutucu elektronik kontrolcü üzerinde gerekli ayarlamalar uygulanmıştır. Deney başlangıcında elektronik kontrolcünün ayarlamaları tamamlandıktan sonra, soğutucu sistem çalıştırılmıştır. Sistem kararlı hale ulaşana kadar beklenmiş ve sensörlerden elde edilen verilerin kaydedilmesi bu aşamadan sonra gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. K1 ve K4 Sıcaklık Sınıfları

Sınıf	Sıcaklık üst seviyesi (°C)	Sıcaklık alt seviyesi (°C)	Ortalama sıcaklık (°C)
K1	+7	0	+3,5
K4	+9	+1	+5

K1 sıcaklık sınıfında ölçülen kutu sıcaklıkları, ortam sıcaklığından 0°C ve 7°C arasına indirilmelidir. Ortalama kutu sıcaklığı ise 3.5°C veya daha düşük sıcaklıklarda olmalıdır. Bu değerler K4 sıcaklık sınıfında ise, maksimum 9°C, minimum 1°C ve ortalama 5°C olması gerekmektedir. Ölçülen kutuların anlık ortalama sıcaklığı Denklem (1) ile verilen eşitlik ile hesaplanabilir (TS EN ISO 22044:2021)

$$T_{ort} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (T_{kutu,k})_t \quad (1)$$

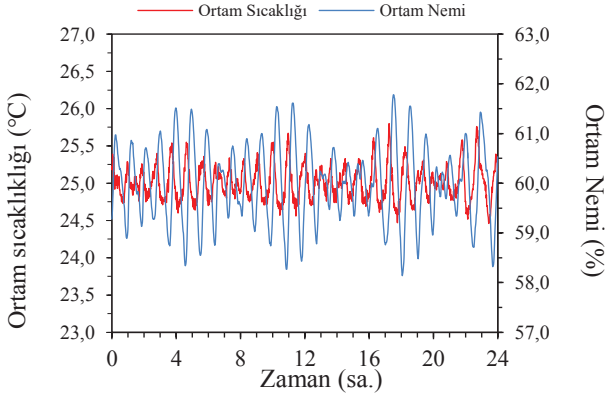
Denklem (1) ile verilen T_{ort} , ölçülen kutularının anlık ortalama sıcaklığı, N , ölçülen kutu miktarı, k , her bir kutunun indeksi, t , anlık ölçülen numunelerin zaman indeksi, $T_{kutu,k}$ anlık ölçülen kutu sıcaklığıdır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3. Sonuç

Dikey ve kapalı cam kapılı dolaplı bir ticari kutu soğutucusunun K1 ve K4 sıcaklık sınıflarında ve gece-gündüz modunda enerji tüketimi deneysel olarak incelenmiştir. Testler TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak 25°C ± 0.8°C sıcaklık ve %60 ± %2 bağıl nem altında 1 dakikalık kayıt aralıkları ile 24 saat

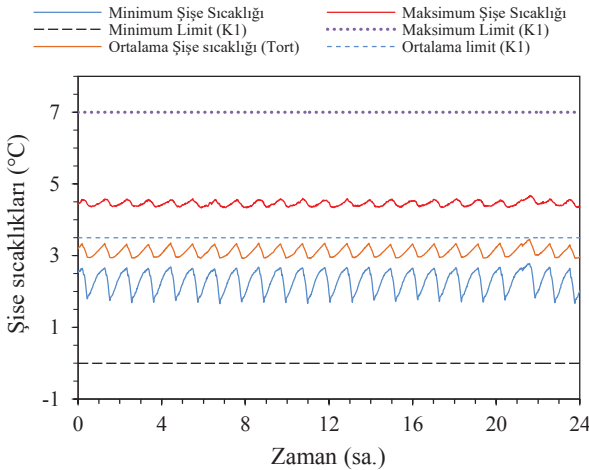
boyunca gerçekleştirilmiştir. Şekil 6 ile K1 sıcaklık sınıfına ve gündüz moduna ait deneylerin zamana göre ortam sıcaklığı ve nem değerleri görülmektedir.



Şekil 6. K1 Sıcaklık Sınıfına Ve Gündüz Moduna Ait Deneylerin Gerçekleştiği Nem Ve Sıcaklık Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

K1 ve K4 sıcaklık sınıflarında ve gece – gündüz modlarında iklimlendirme odasının nem ve sıcaklık değişimleri birbirine benzer olduğu için sadece K1 sıcaklık sınıfı ve gündüz moduna ait veriler gösterilmiştir (bkz. Şekil 6).

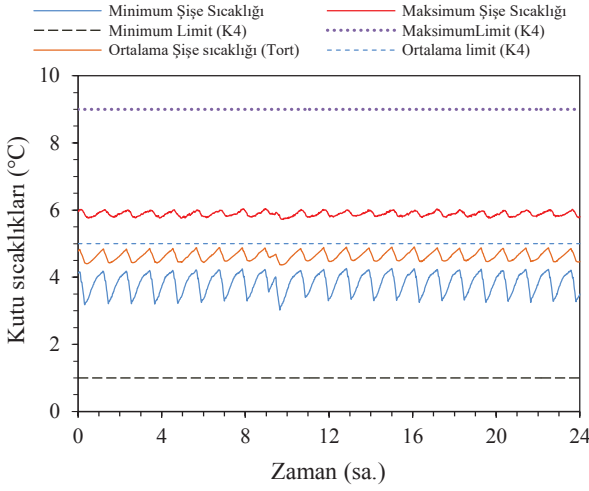
Gündüz modunda K1 ve K4 sıcaklık sınıflarına ait deneylerde ölçülen kutu sıcaklıklarının zaman ile değişimi sırası ile Şekil 7 ve Şekil 8 ile verilmiştir.



Şekil 7. K1 Sıcaklık Sınıfına ve Gündüz Modu Ait Kutu Sıcaklıkların Zamana Göre Değişimi

Şekil 7 ile verildiği gibi, kutuların tamamının sıcaklıkları limit değerler olan 0°C-7°C arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Ölçülen kutuların test boyunca maksimum sıcaklığı ise 4.7°C'dir. Bu deneyde, 20 adet kutunun tamamının ortalama sıcaklığı 3.4°C-2.8°C arasında değiştiği ölçülmüştür. Sonuç olarak, K1 sıcaklık sınıfında ve gündüz modu deneylerinde anlık ölçülen ortalama kutu sıcaklıkları, 3.5°C ortalama sıcaklık limitinin altında tutulduğu gösterilmiştir.

K4 sıcaklık sınıfına ve gündüz modu ait kutu sıcaklıklarının zamana göre değişimi Şekil 8 ile gösterilmiştir.



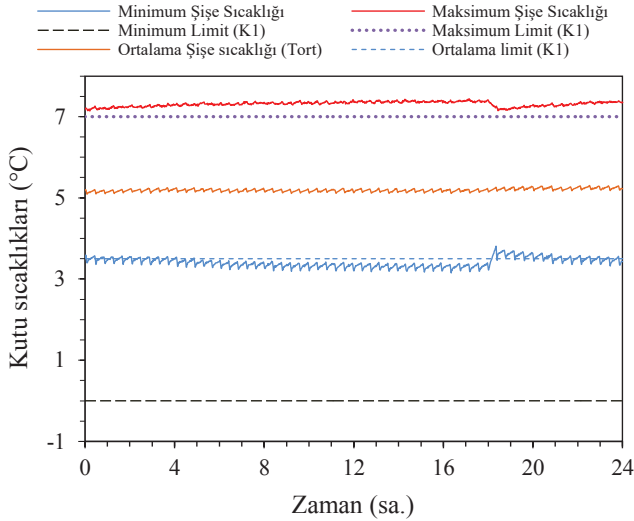
Şekil 8. K4 Sıcaklık Sınıfına ve Gündüz Modu Ait Kutu Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

K4 sıcaklık sınıfına ve gündüz moduna ait deneylerde de K1 sıcaklık sınıfına ait deneylere benzer bir şekilde, tüm kutu sıcaklıklarının limit değerler (1°C-9°C) arasında olduğu gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 3). Ölçümü gerçekleştirilen kutuların deney boyunca maksimum sıcaklığı 6°C olarak ölçülmüştür. Tüm kutuların ortalama sıcaklığı ise 4.6°C olarak ölçülmüştür. K4 sıcaklık sınıfına ve gündüz moduna ait deneylerde anlık ölçülen ortalama kutu sıcaklıkları, 5°C ortalama sıcaklık limitinin altında tutulduğu gözlemlenmiştir.

TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak gerçekleştirilen K1 ve K4 sıcaklık sınıflarında ve gündüz moduna ait deneylerin belirtilen standarta göre başarılı olduğu gösterilmiştir.

Gece modunda K1 ve K4 sıcaklık sınıflarına ait deneylerde ölçülen kutu sıcaklıkları sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10 ile verilmiştir. Gece modu deneylerinde, gündüz modundan farklı olarak, enerji tasarrufu sağlanması amacıyla, kutu sıcaklıkları

gündüz moduna göre daha yüksek tutulmaktadır. Gece modunda, termostat ve gömülü algoritmalar yardımıyla sistem komponentlerinin kontrolü sağlanmaktadır. Bu algoritmalar, kompresörün açılma kapanma frekanslarını ayarlamakta, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı fan kontrollerini sağlamaktadır.

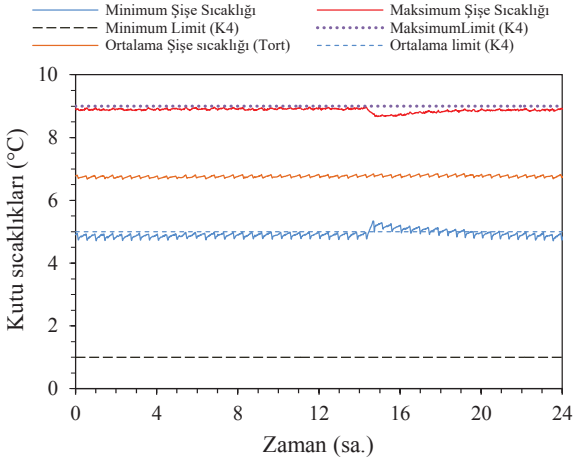


Şekil 9. K1 Sıcaklık Sınıfına ve Gece Modu Ait Kutu Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

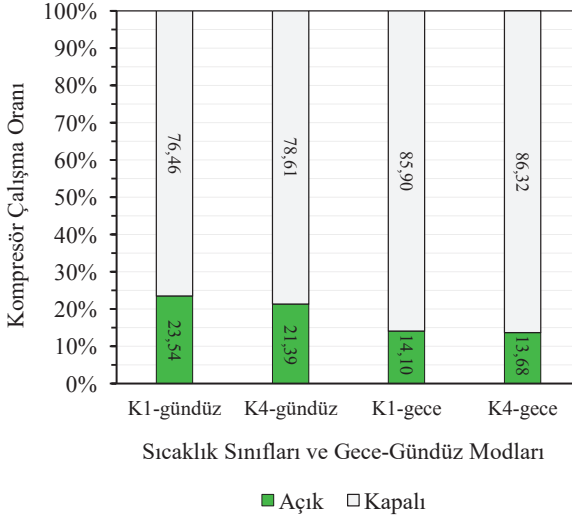
Şekil 9 ile görülebileceği gibi, K1 sıcaklık sınıfına ve gece modu ait deneylerde, deney boyunca ölçülen minimum, ortalama ve maksimum kutu sıcaklıkları sırasıyla, 3.2°C, 5.2°C ve 7.4°C'dir. K4 sıcaklık sınıfına ve gece modu ait deneylerde ise, ölçülen minimum, ortalama ve maksimum kutu sıcaklıkları sırası ile 4.7°C, 6.8°C ve 9°C'dir (bkz. Şekil 10)

Şekil 11 ile çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, kompresörün çalışma oranları gösterilmiştir. Çalışma oranı, 24 saat boyunca uygulanan deneylerde kompresörün açık kaldığı sürenin 24 saate oranı olarak ifade edilebilir. Deneyler kapsamında, en yüksek enerji harcayan komponent kompresördür. Bu açıdan, kompresörün çalışma oranları, sistemin enerji harcaması hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

K1-gündüz modu en yüksek çalışma yüzdesine sahiptir ve bu değer %23.54'dir. Bir başka deyişle, kompresör 5 saat 39 dakika açık kalmıştır. Bu değeri, %21.39 (5 saat 8 dakika kompresör açık kalma süresi) ile K4-gündüz deneyleri takip etmektedir. K1-gece ve K4-gece deneylerinde ise kompresörün açık kalma süreleri sırasıyla, 3 saat 23 dakika ve 3 saat 17 dakikadır.



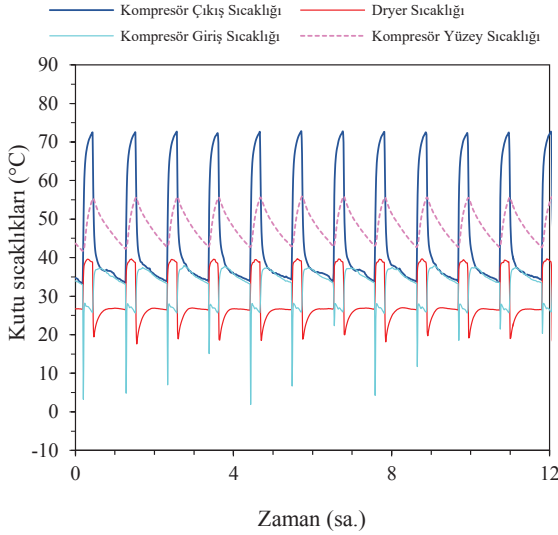
Şekil 10. K4 Sıcaklık Sınıfına ve Gece Modu Ait Kutu Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi



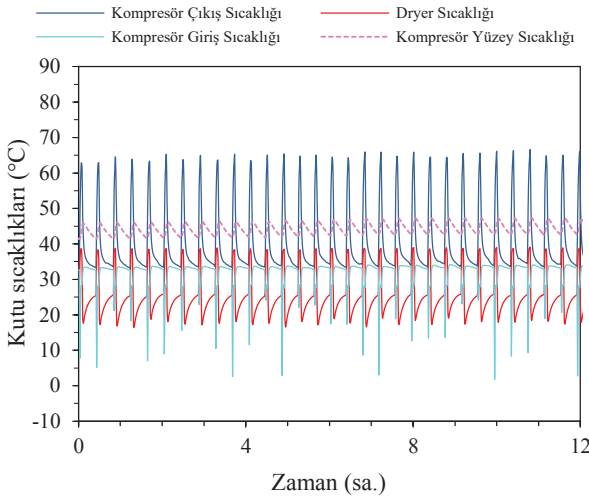
Şekil 11. Kompresörün Çalışma Oranı

K1-gündüz ve K1-gece modları deneylerinde kompresörün ve dryer sıcaklıklarının zamana göre değişimi sırasıyla, Şekil 12 ve Şekil 13 ile gösterilmiştir. Deneylerde, kompresör giriş, çıkış ve üst yüzeyinden ve yoğunlaştırıcı çıkışında yer alan dryer üzerinden sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 24 saatlik bir periyotta gerçekleşmesine rağmen Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterim kolaylı-

ği açısından 12 saatlik periyotlar halinde gösterilmiştir. K1 ve K4 sıcaklık sınıfları için kompresör sıcaklığı döngüleri ve değerleri benzer olduğu için sadece K1 sıcaklık sınıfına ait kompresör sıcaklıkları gösterilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 13 değerlendirildiğinde, gündüz ve gece modlarındaki kompresörün çalışma frekansının önemli ölçüde farklı olduğu gözlemlenebilir. K1 sıcaklık sınıfı deneyleri süresince, gündüz modunda kompresör toplam 24 defa açılıp kapandığı ve gece modunda ise bu frekans değerinin 60 olduğu gözlemlenmiştir.

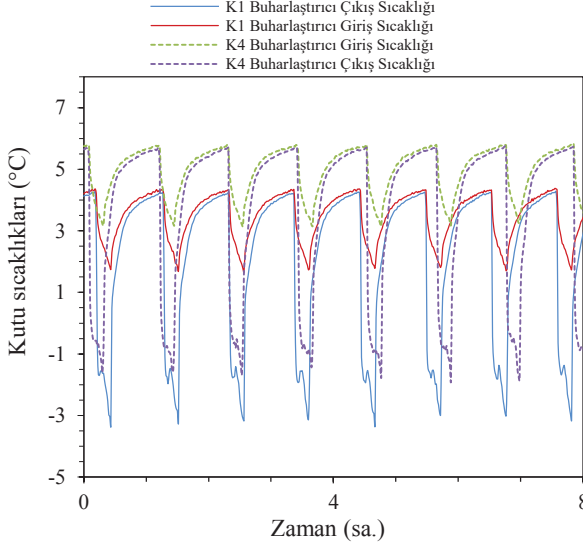


Şekil 12. K1 -Gündüz Modu için Kompresör Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

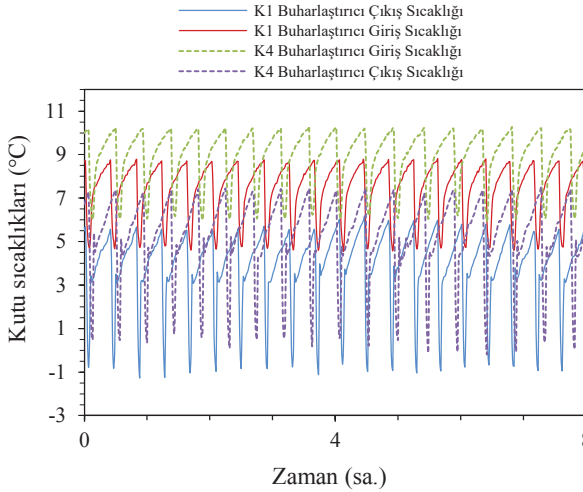


Şekil 13. K1 -Gece Modu için Kompresör Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi

K1 ve K4 gündüz ve gece modları için Buharlaştırıcı üzerinden akan hava sıcaklıklarının zamana göre dağılımı sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15 ile gösterilmiştir. Grafikler gösterim kolaylığı açısından 8 saatlik periyotlar halinde sunulmuştur.



Şekil 14. K1 ve K4 Gündüz Modu İçin Buharlaştırıcı Hava Sıcaklıklarının Zamana Göre Değişimi



Şekil 15. K1 ve K4 Gece Modu İçin Buharlaştırıcı Hava Sıcaklıklarının Zaman Göre Değişimi

Tablo 3 ile kompresörde, dryerde ve buharlaştırıcıda ölçülen sıcaklıkların maksimum ve minimum değerleri sayısal olarak gösteriştir. Tablo 3, Şekil 12, 13, 14 ve 15 ile verilen grafiklerin bir özeti olarak değerlendirilebilir.

Tablo 3. Sıcaklık Ölçüm Noktalarının Maksimum Ve Minimum Değerleri (°C)

	K1 Gündüz		K4 Gündüz		K1 Gece		K4 Gece	
	maks	min	maks	min	maks	min	maks	min
Sıcaklık ölçüm noktaları								
Kompresör giriş sıcaklığı	38.2	1.37	37.9	2.72	34.2	1.8	34.3	3.47
Kompresör Çıkış sıcaklığı	73.2	33.3	73.3	32.8	66.3	33.2	66.2	32.9
Dryer sıcaklığı	39.7	16.9	40.1	17.4	39.1	16.5	39.4	16.3
Kompresör yüzey sıcaklığı	56.3	41.7	56.0	40.9	47.5	41.3	47.2	41.2
Buharlaştırıcı hava giriş sıcaklığı	4.4	1.7	5.8	3.1	8.8	4.52	10.3	5.9
Buharlaştırıcı hava çıkış sıcaklığı	4.3	-3.5	5.8	-1.9	6.3	-1.3	8.0	-0.1

Deney sonuçlarının özeti Tablo 4 ile verilmiştir. K1-gündüz ve K1-gece deneylerinde sırasıyla, toplam 3.255 kWh ve 1.379 kWh enerji harcanmıştır. K4 sıcaklık sınıfındaki deneylerde ise bu değerler gündüz modunda 3.089 kWh ve gece modunda 1.341 kWh olarak ölçülmüştür.

Tablo 4. 24 Deneysel Sonuçlarının Özeti

Deneysel değişkenler	Birim	K1 Gündüz	K4 Gündüz	K1 Gece	K4 Gece
Test odası sıcaklığı	°C	25	25	25	25
Test odası nemi	%	60	60	60	60
Maksimum kutu sıcaklığı	°C	4.7	6	7.4	9
Ortalama kutu sıcaklığı	°C	3.1	4.6	5.2	6.8
Minimum kutu sıcaklığı	°C	1.7	3	3.2	4.7
Kompresör çalışma yüzdesi	%	23.54	21.39	14.1	13.68
Kompresör aç/kapa frekansı	1/saat	1.03	0.96	2.48	2.22
Maksimum harcanan güç	W	410	414	389	392
Toplam tüketilen enerji	kWh	3.255	3.089	1.379	1.341

Sonuç olarak, K1 ve K4 sıcaklık sınıflarındaki gündüz modundaki ortalama sıcaklık farkı 1.5°C ve gece modundaki ortalama sıcaklık farkı ise 1.6°C olarak ölçülmüştür. Bu ortalama sıcaklık farkları sonucunda, K1 sıcaklık sınıfındaki enerji tüketimi K4 sıcaklık sınıfına göre, gündüz modunda %5.37 ve gece modlarında ise %2.83 daha yüksek olarak ölçülmüştür.

4. Tartışma

Bu çalışmada, ticari dikey ve kapalı cam kapılı bir ticari kutu soğutucusu kutuların K1 ve K4 sıcaklık sınıflarındaki ve sistemin gece-gündüz modlarındaki enerji tüketimi değerleri ve diğer soğutma sistemi bileşenlerinin sıcaklık verileri deneysel olarak incelenmiştir. TS EN ISO 22044:2022 standartına uygun olarak gerçekleştirilen gündüz modu deneylerinin, her iki sıcaklık sınıfında da başarılı olduğu gösterilmiştir. Gündüz modundaki tüm deneylerde, tüm kutu sıcaklıkları belirlenen maksimum ve minimum değerler arasında kalmış olup, kutuların ortalama sıcaklıkları ise belirlenen ortalama limit sıcaklığının altında kalmıştır. Dahası, gündüz modunda, kutuların ortalama sıcaklıklarındaki 1.5°C'lik bir değişim neticesinde enerji harcanmasında %5.37 değerinde bir artış olduğu gösterilmiştir. Gece modunda ise, kutuların ortalama sıcaklıklarındaki 1.6°C sıcaklığındaki bir artış, enerji harcanmasında %2.83 değerinde bir yükselişe yol açmıştır. Bu açıdan, bir soğutucu içerisindeki kutu sıcaklıklarının optimum sıcaklıkta tutulması, enerji verimliliği bakımından oldukça önemli olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir.

Gösterimler

- COP : Soğutma etkinlik katsayısı
HCFC : Kloroflorokarbon
HFC : Hidroflorokarbon
HFO : Hidrofloroolefin
HC : Hidrokarbon
CFC : Kloroflorokarbon
ODP : Ozon inceltme potansiyeli
GWP : küresel ısınma potansiyeli

Kaynakça

- Chaomuang, N., Flick, D., Denis, A. ve Laguerre, O. (2019). Influence of operating conditions on the temperature performance of a closed refrigerated display cabinet. *International Journal of Refrigeration*, 103, 32-41. doi:10.1016/j.ij-refrig.2019.03.031
- Chaomuang, N., Flick, D. ve Laguerre, O. (2017). Experimental and numerical investigation of the performance of retail refrigerated display cabinets. *Trends in Food Science & Technology*, 70, 95-104. doi:10.1016/j.tifs.2017.10.007
- Çengel, Y., & Boles, M., Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımı, 7. Baskı, Palme yayıncılık (2015)
- Elbel, S., Visek, M. ve Hrnjak, P. (2016). A Fair Comparison of CO₂ and Propane Used in Light Commercial Applications Featuring Natural Refrigerants.
- Fricke, B. ve Becker, B. (2010). Energy Use of Doored and Open Vertical Refrigerated Display Cases.
- Gao, E., Cui, Q., Jing, H., Zhang, Z. ve Zhang, X. (2021). A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry. *International Journal of Refrigeration*, 128, 104-117. doi:10.1016/j.ijrefrig.2021.03.025
- Gao, Y., He, G., Cai, D. ve Fan, M. (2020). Performance evaluation of a modified R290 dual-evaporator refrigeration cycle using two-phase ejector as expansion device. *Energy*, 212, 118614. doi:10.1016/j.energy.2020.118614
- Jwo, C.-S., Ting, C.-C. ve Wang, W.-R. (2009). Efficiency analysis of home refrigerators by replacing hydrocarbon refrigerants. *Measurement*, 42(5), 697-701. doi:10.1016/j.measurement.2008.11.006
- Kulkarni, S., Chavali, S. ve Dikshit, S. (2023). A review on analysis of Vapour Compression Refrigeration System (VCRS) for its performance using diffe-

- rent ecofriendly refrigerants and nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 72, 878-883. doi:10.1016/j.matpr.2022.09.085
- Mađerić, D., Pavković, B. ve Lenić, K. (2019). An experimental research on energy efficiency of a beverage cooler with the latent heat storage. *Applied Thermal Engineering*, 148, 270-277. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.11.026
- Ocak, C., Koşan, M., Erten, S., Nur Erdoğmuş, F. ve Öder, M. (2023). Comparison of different compressor technologies for refrigerated display cabinet: Experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 81, 74-80. doi:10.1016/j.matpr.2023.01.213
- Rasti, M., Ban, J. H. ve Jeong, J. H. (2017). Development of a continuous empirical correlation for refrigerant mass flow rate through non-adiabatic capillary tubes. *Applied Thermal Engineering*, 127, 547-558. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.070
- Robertson G., (2015) Trial Retrofit of Doors on Open Refrigerated Display Cabinets Final Report.
- Roy, Z. ve Halder, G. (2020). Replacement of halogenated refrigerants towards sustainable cooling system: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100027. doi:10.1016/j.cej.2020.100027
- Sánchez, D., Andreu-Nácher, A., Calleja-Anta, D., Llopis, R. ve Cabello, R. (2022). Energy impact evaluation of different low-GWP alternatives to replace R134a in a beverage cooler. Experimental analysis and optimization for the pure refrigerants R152a, R1234yf, R290, R1270, R600a and R744. *Energy Conversion and Management*, 256, 115388. doi:10.1016/j.enconman.2022.115388
- Sánchez, D., Cabello, R., Llopis, R., Arauzo, I., Catalán-Gil, J. ve Torrella, E. (2017). Energy performance evaluation of R1234yf, R1234ze(E), R600a, R290 and R152a as low-GWP R134a alternatives. *International Journal of Refrigeration*, 74, 269-282. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.09.020
- Sarker, D. ve Jeong, J. H. (2012). Development of empirical correlations for non-adiabatic capillary tube based on mechanistic model. *International Journal of Refrigeration*, 35(4), 974-983. doi:10.1016/j.ijrefrig.2012.01.021
- Selvnes, H., Allouche, Y., Manescu, R. I. ve Hafner, A. (2021). Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22, 100807. doi:10.1016/j.tsep.2020.100807
- TS EN ISO 22044:2021, Ticari içecek soğutucuları Sınıflandırma, gereklilikler ve test koşulları.

- Van Beek, M. ve de Jong, H. (2014). Reducing Display Bottle Cooler Energy Consumption Using PCM As Active Thermal Storage.
- Wongwises, S. ve Chimres, N. (2005). Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator. *Energy Conversion and Management*, 46(1), 85-100. doi:10.1016/j.enconman.2004.02.011
- Xu, B. ve Bansal, P. K. (2002). Non-adiabatic capillary tube flow: A homogeneous model and process description. *Applied Thermal Engineering*, 22(16), 1801-1819. doi:10.1016/S1359-4311(02)00110-2
- Yadav, S., Liu, J. ve Kim, S. C. (2022). A comprehensive study on 21st-century refrigerants - R290 and R1234yf: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182, 121947. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121947
- Zhao, H., Yuan, T., Gao, J., Wang, X. ve Yan, J. (2019). Conventional and advanced exergy analysis of parallel and series compression-ejection hybrid refrigeration system for a household refrigerator with R290. *Energy*, 166, 845-861. doi:10.1016/j.energy.2018.10.135
- Zheng, H., Tian, G., Zhao, Y., Jin, C., Ju, F. ve Wang, C. (2022). Experimental study of R290 replacement R134a in cold storage air conditioning system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 36, 102203. doi:10.1016/j.csite.2022.102203



COMPARISON OF MACHINABILITY OF AL-4.5%CU/TIB2/3P MMC FOR MULTI-LAYER COATED INSERT: VALIDATED FEM AND STATISTICAL APPROACHES

Erkan ÖZTÜRK^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ondokuz Mayıs University, Samsun

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-7056-718X>

Keywords

Multi-layer coated tool, finite element method, grey relation analysis

Abstract

Aluminum-based Metal Matrix Composites (MMC) are commonly used in metal-cutting applications due to their better mechanical and physical properties, such as high strength, hardness, and low weight. Also, modern coating applications, especially multi-layer coated tools, have cutting-edge potential for relieving the difficulties of machining MMCs to improve insert performances. Therefore, this study aimed to reveal the turning Al-4.5%Cu/TiB₂/3p performance of the multi-layer coated cemented carbide insert with verified FEM and statistical approaches. Different coating materials, two and three of which were soft and hard, were appointed at different thicknesses and sequences in the design of experimentally calibrated simulations. The Grey Relation Analysis (GRA) was set to investigate the multi-layer coated insert performance for turning the MMC concerning the resultant cutting forces (FR) and maximum insert temperature (T_{max}). The optimal multi-layered coating was found at levels 4-2-4-3-2 for the factors of coating materials: tungsten disulfide (WS₂), molybdenum disulfide (MoS₂), titanium nitride (TiN), aluminum oxide (Al₂O₃), and titanium carbo-nitride (TiCN), respectively. The contribution rates of each factor were significant concerning the General Linear Model (GLM) at 47.13% and 24.43% for WS₂ and Al₂O₃ coatings materials, respectively. In the future, multi-layered coatings can be a valuable solution for the difficulties of machining the MMCs.

* erkan.ozturk@omu.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1329342

AL-4.5%CU/TIB2/3P MMK'NİN ÇOK KATMANLI KAPLAMALI KESİCİ TAKIMLARLA İŞLENEBİLİRLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: DOĞRULANMIŞ FEM VE İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIMLAR

Anahtar kelimeler

Öz

Çok katmanlı kaplamalı kesici takım, sonlu elemanlar yöntemi, gri ilişkisel analiz

Alüminyum bazlı Metal Matris Kompozitler (MMK), yüksek mukavemet, sertlik ve düşük ağırlık gibi daha iyi mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı metal kesme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, modern kaplama uygulamaları, özellikle çok katmanlı kaplamalı takımlar, kesici takım performanslarını iyileştirerek MMK'ları işleme konusundaki zorlukları ortadan kaldırmada üstün bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle, çalışmada, doğrulanmış FEM ve istatistiksel yaklaşımla çok katmanlı kaplamalı sement karbür bir kesici takımın Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMK'nın tornalama performansını ortaya çıkarmak amaçlanmıştır. Deneysel olarak kalibre edilmiş ve seçilmiş bir simülasyon için farklı kalınlık ve dizilimlerde (iki adet yumuşak ve üç adet sert kaplama malzemesi için) istatistiksel olarak simülasyon tasarımı kurulmuştur. Gri İlişki Analizi (GRA) yardımı ile MMK malzemenin tornalanmasında çok katmanlı kaplamalı uç performansını kesme kuvvetlerinin bileşkesi (FR) ve maksimum uç sıcaklığı (T_{max}) baz alınarak araştırılmıştır. Optimum çok katmanlı kaplama, kaplama malzemeleri faktörleri için 4-2-4-3-2 seviyelerinde bulunmuş olup bu koşul sırasıyla: tungsten disülfid (WS₂), molibden disülfür (MoS₂), titanyum nitrür (TiN), alüminyum oksit (Al₂O₃), ve titanyum karbo-nitrürdür (TiCN). Her bir faktörün katkı oranları, Genel Doğrusal Model (GLM) ile incelenmiş, WS₂ ve Al₂O₃ kaplama malzemeleri için sırasıyla %47,13 ve %24,43 oranında anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Gelecekte çok katmanlı kaplamalar, MMK'ların işlenmesindeki zorlukları aşmak için değerli bir çözüm olabilirler.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 18.07.2023

Submission Date : 18.07.2023

Kabul Tarihi : 24.11.2023

Accepted Date : 24.11.2023

1. Introduction

Metal Matrix Composite (MMC) materials are strengthened by adding a carbon-based or ceramic material into a metal matrix to provide superior properties such as corrosion resistance, mechanical strength, elasticity modulus, etc. (Gürbüz, Şenel, & Koç, 2015; Senel & Gürbüz, 2021). The preference for MMC materials for engineering applications is gradually increasing due to their superior properties such as high strength, high young modulus, high toughness, high impact strength, enhancement wear resistance, high hardness, and low weight (Radhika, Subramaniam, & Senapathi, 2013; Rathodi & Pandey, 2017). Aluminum MMCs are primarily used in the automotive and aerospace industries for better corrosion and wear resistance (Joel & Xavier, 2018). Aluminum-based MMCs are mainly enhanced with hard ceramics; thus, the MMCs become difficult-to-cut materials (J. P. Chen, Gu, & He, 2020; Nicholls, Boswell, Davies, & Islam, 2017; Radhika et al., 2013). Therefore, many recent studies have directed to machining Al MMCs enhanced with ceramics. The parameters, such as tool wear, workpiece surface roughness, cutting forces, insert tip temperature, chip formation, etc., can be investigated during the machining of MMCs. For example, silicon carbide (SiC) (Bhushan, 2021; Das & Chakraborty, 2018; Swain, Das Mohapatra, Das, Sahoo, & Panda, 2020), aluminum oxide (Al_2O_3) (Prakash & Iqbal, 2018), and boron carbide (B4C) (Channabasavaraja, Nagaraj, & Srinivasan, 2016; Hiremath, Auradi, & Dundur, 2016; Saravanan & Mahendran, 2020) reinforcement Al MMCs have been trend investigations recently.

Denkena, Tonshoff, & Boehnke (2005) investigated the machinability of iron-rich Al MMC regarding tool wear aspect due to their lower density and high oxidation resistance properties, which presented a high potential for automotive and aerospace applications. The claim that “Economic cutting operations are currently not possible” was revealed. Modern coating applications have become a cure to solve the economic problems of machining MMCs to investigate the insert performances regarding tool wear, cutting forces, cutting parameters and temperatures, etc. Uncoated carbide inserts caused built-up-edge and coating inserts like TiN, TiAlN, and CrN might not eliminate this weakness (P. Roy, Sarangi, Ghosh, & Chattopadhyay, 2009). Akgün, Özlü, & Kara (2023) investigated the effect of PVD-TiN and CVD- Al_2O_3 coatings on the hard turning of AISI H13. The authors revealed that the CVD- Al_2O_3 coated insert was more effective than the PVD-TiN coated insert regarding the abrasion and adhesion mechanisms. MoS₂, a soft coating material, was used to solve the built-up edge and adhesion tendency by coating inserts (Harris, Vlasveld, Doyle, & Dolder, 2000). An investigation on tool wear performance during machining of SiC-reinforced ZA43 alloy MMC presented that coated tungsten carbide insert with triple layered with hard coating materials (Al_2O_3 , TiN, and TiCN) performed better than uncoated one according to tool wear aspect (Marigoudar & Sadashivappa, 2014).

Multi-layered coating of the tools has innovative potential for cutting applications for heavy-duty conditions due to the friction and high heat energy during the machining. S. Roy & Ghosh (2014) investigated the high-speed turning of AISI 4140 steel using nano-tube-based nanofluid in minimum quantity lubrication (MQL) by a multi-layer (TiN-Al₂O₃-TiCN) coated insert. The nanofluid MQL machining performance was compared to wet and dry machining conditions and performed better than the others. During the machining of hardened steel at or above 50 HRC, multi-layer coated carbide inserts have outperformed compared to single-layered coated carbide inserts (Kene, Orra, & Choudhury, 2016). Kara, Aslantas, & Çiçek (2016) predicted the cutting temperature of coated (TiCN+Al₂O₃+TiN and Al₂O₃) uncoated inserts for orthogonal cutting of AISI 316 L by an artificial neural network. C. S. Kumar & Patel (2018a) focused on the machining performance comparison of mono-layered AlCrN and multi-layer AlTiN coated Al₂O₃/TiCN-based mixed ceramic insert in turning of hardened AISI 52100 steel (62 HRC hardness). Multi-layer AlTiN coated inserts performed better anti-oxidation, anti-adhesion, and anti-abrasive behaviors than mono-layered AlCrN coated and uncoated inserts. Also, C. S. Kumar & Patel (2018b) continued to search the coating thickness effect of mono-layered AlCrN, and multi-layer AlTiN coated Al₂O₃/TiCN-based mixed ceramic insert during the machining of hardened AISI 52100 steel. They revealed that multi-layer AlTiN coated inserts showed better adhesion to the substrate. Lian, Mu, Liu, Chen, & Yao (2019) presented an exciting soft/hard composite coating aspect for multi-layered coating literature. The main motto was "The external soft coating layer on the hard coating layer played a significant role in decreasing cutting forces and temperatures because the soft coating layer had lower shear strength than general insert materials." They also investigated the coating thickness and material effects on turning of AISI 1045 steel as a three-dimensional numerical simulation aspect. Then, they proposed that the Soft/hard composite coating thickness ratio should have been 0.9:0.1. R. Kumar et al. (2019) investigated the optimal cutting parameters for turning JIS S45C structural steel with the multi-layer coated (TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN) carbide insert. They advised the optimal cutting parameters as cutting speed (Vc) 120 m/min, dept of cut (d) 0.3 mm, and feed (f) 0.05 mm/rev regarding the tool flank wear, surface roughness of the workpiece, and chip morphology. Interestingly, Tooptong, Nguyen, Park, & Kwon (2021) revealed a unified crater wear model combining the abrasive wear and dissolution wear for the multi-layer (TiN-Al₂O₃-TiCN) coated carbide insert during the machining of flake graphite iron, compacted graphite iron, and nodular graphite iron. The maximum crater wear was measured experimentally, and 2D FEM simulations determined the maximum cutting temperatures to guess the contributions from abrasive and dissolution wear. The crater wear differences for the three types of iron came from

the cutting temperature differences. U. Kumar & Senthil (2020) investigated the machining performance of the multi-layer (TiN-AlTiN) coated tungsten carbide insert during the dry turning Ti-6Al-4V. The focused originality of the search was revealing the machining performance of the insert as deep cryogenic treated at $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$ for a period of 36 h and then tempering in an electrical furnace at $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 6 hours. The cryogenic treatment achieved lesser surface roughness and cutting forces due to lowering the insert's thermal conductivity and increased wear resistance and hardness. In a recent study (Ranjan & Hiremath, 2022), 3D FEM simulation validated by the experiment of machining AISI 420 was performed using the multi-layer (TiN-TiCN- Al_2O_3 -TiN, TiN- Al_2O_3 -TiCN-TiN) coated and uncoated inserts. The coated inserts differed from each other regarding layer sequences and thickness of layers. The TiN-TiCN- Al_2O_3 -TiN multi-layer coated carbide insert was found to be more effective than the other inserts regarding the minimum generation of effective stress, cutting temperature, and cutting power.

Numerous 2D FEM studies of MMCs can be found in the literature describing the tool-particle interaction, particle orientation, tool wear, etc., but a few 3D FEM studies have been investigated. Pramanik, Zhang, & Arsecularatne (2007) investigated tool-particle interaction based on geometrical orientation, tool wear, and surface damage during the machining of Al matrix SiC particle reinforcement MMC using 2D FEM in the ANSYS/LS-DYNA software package. The particles were %20 by volume and were assumed to bond to the matrix perfectly. Stress/strain fields were determined for possible debonding and fracture. One of the limitations of the 2D FEM simulation was to challenge severe mesh distortion due to the nonuniform deformations in the chip removal. As a solution, chip formation was revealed by a self-designed continuous remeshing routine by modeling 2D orthogonal machining of Al/SiC MMC in the ABAQUS software package (Schulze, Zanger, Michna, Ambrosy, & Pabst, 2011). Another significant issue in the 2D FEM of the orthogonal machining MMCs was modeling the interface between reinforcement particles and base matrix. Umer et al. (2015) modeled the interface between reinforcement particles and base matrix using two concepts, with or without cohesive zone elements (CZE). The model could predict cutting forces, chip morphology, stresses, and temperatures by comparing CZE for Al/SiC MMC machining. CZE with a parting line approach was advised as the best model for the 2D FEM of the orthogonal machining to simulate serrated chips. Afterward, Ghandehariun, Kishawy, Umer, & Hussein (2016) modeled a 2D FEM of the orthogonal machining Al/ Al_2O_3 MMC to reveal a more comprehensive knowledge of particle-matrix interaction. Three concepts for particles positioned along, above, and below the cutting line were successfully simulated with the CZE model. Umer, Kishawy, Ghandehariun, Xie, & Al-Ahmari (2017) continued their studies by focusing on tool performance (PCD) using 2D FEM of the orthogonal machining Al/ Al_2O_3 and Al/SiC MMCs. While the model without CZE could accurately determine cutting

forces, tool stresses, and temperatures, the model with CZE could estimate the effect of matrix-particle interaction on tool stresses and machined surfaces. In addition, some recent studies did not choose the CZE for particle-matrix interactions for MMCs. Xiong, Wang, Jiang, Lin, & Shao (2018) focused on the 2D orthogonal cutting FEM of TiB₂/7075Al MMC to investigate the chip formation mechanism. The matrix-particle interaction was defined by Python programming, and the uncut chip part was created as an isotropic monophasic part without particles to solve high mesh distortion and computing times. Despite the self-programming, the other common method was to use matrix element failure (the debonding energy defined as Johnson-Cook damage law) surrounding the reinforcement particles by assuming the particles were perfectly bonded to the matrix (Josyula & Nara-la, 2018; Umer, Abidi, Abu Qudeiri, Alkhalefah, & Kishawy, 2020). Although the summarized literature focused on the 2D FEM analysis, which lighted the mechanics and particle-matrix interactions of the cutting process, the 3D FEM studies related to the turning of MMCs have been limited. During hot turning, Jadhav & Dabade (2016) simulated 3D FEM of Al/SiCp (10 and 30 % SiC particles) MMCs. They used the Deform 3D software package. Vc, d, f, and preheating temperatures were chosen as effective parameters to investigate. They modeled the material regarding to Johnson-Cook material model and 3D equivalent homogeneous material model data. Another recent investigation (X. Chen, Xie, Xue, & Wang, 2017) cited that 2D FEM analysis has its own disadvantages, which end up inconsistency with experimental cutting forces, and relatively discontinuous chip morphology. Thus, a 3D equivalent homogeneous material model was developed for the SiCp/Al6063/30p MMC to simulate the milling process in the ABAQUS software package. The experimental verification was provided for milling forces and chip shape within the 20% error band.

3D FEM simulations can be significant for machining optimizations (Ugur, 2022), accurately estimating cutting forces (Baris & Levent, 2021) (especially for radial cutting force), investigating preheating and different coating technologies, etc. Furthermore, the abovementioned investigations have stood limited to evaluating the performance of multi-layer coated inserts in the machining of Al MMCs. Also, Al-4.5%Cu/TiB₂/3p is a recently investigated MMC, especially its mechanical behavior due to its potential applications in the automobile and aerospace industries (Shaik Mozammil, Karloopia, Verma, & Jha, 2019; Shaik Mozammil, Koshta, & Jha, 2021; S. Mozammil, Koshta, Jha, & Swain, 2022). Based on the determined literature gap, the turning performance of a cemented carbide insert was investigated regarding the evaluation of multi-layer coated conditions under different coating thicknesses during the cutting Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC. Verified FEM and statistic approaches were used for the cutting performance, and optimum multi-layered coating types in terms of their sequence and thicknesses of each layer were revealed.

2. Materials and Methods

The insert's CAD design, FEM simulations for turning Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC, and the design of simulations for the multi-layered coating types in terms of their sequence and thicknesses were presented in detail in this section. Also, research and publication ethics were obeyed in this study.

2.1 CAD Model for Insert

The cutting tool geometry was selected similarly to the literature, which used experimental results of the turning Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC to calibrate the FEM simulations. Although the insert type was not given in the study, a technical drawing of the insert and insert specifications (insert material, nose radius, rake angle, etc.) was proposed (S. Mozammil et al., 2022). Some unremarked dimensions needed to design a 3D CAD file were determined from the technical drawing of the insert via the ImageJ software package by calibrating with certain measurements. So, the insert's CAD design and geometrical dimensions were created in CATIA V5, as shown in Figure 1.

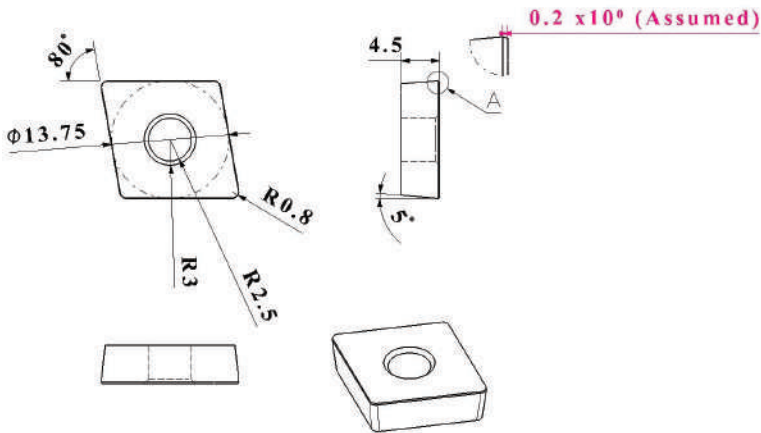


Figure 1. 2D Drawing and Isometric View of the Insert

2.2 FEM Simulations and Verification

A 3D FEM simulation was set by Deform 3D ver. 11.0 software package. A notebook with an eight-core 11th Gen Intel® Core™ I7 CPU, 32 GB RAM, and SSD technology performed all FEM simulations.

2.2.1 Geometric Characteristics of the Turning Process

The insert geometry was designed as shown in Figure 1. Also, the tool holder

specifications were selected regarding the experimental reference study (S. Mozammil et al., 2022). The inclination, rake, and tool cutting edge angles were set as -6 , -6 , and 95 , respectively. The workpiece geometry for the chip removal path was selected as a circular arc with a diameter of 33 mm (S. Mozammil et al., 2022) and a 10^0 angle for the more realistic FEM simulation. Also, the workpiece was fixed by setting the zero velocity of the nodes in the Y-Z and X-Y axes for the bottom and back surfaces, respectively. Figure 2 summarizes the geometric characteristics of the turning process.

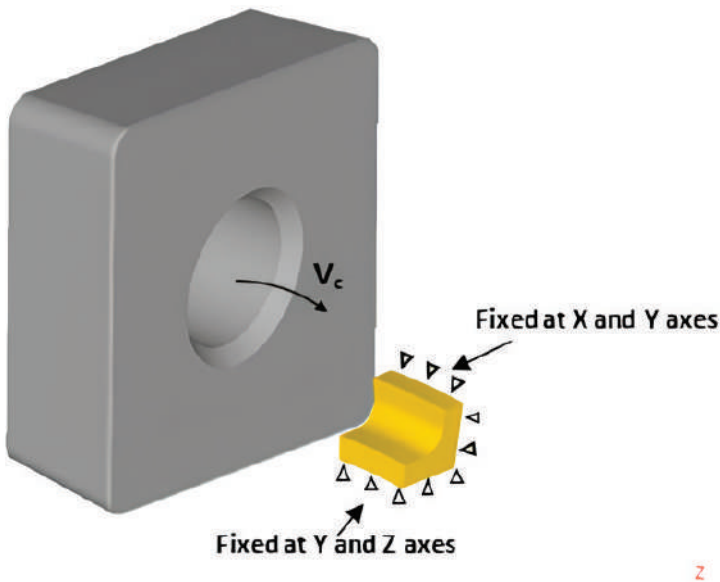


Figure 2. The Geometric Characteristic of the FEM Setup

2.2.2 Insert-Workpiece Interface

Meshing is counted as the most critical parameter for analyzing the 3D Flow of a complex cutting process, and adaptive meshing is required. DEFORM 3D can automatically optimize remeshing in the cutting region by controlling user-defined parameters such as the time step, mesh sizes, mesh elements, etc. Thus, the software was selected.

The 3D CAD model of the insert and simplified workpiece geometry regarding cutting parameters and nose radius are presented in Figure 1-2. The modeling of the insert was a rigid body with 25000 tetrahedral mesh elements. The size ratio of the meshes was 4:1 (Figure 3.a), and the insert tip meshed finer using a mesh window with a size ratio of 0.1 (Figure 3.b). A plastic body was appointed to the workpiece and meshed with 25% of the feed value. Also, the contact area of the

workpiece meshed as a 7:1 size ratio (Figure 3.c) to a finer result (Bathula, Buddi, Shagwira, Mwema, & Rajesh, 2022; Kyratsis, Tzotzis, Markopoulos, & Tapoglou, 2021; Ozturk, 2022; Tzotzis, Garcia-Hernandez, Huertas-Talon, & Kyratsis, 2020).

During the dry turning, the thermal boundary condition of the insert-workpiece interface was set as $0.02 \frac{\text{N } ^\circ\text{C}}{\text{mm s}}$ for the convection coefficient, and $45 \frac{\text{N } ^\circ\text{C}}{\text{mm s}}$ for the conduction heat transfer coefficient (Kyratsis et al., 2021; Ozturk, 2022; Tzotzis et al., 2020).

Finally, the friction condition at the insert-workpiece interface was set according to Coulomb's Law, which was the commonly used friction model for metalworking processes (Equation 1) (Bobrovskij, Khaimovich, Bobrovskij, Travieso-Rodriguez, & Grechnikov, 2022; Tan, 2002).

$$\tau_f = \mu \sigma_n \quad (1)$$

Where τ_f indicates the frictional shear stress. μ shows the friction coefficient. Lastly, σ_n displays stress of the insert-workpiece interface. The reference study (S. Mozammil et al., 2022) proposed the friction coefficient for machining Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC as 0.54. Therefore, μ was set to 0.54.

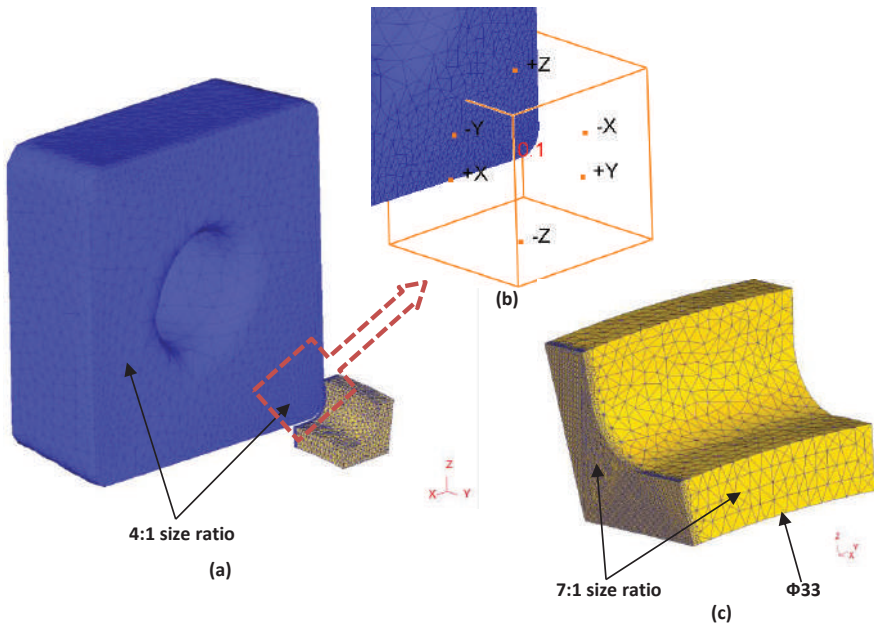


Figure 3. The Meshed Geometries (a) Insert, (b) Insert Tip, and (c) Workpiece

2.2.3 Material Models for Insert Workpiece and Coatings

2D FEM simulations have clarified significant knowledge about the mechanics of the cutting process, especially particle-matrix interactions. However, 3D FEM simulations can provide an evaluation of 3 components of the cutting forces more clearly, more helpful tool wear prediction, and more accurate information about stress, strain, displacement, and temperature behavior of the cutting interface, etc. Also, 3D FEM simulations for machining operations can be crucial for cutting tool marketing due to machining optimizations. Therefore, the recent literature has a trend to use 3D equivalent homogeneous material (EHM) models developed by constitutive material characteristics and failure criterion definitions for specific MMCs (X. Chen et al., 2017; Jadhav & Dabade, 2016).

The Johnson-Cook (JC) plasticity material model is the most common and well-known material model for the recent FEM studies of machining applications (İy-nen, Ekşi, Akyıldız, & Özdemir, 2021; Ch Sateesh Kumar, Zeman, & Polcar, 2020; Ozturk, 2022). JC model parameters were determined by constitutive material characteristics and material constants estimation for the Al-4.5%Cu/TiB2/3p MMC (S. Mozammil et al., 2022). JC model is described as follows:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \tag{2}$$

The symbols $\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_0, T, T_0, T_m$ represent a variety of quantities in the context of this study: equivalent stress, plastic strain, plastic strain rate, reference strain rate, reference temperature, ambient temperature, and melting temperature, respectively. Additionally, the symbols A, B, n, and m denote the empirical constants related to the workpiece material. These constants represent the initial yield stress, the strain hardening modulus, the strain hardening exponent, and the thermal softening exponent, respectively. The empirical parameters utilized in this study for the MMC were obtained from a previously published work (S. Mozammil et al., 2022). The parameters are also displayed in Table 1. Moreover, it was assumed that the reference strain rate for the simulations was 0.001/s.

Table 1. The JC material model values of Al-4.5%Cu/TiB2/3p MMC (S. Mozammil et al., 2022)

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	T_0	T_m (Du, Eskin, & Katgerman, 2006)
175	65.884	0.0165	0.1633	1.1711	27	570.8

Whereas the workpiece was set as a plastic body, the insert was selected as rigid.

Like the recent literature (Kyratsis et al., 2021; Ozturk, 2022), the normalized Cockcroft-Latham damage model was employed for the material fracture criterion. The thermo-mechanical features of the insert, coatings, and workpiece are presented in Table 2. The insert was chosen as the reference paper (S. Mozammil et al., 2022), and the thermo-mechanical properties were taken from the Deform 3D library concerning carbide (19% Cobalt)(Corporation, 2014). When appointing the mechanical properties of the Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC, the reference paper (S. Mozammil et al., 2022) was used. Nevertheless, the MMC's thermal properties have not yet been investigated in the literature. For this reason, the workpiece's thermal properties in the simulations were assumed from the Al-4.5%Cu as referencing previous studies (Choi, 2020; Du, Eskin, & Katgerman, 2006). In addition, coatings were employed for the insert with different thicknesses concerning the design of experiments. One of the coating applications is randomly exhibited in Figure 4.

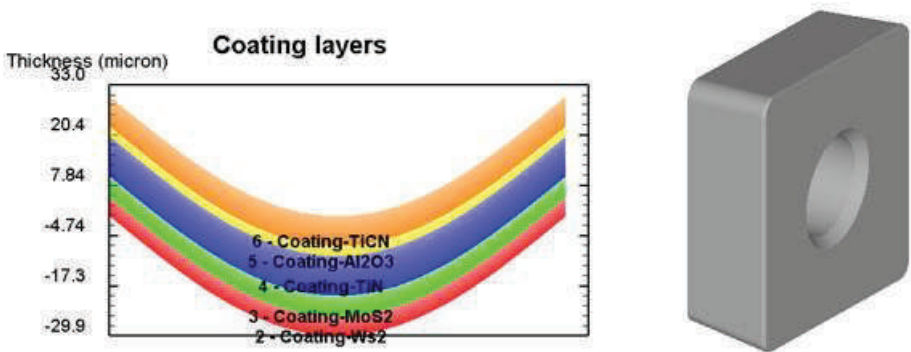


Figure 4. The Graphical View Of Coatings For the 13th of FEM Simulation

Table 2. Thermo-Mechanical Features of the Insert (Corporation, 2014), Workpiece (Choi, 2020; Du et al., 2006; S. Mozammil et al., 2022), and Coatings (Lian et al., 2019; Ozturk, 2022; Ranjan & Hiremath, 2022; Vasiliev, 2021; Volovik et al., 1978)

Mechanical Properties	Insert	MMC	WS₂	MoS₂	TiN	Al₂O₃	TiCN
Young's modulus (GPa)	496.423	72.14x10 ⁻³	354	330	600	415	448
Density (kg/m ³)	157	2764	7500	5060	4650	3780	4180
Poisson's ratio	0.24	0.31	0.28	0.125	0.25	0.22	0.23
Thermal Properties	Insert	MMC (Assumed)	WS₂	MoS₂	TiN	Al₂O₃	TiCN
Heat Capacity (N/mm ² °C)	5.91	2.64	1.92	2.01	3	3.42	2.5
Thermal Expansion (x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	7.2	f(Temp.)	6.35	10.70	9.4	8.4	8
Thermal Conductivity (W/m°C)	74.764	180	32	37	20 at 40 °C	33 at 50 °C	26 at 25 °C
					21 at 100 °C	28 at 90 °C	27 at 100 °C
					22 at 300 °C	19 at 300 °C	28 at 300 °C
					23.5 at 500 °C	13 at 500 °C	30.5 at 500 °C
					26 at 1000 °C	7 at 1000 °C	33.5 at 1000 °C
					27 at 1300 °C	7 at 1300 °C	35 at 1300 °C

2.3 Design of Simulations and Statistics Approach

Nine experiments, turning the Al-4.5%Cu/TiB2/3p MMC under different cutting conditions, were chosen from 27 experiments for the exact turning conditions (S. Mozammil et al., 2022). The nine experiments were selected because of their small broken chip formations like 10⁰ angle FEM simulations for verification.

Then, four of them were chosen concerning the simple randomized method for the validation of FEM simulations. After that, the experiment with the lowest absolute error for the resultant cutting force was decided. It was explained in detail in Section 3.

This study was prepared to reveal the cemented carbide insert performance with multi-layered coating types in terms of their sequence and thicknesses of each layer. The factors were coating types, two of them soft coatings (WS₂ and MoS₂) and three of them hard coatings (TiN, Al₂O₃, and TiCN). All factors were evaluated with five levels. Then, twenty-five validated FEM simulations were performed as an L25 (5⁵) orthogonal array. Table 3 shows the factors and levels. Table 4 presents the design of twenty-five validated FEM simulations. The selected cutting condition with the absolute minimum error was used for all simulations to compare multi-layered coating combinations. The selected cutting parameters were 995 rpm, 1.5 mm, and 0.14 $\frac{\text{mm}}{\text{rev}}$ or spindle speed (n), depth of cut (d), and feed (f), respectively (Table 5).

Table 3. Factors and Levels

Factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
WS ₂	UNCOATED	2.5 μm	5 μm	7.5 μm	10 μm
MoS ₂	UNCOATED	2.5 μm	5 μm	7.5 μm	10 μm
TiN	UNCOATED	2.5 μm	5 μm	7.5 μm	10 μm
al ₂ o ₃	UNCOATED	2.5 μm	5 μm	7.5 μm	10 μm
Ticn	UNCOATED	2.5 μm	5 μm	7.5 μm	10 μm

Table 4. L25 Orthogonal Array For Coating Types

Simulation No	WS ₂	MOs ₂	TiN	Al ₂ O ₃	TiCN
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4
7	2	2	3	4	5
8	2	3	4	5	1
9	2	4	5	1	2
10	2	5	1	2	3
11	3	1	3	5	2
12	3	2	4	1	3
13	3	3	5	2	4
14	3	4	1	3	5
15	3	5	2	4	1
16	4	1	4	2	5
17	4	2	5	3	1
18	4	3	1	4	2
19	4	4	2	5	3
20	4	5	3	1	4
21	5	1	5	4	3
22	5	2	1	5	4
23	5	3	2	1	5
24	5	4	3	2	1
25	5	5	4	3	2

Grey relation analysis (GRA) is a popular statistical model for determining the optimal parameters of a process considering multiple factors and variables.

The multiple responses calculated by obtaining data from Taguchi Orthogonal Array can be transformed into a single response in GRA to evaluate the similarity between different data (Kasemsiri, Dulsang, Pongsa, Hiziroglu, & Chindaprasirt, 2017; Sylajakumari, Ramakrishnasamy, & Palaniappan, 2018). Therefore, GRA

was used by following the steps below to investigate the effect of the multi-layered coatings types for the cemented carbide insert.

- **Grey Relation Generation:** It includes pre-processing data through the normalization of responses into two distinct groups: larger-the-better and smaller-the-better. Implementing the smaller-the-better criterion in this study is considered suitable to minimize the resultant cutting forces and tool temperatures.

The normalized data can be calculated as shown in Equation 3 (Ozturk, 2022; Sylajakumari et al., 2018).

$$X_i = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \tag{3}$$

Where, X_i calculated value after Grey relation generation, $\max y_i(k)$ is the highest value of $y_i(k)$, $\min y_i(k)$ is the smallest value of the $y_i(k)$ and $y_i(k)$ is the i th response.

- **Determining of Grey Relation Coefficient (GRC) and Grade (GRG):** The subsequent procedure involves the computation of the GRC and the GRG using the following equations (Kasemsiri et al., 2017; Ozturk, 2022; Sylajakumari et al., 2018).

$$\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)| \tag{4}$$

Where, $\Delta_{0i}(k)$, is the deviation, $X_0(k)$ is reference, and $X_i(k)$ is comparability. Then, the GRC can be calculated as Equation 5.

$$s_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \tag{5}$$

Where, $s_i(k)$ and ζ represent the GRC of the individual response variables and the distinguish coefficient, defined within the interval $\zeta \in [0,1]$. It is generally assumed as 0.5. Then, the GRG is determined as below.

$$\varphi_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i(k) \tag{6}$$

In the above equation, φ_i represents the value of GRG, and n indicates the number of responses. Furthermore, the optimal level is determined and validated using the following equation.

$$\varphi_{predicted} = \varphi_m + \sum_{i=1}^q (\varphi_0 - \varphi_m) \tag{7}$$

In the equation 7, φ_0 indicates the maximum GRG's average at the optimal level

of factor, φ_m displays the mean of GRG, and q is the number of factors influencing response values.

Finally, whether the contributions of the coating types with different thicknesses significantly affect the insert performance or not was determined by the General Linear Model (GLM) in Minitab Software.

3. Results

Figure 5 depicts a randomly selected cutting force graphic utilized in Finite Element Method (FEM) simulations of turning the Al-4.5%Cu/TiB2/3p. The simulations were carried out to estimate the three components of cutting force under various cutting conditions. When the force data obtained from the FEM simulations were transferred to a personal computer, the average value of the cutting forces was computed. Then, the resultant cutting forces (FR) were determined to compare with the experimental results (S. Mozammil et al., 2022). The experimental and predicted FR results are presented in Table 5. Also, the absolute errors of FR were calculated to appoint the simulation for the L25 orthogonal array. The selected FEM simulation, which has the absolute minimum error, is shown in yellow in Table 5.

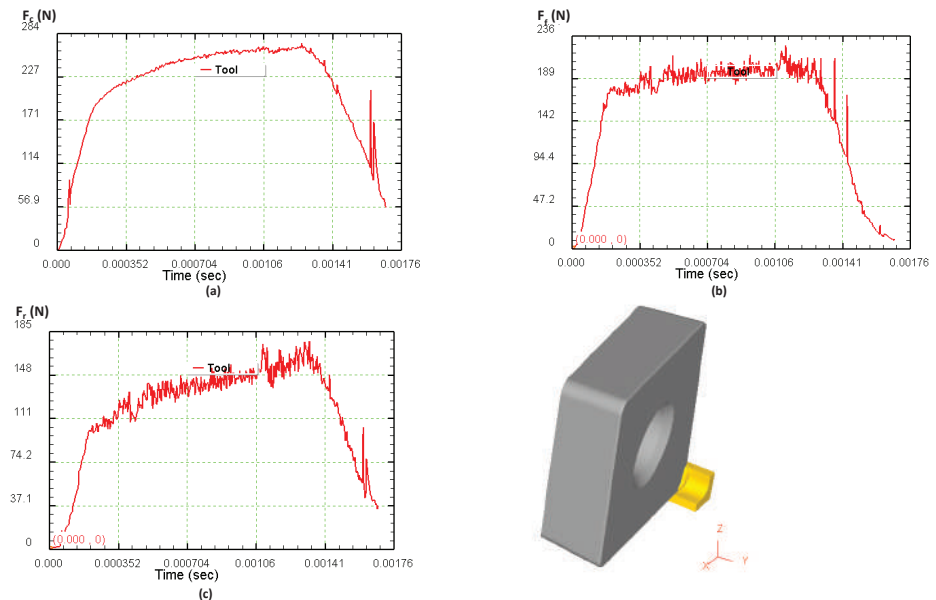


Figure 5. Cutting Force Components: (a) Main Cutting Force (F_c), (b) Feed Force (F_f), and Radial Force (F_r) (spindle speed, $n=995$ rpm, $d=1.5$ mm, and $f=0.10$ mm/rev)

Table 5. The comparison of Cutting Forces Between Experiments (S. Mozammil et al., 2022) and Predicted FEM Results

No	Cutting Parameters			Experiment Results			FEM Results			Absolute error (%)		
	n (rpm)	d (mm)	f (mm/rev)	F _c (N)	F _r (N)	F _R (N)	F _c (N)	F _r (N)	F _R (N)			
1	995	1.5	0.05	211.62	98.97	45.42	237.99	151.05	135.95	85.43	220.45	7.37
2	995	1	0.1	230.06	104.94	49.5	257.66	177.55	113.43	126.25	245.61	4.67
3	995	1.5	0.1	251.54	119.57	52.6	283.44	215.78	155.85	120.17	292.05	3.04
4	995	1.5	0.14	293.6	148.46	63.5	335.07	256.44	157.88	138.44	331.44	1.08

After the selection of the verified FEM simulation concerning the absolute minimum error (Table 5), the cutting performance of the multi-layer coated cemented carbide insert was evaluated regarding five different coating types in terms of their sequences and the five-level of thicknesses for each coating type. (Table 3). Then, the L25 (55) orthogonal array (Table 4) was built. Twenty-five simulations were set with the chosen cutting condition, then the FR and maximum insert temperature (Tmax) values were derived from FEM as output (Table 6). Next, The GRA statistical approach revealed the optimal multi-layered coating condition for turning Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC by evaluating the combined influences of the coatings on both FR and Tmax. The optimal condition for the GRA statistic model was found at levels 4-2-4-3-2 for WS₂, MoS₂, TiN, Al₂O₃, and TiCN, respectively, concerning the response table of mean GRGs (Table 7). As the mean of GRGs is higher, there is a stronger correlation (Ozturk, 2022; Sylajakumari et al., 2018). The optimal condition needed to be confirmed. Thus, the predicted optimal value of the multi-layered coating condition was calculated as Equation 7. Then, the simulation result for the optimal condition was compared with the expected optimal value, as shown in Table 8. They found good agreement with each other.

Although the GRA advised the optimum condition at levels 4-2-4-3-2 regarding FR and Tmax outputs, whether all the factors significantly affected the cutting performance or not had to be evaluated. Therefore, the influence of the factors on both FR and Tmax outputs was assessed by the General Linear Model (GLM) in the Minitab software package. The set ANOVA for GRGs is presented in Table 9. Since the probability values (p) of the WS₂ and Al₂O₃ coatings were calculated as smaller than 0.05 reasonable alpha level, these coatings and their thicknesses were significantly the most influential factors for insert performance. Their contribution ratios are 47.13% and 24.43% for WS₂ and Al₂O₃ coating, respectively. Also, the reasonable alpha levels of the other three factors were determined as higher than 0.05; thus, they had no significant influences on the cutting performance.

Table 6. The GRA Model for the Twenty-Five Verified Simulations Concerning F_R and T_{max} Outputs

Sim. No	WS ₂	MOs ₂	TiN	Al ₂ O ₃	TiCN	F _R (N)	Normalization			Deviation Sequence			GRC		
							T _{max} (°C)	F _R (N)	T _{max} (°C)	F _R (N)	T _{max} (°C)	F _R (N)	T _{max} (°C)	F _R (N)	T _{max} (°C)
1	1	1	1	1	1	331.44	112.55	0.3995	0.0000	0.6005	1.0000	0.4543	0.3333	0.3938	25
2	1	2	2	2	2	324.94	93.014	0.5284	0.6779	0.4716	0.3221	0.5146	0.6082	0.5614	21
3	1	3	3	3	3	333.02	89.56	0.3682	0.7977	0.6318	0.2023	0.4418	0.7120	0.5769	20
4	1	4	4	4	4	351.59	97.42	0.0000	0.5250	1.0000	0.4750	0.3333	0.5128	0.4231	24
5	1	5	5	5	5	319.05	98.2	0.6451	0.4979	0.3549	0.5021	0.5849	0.4990	0.5419	22
6	2	1	2	3	4	324.78	83.73	0.5315	1.0000	0.4685	0.0000	0.5163	1.0000	0.7581	4
7	2	2	3	4	5	338.08	85.95	0.2678	0.9230	0.7322	0.0770	0.4058	0.8665	0.6361	14
8	2	3	4	5	1	321.6	86.75	0.5946	0.8952	0.4054	0.1048	0.5522	0.8267	0.6895	5
9	2	4	5	1	2	329.41	86.76	0.4397	0.8949	0.5603	0.1051	0.4716	0.8263	0.6489	12
10	2	5	1	2	3	329.9	87.81	0.4300	0.8584	0.5700	0.1416	0.4673	0.7793	0.6233	15
11	3	1	3	5	2	339.61	86.89	0.2375	0.8904	0.7625	0.1096	0.3960	0.8201	0.6081	17

12	3	2	4	1	3	330.83	85.75	0.4116	0.9299	0.5884	0.0701	0.4594	0.8771	0.6682	8
13	3	3	5	2	4	317.81	91.7	0.6697	0.7235	0.3303	0.2765	0.6022	0.6439	0.6230	16
14	3	4	1	3	5	327.99	86.42	0.4679	0.9067	0.5321	0.0933	0.4844	0.8427	0.6636	10
15	3	5	2	4	1	322.52	87.15	0.5763	0.8813	0.4237	0.1187	0.5413	0.8082	0.6748	6
16	4	1	4	2	5	314.68	89.98	0.7318	0.7831	0.2682	0.2169	0.6508	0.6975	0.6742	7
17	4	2	5	3	1	301.15	86.52	1.0000	0.9032	0.0000	0.0968	1.0000	0.8378	0.9189	1
18	4	3	1	4	2	314.87	84.68	0.7280	0.9670	0.2720	0.0330	0.6477	0.9382	0.7929	3
19	4	4	2	5	3	327.06	90.35	0.4863	0.7703	0.5137	0.2297	0.4933	0.6852	0.5892	18
20	4	5	3	1	4	318.3	88.9	0.6600	0.8206	0.3400	0.1794	0.5952	0.7360	0.6656	9
21	5	1	5	4	3	336.74	92.84	0.2944	0.6839	0.7056	0.3161	0.4147	0.6127	0.5137	23
22	5	2	1	5	4	316.75	90.35	0.6907	0.7703	0.3093	0.2297	0.6178	0.6852	0.6515	11
23	5	3	2	1	5	321.79	88.81	0.5908	0.8237	0.4092	0.1763	0.5499	0.7394	0.6446	13
24	5	4	3	2	1	323.13	92.54	0.5642	0.6943	0.4358	0.3057	0.5343	0.6206	0.5775	19
25	5	5	4	3	2	312.18	84.88	0.7813	0.9601	0.2187	0.0399	0.6957	0.9261	0.8109	2

Table 7. Response Table For Means

Level	WS ₂	MOs ₂	TiN	Al ₂ O ₃	TiCN
1	0,4994	0,5896	0,6250	0,6042	0,6509
2	0,6712	0,6872	0,6456	0,6119	0,6844
3	0,6475	0,6654	0,6128	0,7457	0,5943
4	0,7282	0,5804	0,6532	0,6081	0,6243
5	0,6396	0,6633	0,6493	0,6160	0,6321
Delta	0,2287	0,1068	0,0403	0,1414	0,0902
Rank	1	3	5	2	4

Table 8. Confirmation of GRA

	Predicted result for optimal condition	Simulation result for optimal condition
GRG value	0.8366	0.8100

Table 9. The Contribuitons of the GRGs Via ANOVA

Factors	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
WS ₂	4	0,142638	47,13%	0,142638	0,035659	13,69	0,013
MoS ₂	4	0,047333	15,64%	0,047333	0,011833	4,54	0,086
TiN	4	0,006072	2,01%	0,006072	0,001518	0,58	0,693
Al ₂ O ₃	4	0,073937	24,43%	0,073937	0,018484	7,10	0,042
TiCN	4	0,022278	7,36%	0,022278	0,005570	2,14	0,240
Error	4	0,010420	3,44%	0,010420	0,002605		
Total	24	0,302678	100,00%				

4. Discussion

The usage of Al-based MMCs for engineering applications in automotive and aerospace industries is gradually increasing due to their superior mechanical and physical properties (Joel & Xavier, 2018; Radhika et al., 2013; Rathodi & Pandey, 2017). Thus, their machining behaviors are still investigated to perform economic and efficient cutting processes (Denkena et al., 2005; Harris et al., 2000; Marigoudar & Sadashivappa, 2014; P. Roy et al., 2009). Multi-layered coating of the tools has innovative potential concerning various cutting applications in previous studies, especially the machining of difficult-to-machine metals. For example, the literature revealed that the multi-layered coated inserts performed better than uncoated and single-layer coated inserts for hardened steels such as AISI 4140 (S. Roy & Ghosh, 2014), AISI 52100 (C. S. Kumar & Patel, 2018a) as showing superior

anti-oxidation, anti-adhesion, and anti-abrasive behaviors. In addition, the FEM simulation of the MMCs can be useful in determining the machining behaviors of the MMCs. The studies have trended to 2D FEM studies to reveal the tool-particle interaction, particle orientation, tool wear, etc. (Ghandehariun et al., 2016; Josyula & Narala, 2018; Pramanik et al., 2007; Schulze et al., 2011; Umer et al., 2020; Umer et al., 2015; Umer et al., 2017; Xiong et al., 2018). However, the 3D FEM studies related to the turning of MMCs have been limited (X. Chen et al., 2017; Jadhav & Dabade, 2016) and can be significant for machining optimizations, accurately estimating cutting forces, cutting conditions, and different coating technologies. For that reason, the 3D FEM and statistic-based study investigated the turning performance of different multi-layer coated cemented carbide inserts under different coating thicknesses during the cutting Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC.

The strengths of this study can be collected as (1) verified 3D FEM simulation, (2) revealing the performance of the insert coated by multi-layer with different soft and hard ones, and lastly, (3) all simulations were built concerning the design of experiments and evaluated by specific statistical methods. The 3D Fem simulations were calibrated by the data from the previous experimental study (S. Mozammil et al., 2022). The best agreement cutting condition between experiments and simulations was chosen. However, the MMC's thermal properties have not yet been investigated in the literature, and the thermal properties of the MMC were assumed from the Al-4.5%Cu referencing previous studies (Choi, 2020; Du et al., 2006). This assumption can be thought of as a limitation of this study. The thermal performance of the insert was just used for comparing the various multi-layered coatings' effects during the same cutting conditions, so this assumption has not provided a problem in evaluating the coatings' effects. The CAD geometry of the insert was modeled without the chip breaker, whereas the original insert geometry was. This insert model can be a limitation, but the randomly selected experiments agreed well with the FEM simulation concerning the FR values. Also, this limitation was minimized by choosing the absolute minimum error between experiments and simulations, so it won't be a real limitation to evaluate the multi-layered coatings' effects on the insert performance.

Soft/hard coatings can perform better since the soft top layer provides an interface film in the friction process, and the hard bottom layer increases wear resistance (Lian et al., 2019). This study revealed a similar result to this motto. Whereas the WS₂ is the soft coating material with a low friction coefficient, the Al₂O₃ has a higher hardness, improving the wear resistance. The most influential factors affecting the insert performance were found in WS₂ and Al₂O₃ coatings, with contribution ratios are 47.13% and 24.43%, respectively.

5. Conclusion

This study investigated the machining performance of cemented carbide inserts,

which were multi-layer coated by different materials concerning various thicknesses during the turning of Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC. The aim was to prove the performance effect of the multi-layer coated with soft and hard materials on the cemented carbide inserts using a verified FEM approach and statistics.

After the 3D FEM simulation was approved and the design of simulations was set, the GRA was built to reveal the optimum multi-layered coating condition regarding both FR and Tmax output results. In addition, the contribution rates of each coating material were investigated by GLM. The design of simulations has two types of levels; one is no coating, and the four have coating materials with various thickness levels. Thus, this model determined the optimal condition by comparing multi-layered coatings and no-coating situations. The optimal condition for the GRA statistic model was found at levels 4-2-4-3-2 for WS₂, MoS₂, TiN, Al₂O₃, and TiCN, respectively. Moreover, WS₂ and Al₂O₃ coatings were found to be the most influential factors affecting the insert performance, with 47.13% and 24.43% contribution ratios, respectively. The multi-layered coatings can be an effective solution for machining the MMCs.

Not many studies have been investigated concerning the abovementioned literature. The verified 3D Fem and statistic-based study has been a new perspective for machining aluminum MMCs by multi-layer coated inserts. This study was limited to certain factors such as specific workpiece and coating materials, particular insert type, and fixed machining conditions; however, changes in these factors, how/whether influence the cutting performance of a MMC or not, can be investigated in further studies.

Acknowledgment

Any foundation did not financially support this study. All the steps of this study were set and performed by the author.

Conflict of Interest

The author reports that there are no competing interests to declare.

References

- Akgün, M., Özlü, B., & Kara, F. (2023). Effect of PVD-TiN and CVD-Al₂O₃ Coatings on Cutting Force, Surface Roughness, Cutting Power, and Temperature in Hard Turning of AISI H13 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(3), 1390-1401. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-022-07190-9>
- Baris, O., & Levent, U. (2021). Optimization of cutting forces on turning of Ti-6Al-4V Alloy by 3D FEM simulation analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 10(2). Retrieved from <https://www.journaleras.com/index.php/jeras/article/view/256>

- Bathula, D. B., Buddi, T., Shagwira, H., Mwema, F. M., & Rajesh, K. V. D. (2022). Analysis on behavior of Ti-6Al-4V & Ti-5553 by performing turning operation using deform-3d. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-18. doi: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2037064>
- Bhushan, R. K. (2021). Multi-Response Optimization of Parameters during Turning of AA7075/SiC Composite for Minimum Surface Roughness and Maximum Tool Life. *Silicon*, 13(9), 2845-2856. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12633-020-00640-w>
- Bobrovskij, I., Khaimovich, A., Bobrovskij, N., Travieso-Rodriguez, J. A., & Grechnikov, F. (2022). Derivation of the Coefficients in the Coulomb Constant Shear Friction Law from Experimental Data on the Extrusion of a Material into V-Shaped Channels with Different Convergence Angles: New Method and Algorithm. *Metals*, 12(2). doi: <https://doi.org/10.3390/met12020239>
- Channabasavaraja, H. K., Nagaraj, P. M., & Srinivasan, D. (2016). Determination of Optimum Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning AL-B4C Composites. *International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Applications (Iconamma-2016)*, 149. doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/149/1/012029>
- Chen, J. P., Gu, L., & He, G. J. (2020). A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites. *Advances in Manufacturing*, 8(3), 279-315. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-020-00313-2>
- Chen, X., Xie, L., Xue, X., & Wang, X. (2017). Research on 3D milling simulation of SiCp/Al composite based on a phenomenological model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5), 2715-2723. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0315-0>
- Choi, S. W. (2020). Influences of Precipitation of Secondary Phase by Heat Treatment on Thermal Properties of Al-4.5%Cu Alloy. *KOREAN JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH*, 30(8), 435-440. doi: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2020.30.8.435>
- Corporation, S. F. T. (2014). Deform, Version 11.0 (PC);.
- Das, D., & Chakraborty, V. (2018). Dry condition machining performance of T6 treated aluminium matrix composites. *Materials Today-Proceedings*, 5(9), 20145-20151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.383>
- Denkena, B., Tonshoff, H. K., & Boehnke, D. (2005). An assessment of the machinability of iron-rich iron-aluminium alloys. *Steel Research International*, 76(2-3), 261-264. doi: <https://doi.org/10.1002/srin.200506007>
- Du, Q., Eskin, D., & Katgerman, L. (2006). Modelling macrosegregation during DC

casting of a binary aluminium alloy. *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes - XI, 1*, 235-242. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-006-9042-0>

- Ghandehariun, A., Kishawy, H. A., Umer, U., & Hussein, H. M. (2016). Analysis of tool-particle interactions during cutting process of metal matrix composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1-4), 143-152. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7346-1>
- Gürbüz, M., Şenel, M. C., & Koç, E. (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. [New generation composites with graphene reinforced aluminum matrix]. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36-47. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/muhendismakina/issue/54339/736188>
- Harris, S. G., Vlasveld, A. C., Doyle, E. D., & Dolder, P. J. (2000). Dry machining - commercial viability through filtered arc vapour deposited coatings. *Surface & Coatings Technology*, 133, 383-388. doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00895-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00895-1)
- Hiremath, V., Auradi, V., & Dundur, S. T. (2016). Experimental Investigations on Effect of Ceramic B4C Particulate Addition on Cutting Forces and Surface Roughness during Turning of 6061Al Alloy. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 75(2), 126-132. doi: <https://doi.org/10.1080/0371750X.2016.1164626>
- İynen, O., Ekşi, A. K., Akyıldız, H. K., & Özdemir, M. (2021). Real 3D turning simulation of materials with cylindrical shapes using ABAQUS/Explicit. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(8), 374. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03075-5>
- Jadhav, M. R., & Dabade, U. A. (2016). *Modelling and Simulation of Al/SiCp MMCs During Hot Machining*. Paper presented at the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2016-66071>
- Joel, J., & Xavier, M. A. (2018). Aluminium Alloy Composites and its Machinability studies; A Review. *Materials Today-Proceedings*, 5(5), 13556-13562. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.351>
- Josyula, S. K., & Narala, S. K. R. (2018). Study of TiC particle distribution in Al-MMCs using finite element modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 141, 341-358. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.04.004>
- Kara, F., Aslantas, K., & Çiçek, A. (2016). Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI 316L using artificial neural network. *Applied Soft Computing*, 38, 64-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.09.034>
- Kasemsiri, P., Dulsang, N., Pongsa, U., Hiziroglu, S., & Chindaprasirt, P. (2017).

- Optimization of Biodegradable Foam Composites from Cassava Starch, Oil Palm Fiber, Chitosan and Palm Oil Using Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(2), 378-390. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-016-0818-z>
- Kene, A. P., Orra, K., & Choudhury, S. K. (2016). Experimental Investigation of Tool Wear Behavior of Multi-Layered Coated Carbide Inserts Using Various Sensors in Hard Turning Process. *Ifac Papersonline*, 49(12), 180-184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.592>
- Kumar, C. S., & Patel, S. K. (2018a). Effect of chip sliding velocity and temperature on the wear behaviour of PVD AlCrN and AlTiN coated mixed alumina cutting tools during turning of hardened steel. *Surface & Coatings Technology*, 334, 509-525. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.12.013>
- Kumar, C. S., & Patel, S. K. (2018b). Investigations on the effect of thickness and structure of AlCr and AlTi based nitride coatings during hard machining process. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 336-347. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.031>
- Kumar, C. S., Zeman, P., & Polcar, T. (2020). A 2D finite element approach for predicting the machining performance of nanolayered TiAlCrN coating on WC-Co cutting tool during dry turning of AISI 1045 steel. *Ceramics International*, 46(16, Part A), 25073-25088. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.294>
- Kumar, R., Modi, A., Panda, A., Sahoo, A. K., Deep, A., Behra, P. K., & Tiwari, R. (2019). Hard Turning on JIS S45C Structural Steel: An Experimental, Modelling and Optimisation Approach. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 16(4), 7315-7340. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.16.4.2019.10.0544>
- Kumar, U., & Senthil, P. (2020). Performance of cryogenic treated multi-layer coated WC insert in terms of machinability on titanium alloys Ti-6Al-4V in dry turning. *Materials Today-Proceedings*, 27, 2329-2333. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.122>
- Kyratsis, P., Tzotzis, A., Markopoulos, A., & Tapoglou, N. (2021). CAD-Based 3D-FE Modelling of AISI-D3 Turning with Ceramic Tooling. *Machines*, 9(1). doi: <https://doi.org/10.3390/machines9010004>
- Lian, Y. S., Mu, C. L., Liu, M., Chen, H. F., & Yao, B. (2019). Three-dimensional numerical simulation of soft/hard composite-coated textured tools in dry turning of AISI 1045 steel. *Advances in Manufacturing*, 7(2), 133-141. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-019-00249-2>
- Marigoudar, R. N., & Sadashivappa, K. (2014). Comparison of tool life and surface characteristics of uncoated, coated carbide and ceramic tools during mac-

- hining of SiC reinforced ZA43 alloy MMC. *Materials Science and Technology*, 30(8), 876-887. doi: <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000484>
- Mozammil, S., Karloopia, J., Verma, R., & Jha, P. K. (2019). Effect of varying TiB₂ reinforcement and its ageing behaviour on tensile and hardness properties of in-situ Al-4.5%Cu-xTiB₂ composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 793, 454-466. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.137>
- Mozammil, S., Koshta, E., & Jha, P. K. (2021). Abrasive Wear Investigation and Parametric Process Optimization of in situ Al-4.5%Cu-xTiB₂ Composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(3), 629-648. doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02180-8>
- Mozammil, S., Koshta, E., Jha, P. K., & Swain, P. K. (2022). Investigation on Experimental Machinability & 3D Finite Element Turning Simulations of Al-4.5%Cu/TiB₂/3p Composite. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02735-x>
- Nicholls, C. J., Boswell, B., Davies, I. J., & Islam, M. N. (2017). Review of machining metal matrix composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9-12), 2429-2441. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9558-4>
- Ozturk, E. (2022). FEM and statistical-based assessment of AISI-4140 dry hard turning using micro-textured insert. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 290-300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.060>
- Prakash, M., & Iqbal, U. M. (2018). Parametric optimization in turning of AA2014/Al₂O₃ nano composite for machinability assessment using sensors. *2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering (Icame 2018)*, 402. doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/402/1/012013>
- Pramanik, A., Zhang, L. C., & Arsecularatne, J. A. (2007). An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: Tool-particle interaction during orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(10), 1497-1506. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.12.004>
- Radhika, N., Subramaniam, R., & Senapathi, S. B. (2013). Machining parameter optimisation of an aluminium hybrid metal matrix composite by statistical modelling. *Industrial Lubrication and Tribology*, 65(6), 425-435. doi: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ILT-01-2011-0008/full/html>
- Ranjan, P., & Hiremath, S. S. (2022). Finite element simulation and experimental validation of machining martensitic stainless steel using multi-layered coa-

- ted carbide tools for industry-relevant outcomes. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102411>
- Rathodi, B. S., & Pandey, B. (2017). Effect of Turning Parameters on Aluminium Metal Matrix Composites -A Review. *International Conference on Materials, Alloys and Experimental Mechanics (Icmaem-2017)*, 225. doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/225/1/012276>
- Roy, P., Sarangi, S. K., Ghosh, A., & Chattopadhyay, A. K. (2009). Machinability study of pure aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27(3), 535-544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.04.008>
- Roy, S., & Ghosh, A. (2014). High-speed turning of AISI 4140 steel by multi-layered TiN top-coated insert with minimum quantity lubrication technology and assessment of near tool-tip temperature using infrared thermography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 228(9), 1058-1067. doi: <https://doi.org/10.1177/0954405413514570>
- Saravanan, K. K., & Mahendran, S. (2020). Aluminium 6082-boron carbide composite materials preparation and investigate mechanical-electrical properties with CNC turning. *Materials Today-Proceedings*, 21, 93-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.368>
- Schulze, V., Zanger, F., Michna, J., Ambrosy, F., & Pabst, R. (2011). Investigation of the machining behavior of metal matrix composites (MMC) using chip formation simulation. *Modelling of Machining Operations*, 223, 20-29. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.20>
- Senel, M. C., & Gürbüz, M. (2021). Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of B4C/Graphene Binary Particles Reinforced Aluminum Hybrid Composites. *Metals and Materials International*, 27(7), 2438-2449. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12540-019-00592-w>
- Swain, P. K., Das Mohapatra, K., Das, R., Sahoo, A. K., & Panda, A. (2020). Experimental investigation into characterization and machining of Al plus SiCp nano-composites using coated carbide tool. *Mechanics & Industry*, 21(3). doi: <https://doi.org/10.1051/meca/2020015>
- Sylajakumari, P. A., Ramakrishnasamy, R., & Palaniappan, G. (2018). Taguchi Grey Relational Analysis for Multi-Response Optimization of Wear in Co-Continuous Composite. *Materials*, 11(9). doi: <https://doi.org/10.3390/ma11091743>
- Tan, X. C. (2002). Comparisons of friction models in bulk metal forming. *Tribo-*

logy International, 35(6), 385-393. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00020-8)

- Tooptong, S., Nguyen, D., Park, K. H., & Kwon, P. (2021). Crater wear on multi-layered coated carbide inserts when turning three distinct cast irons. *Wear*, 484. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203982>
- Tzotzis, A., Garcia-Hernandez, C., Huertas-Talon, J. L., & Kyratsis, P. (2020). Influence of the Nose Radius on the Machining Forces Induced during AISI-4140 Hard Turning: A CAD-Based and 3D FEM Approach. *Micromachines*, 11(9). doi: <https://doi.org/10.3390/mi11090798>
- Ugur, L. (2022). A Numerical and Statistical Approach of Drilling Performance on Machining of Ti-6Al-4V Alloy. *Surface Review and Letters*, 29(12). doi: <https://doi.org/10.1142/S0218625X22501682>
- Umer, U., Abidi, M. H., Abu Qudeiri, J., Alkhalefah, H., & Kishawy, H. (2020). Tool Performance Optimization While Machining Aluminium-Based Metal Matrix Composite. *Metals*, 10(6). doi: <https://doi.org/10.3390/met10060835>
- Umer, U., Ashfaq, M., Qudeiri, J. A., Hussein, H. M. A., Danish, S. N., & Al-Ahmari, A. R. (2015). Modeling machining of particle-reinforced aluminum-based metal matrix composites using cohesive zone elements. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), 1171-1179. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-014-6715-5>
- Umer, U., Kishawy, H., Ghandehariun, A., Xie, L. J., & Al-Ahmari, A. (2017). On modeling tool performance while machining aluminum-based metal matrix composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9-12), 3519-3530. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0368-0>
- Vasiliev, O. O. (2021). Thermodynamic Properties of Tungsten Disulfide from First Principles in Quasi-Harmonic Approximation. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59(9-10), 576-584. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11106-021-00185-6>
- Volovik, L. S., Fesenko, V. V., Bolgar, A. S., Drozdova, S. V., Klochkov, L. A., & Primachenko, V. F. (1978). Enthalpy and heat capacity of molybdenum disulfide. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 17(9), 697-702. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00796559>
- Xiong, Y. F., Wang, W. H., Jiang, R. S., Lin, K. Y., & Shao, M. W. (2018). Mechanisms and FEM Simulation of Chip Formation in Orthogonal Cutting In-Situ TiB₂/7050Al MMC. *Materials*, 11(4). doi: <https://doi.org/10.3390/ma11040606>



TEL ÖRGÜ KATMANLARININ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ÜZERİNDEKİ ISIL PERFORMANSI ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Mustafa Yasin GÖKASLAN^{1*}

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Van
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-3859-8485>

Anahtar kelimeler

Öz

*Faz değiştiren malzeme,
Tel örgü, ısı enerjisi
depolama, ısı iletkenlik
iyileştirme*

Enerjiyi depolama, giderek önem kazanmakta olup mevcut enerjinin en uygun kullanımında önemli rol oynar. Enerjinin daha verimli kullanımları arasında ısı enerjisi depolama da yer almaktadır. Isı enerjisi depolamaya etkileyen faktörler bulunmaktadır. Bu faktörlerden bir tanesi gözenekli ortamlar olup, yüksek ısı iletim katsayısı sayesinde faz değiştiren malzemenin (FDM) ısı performanslarını etki etmektedir. Bu çalışmada, farklı katman sayılarında tel örgülerin faz değiştiren malzemenin erime hızına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney odasında tel örgüsüz ve farklı sayıda tel örgüler olması durumunda farklı deney kombinasyonları oluşturulmuştur. Bu oluşturulan deney kombinasyonlarının her biri en az üç farklı sabit ısı akısı sınır şartında incelenmiştir. Zamana bağlı yapılan deneylerde faz değiştiren malzemenin erime süreleri analiz edilmiş ve buna karşılık gelen ısıtıcı plakanın yüzey sıcaklıkları incelenmiştir. Deney odasında tel örgü olmaması durumu ile kıyaslandığında 8 katmanlı tel örgülü durumda faz değiştiren malzemenin erime süresi termokupların konumuna bağlı olarak %2 ile %24 arasında iyileşme söz konusu iken 4 katmanlı tel örgüde bu durum %16'a kadar artış göstermektedir. Gözenekli ortamın yapısı ve ısı iletim katsayısı faz değiştiren malzemenin ısı performansı, sıcaklık dağılımını ve erime süresini etkilemektedir.

* my.gokaslan@yyu.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1328933

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE EFFECT OF WIRE MESH LAYERS ON PHASE CHANGE MATERIAL

Keywords

Phase change material, wire mesh, thermal energy storage thermal conductivity enhancement

Abstract

Energy storage is becoming increasingly important and plays an important role in the optimal use of available energy. Thermal energy storage is among the more efficient uses of energy. There are factors that affect thermal energy storage. One of these factors is porous media, which affects the thermal performance of phase change material (PCM) thanks to its high thermal conductivity. In this study, the effect of wire meshes with different number of layers on the melting rate of the phase change material was experimentally investigated. In the case of non-wire mesh and different numbers of wire mesh in the test chamber, different combinations of experiments were created. These experimental combinations were investigated at least three different asymmetric constant heat flux boundary conditions. In time-dependent experiments, the melting times of the phase-change material were analyzed and the corresponding heater plate surface temperatures were investigated. Compared to the absence of wire mesh in the test chamber, the melting time of the phase-change material in the case of 8-layer wire mesh improves between 2% and 24% depending on the position of the thermocouples, while this situation is up to 16% in the case of 4-layer wire mesh. The structure of the porous medium and the thermal conductivity coefficient affect the thermal storage performance, temperature distribution and melting time of the phase change material.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 18.07.2023

Kabul Tarihi : 27.11.2023

Research Article

Submission Date : 18.07.2023

Accepted Date : 27.11.2023

Extended Abstract

Introduction

Energy production and storage have importance role in the economies of countries. The limited use of fossil-based energies, environmental degradation effects and increasing energy demand have led countries to shift their interest in renewable energy sources. However, it is obvious that fossil fuels will continue to be used for a while, since most power generation facilities are powered by non-renewable energy sources. In this regards, energy efficiency should be increased and energy losses should be minimized. In this situation in mind, energy storage is a key consideration and is very promising. Energy storage; it is based on the principle of storing a certain part of the waste energy and using it as reinforcement in cases where the energy source is limited. Energy storage is more challenging than current technology, but it has been studied for many years. There are various types of energy storage methods such as mechanical energy, chemical energy, thermal energy and electrical energy. Heat storage plays a key role in preventing the increasing world temperature, as it is a way of minimizing both the energy cost and the bad effects on the environment in the most effective use of available energy. Heat energy can be stored and can be used for battery technology, space heating, hot water heating, cooling and air conditioning, etc. preferred in applications. Heat storage has gained significant importance reduce emissions and energy is recovered.

Objectives

In the case of placing a material with a high thermal conductivity coefficient in the phase change material, its effect on the melting time was investigated. The effect of different numbers of wire mesh layers, which can be found in abundance and cheap in the market, on the melting time was investigated experimentally. The formed wire mesh layers are formed by stacking 4 or 8 wire mesh cages on top of each other. The effect of the wire mesh in the experimental setup on the thermal performance of the phase change material was investigated. The structure of the wire mesh, number of layers and thermal conductivity were investigated how they affect the thermal performance, temperature distribution and melting time.

Methods

Energy storage is important as energy resources are limited and decreasing in our country and in the world. Thanks to energy storage, unused energy is stored and the energy is ready to be used whenever and wherever desired. In this study, thermal storage, one of the energy storage methods is tackled. Paraffin wax was used as phase change material. Experiments were made in three different combinations which was non-wire mesh, 4-wire layer wire mesh and 8-layer wire mesh. Paraffin wax was placed in the test chamber made of glass with dimensions of 5x5x10 cm and the surroundings of the test chamber were thermally insulated. The heater is below the test chamber. For each combination, three different constant asymmetric heat flux boundary conditions were applied. The heater surface temperature, phase change material temperature and ambient temperature were measured simultaneously over time. The temperature distributions of the phase change material over time were obtained. Also, the mushy regions were determined.

Results

For all three test chambers with and without wire mesh, the thermal power supplied from the DC power supply increases while the melting time decreases. Compared to the non-wire mesh, the wire mesh took the time required to melt approximately the same amount of paraffin wax depending on the thermal power, and an improvement of 1.9-12% in the 4-layer wire mesh and 2.2-24% in the 8-layer wire mesh was achieved. Less heat power will be needed to melt the layered wire mesh. During the melting process, the temperature with wire mesh are lower than the temperature profile of the test chambers without wire mesh. Wire mesh has a remarkable effect on the mesh zone time of the wire mesh media, as it increases the thermal penetration due to the high heat conductivity coefficient of the wire mesh. It has been determined that the heat transfer in the wire-mesh is more homogeneous than in the non-wire domain.

Discussion and Conclusions

Paraffin is mostly used in heat storage applications. However, due to its low thermal conductivity, paraffin has a long thermal energy storage time. In this experimental study, it has been investigated how much this disadvantage of paraffin with low thermal conductivity can be eliminated by placing a material with a high thermal conductivity coefficient inside the test chamber. Wire meshes, which are available in the market and cheap, have had a positive effect on thermal storage. Placing wire mesh inside the test chamber is not have an effect on additional power consumption, and using materials with high heat conductivity coefficient in phase change materials will have a positive effect on the melting time. In addition, a perfect contact is needed to reduce the contact resistance in the layers between the wire meshes. It can be done by welding or brazing process to minimize contact resistance and it is predicted that the melting times of wire-mesh domains will be even shorter.

1. Giriş

Enerjinin üretilmesi ve depolanması ülkelerin ekonomilerinde giderek öneme sahip olmaya başlamıştır. Fosil kaynaklı enerjilerin sınırlı olması, çevresel bozulma etkileri ve artan enerji ihtiyacı, ülkelerin dikkatlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına kaymasına neden olmuştur. Ülkeler enerji ihtiyaçlarını bir kısmını yenilenebilir enerji kaynaklarından üretmeye başlasa da enerji ihtiyaçlarının büyük bir kısmını fosil kaynaklı enerjilerden karşılamaktadırlar. Fosil kaynaklı enerjiler bir süre daha ana enerji kaynağı olarak süreceği öngörülmektedir. Fakat fosil kaynaklı enerjilerin, enerji güvenliği ve sürdürülebilirliği konusunda hala problemler söz konusudur. Bu yüzden ülkeler enerji konusunda dışa bağımlılığını azaltma çalışmalarını sürdürmektedir. Tüketilen enerjiyi etkin kullanma açısından, sistemlerin enerji ekserji analizleri yapılmakta, ısı ve mekanik enerjinin birlikte üretildiği kojenerasyon tesislere ve enerji depolanması gibi uygulamalara önem artmaktadır. Enerji depolama hem enerji maliyetini hem de çevreye olan kötü etkilerini en aza indirmenin bir yoludur. Bu sayede artan dünya sıcaklığının önlenmesinde rol oynamaktadır. Enerji depolama yöntemleri olarak mekanik enerji, kimyasal enerji, ısı enerji ve elektriksel enerji çeşitleri olup, bu çalışma kapsamında ısı enerji depolama yöntemi ele alınmıştır. Isıl enerji depolama daha çok ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde uygulamalarda tercih edilmektedir (Kozak ve Kozak, 2012).

(Chibani, Merouani ve Bougriou, 2022) metal hidritte enerji depolanmasının (erime/katılaşma) üzerine yaptığı çalışmada, gözeneklilik oranlarının değişmesi ve farklı iletkenliğe sahip metal hidritlerin kullanılması depoladıkları enerjiyi etkilediğini göstermişlerdir. Tüplerin buldukları pozisyona ve ısı iletkenliklerine bağlı olarak bakır ve alüminyum metal hidritlerde daha hızlı katılaşma meydana gelmiştir. (Duan, 2021a) fotovoltaik güneş panellerin ürettiği elektrik verimliliğini arttırmak için tasarladığı çalışmada, fotovoltaik panelleri soğutmak için faz değiştiren malzeme ve gözenek ortam kullanarak yeni bir sistem incelenmiştir. Faz değiştiren malzeme ile metal köpük aynı zamanda bulunduğu durum sadece panelin arkasında faz değiştiren malzeme olması durumuna göre paneli soğutmada daha etkili olduğu ve metal köpüğün erimeyi hızlandırdığını ifade etmiştir. Gözenekliliğin azalmasıyla sistemdeki elektrik veriminin arttığı gösterilmiştir. (Duan, 2021b) aynı yıl yaptığı diğer çalışmada ise yine fotovoltaik panellerin elektrik verimliliğini arttırmaya yönelik olup, panel açısını ve faz değiştiren malzemeyi değiştirmiştir. Eğim açısı doğal taşınımı azaltarak erimeyi olumsuz etkilemiştir. Çevre dostu ve ucuz olduğu için faz değiştiren malzeme olarak Hindistan cevizi yağı kullanmıştır. Eğim açısı gözeneklilik oranı azaldıkça sistemi olumsuz olarak etkilemiştir. (Li, Qu, Zhang, Zhao ve Tao., 2013) gözenekli ortamda faz değiştiren malzeme ve elyaf keçeyi aynı anda kullanarak ısı geçişi yüzey sıcaklığı ile erime/katılaşmaya etkisini incelemişlerdir. Elyaf keçe ve gözeneklilik oranındaki artış eriyen faz değiştiren malzemenin doğal taşınımı ısı geçişini arttırmıştır. Fakat

oluşturulan bu kompozitin ısı iletkenliğini azaltmıştır. Elyaf keçenin çapı arttıkça yüzey sıcaklığı da arttığı belirlenmiştir. (Mashayekhi, Housfer ve Ashiaee., 2020) aktif ve pasif yöntemleri birleştiren yeni bir ısı yönetim sistemi (hibrit) ile lityum iyon pillerinin ısı tepkisini deneysel incelemişlerdir. Aktif yöntem olarak soğutucu akışkan içeren Al mini kanal, pasif yöntem olarak ise gözenekli bakır metal köpük seçilmiştir. Aktif yöntemde yüksek ısı üretiminde pil sıcaklığını kontrol altına almada etkisiz olduğunu bulmuşlardır. Hibrit sistem aktif ve pasif yöntemlerden daha iyi ve verimli performans gösterdiği kanıtlamışlardır. Nano-akışkan eklenmesiyle ısı iletkenlik artmıştır ve bu da pilin etrafında daha fazla taşınma neden olup pil sıcaklığını azaltarak güvenlik sağlamıştır. (Akyurek ve Yoladi, 2021) mini kanallı ısı değiştiricilerde faz değiştiren malzeme kullanarak erime/katılma analizini yapmışlardır. Mini kanal çapı arttıkça enerji depolama arttığını, Akışkan giriş sıcaklığının erime ve katılma üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, akışkan hızının erime de etkisiz olduğunu, erimenin katılmadan daha hızlı gerçekleştiğini ve eşit şekilde artan mini kanal çapına rağmen yüzey hava arasında ısı geçişinin logaritmik olarak arttığını ifade etmişlerdir.

(Juaifer, Avani ve Poursadegh, 2020) parafin mumu kullanarak plakalı ısı değiştiricisi üzerine hem sayısal hem de deneysel bir çalışma yapmışlardır. Üç farklı akışkan giriş sıcaklığı ve üç farklı debide elde ettikleri sonuçlar analiz edilip kıyaslamışlardır. Akışkan sıcaklığının artmasıyla ısı geçiş miktarının arttığı ve erime süresinin %37 oranlarında azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca akışkan debisinin artmasıyla erime süresini de etkilediği yaklaşık %0.9 oranında düşürdüğü ortaya çıkarmışlardır. (Albaldawi, Shyaa ve Hammendy, 2015) faz değiştiren malzemenin ısı iletkenliğini arttırmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda, parafin mumun içerisine bakır halkalar yerleştirmişlerdir. İki farklı çaptaki halkaların deney odasındaki kapladığı farklı hacimlerde deneylerini gerçekleştirmişlerdir. En yüksek hacim yüzdesinin, halkasız durumla (boş) kıyasla hem faz değiştiren malzeme bölümünde hem de hava bölümünde erime süresinin azaldığını ve ısı geçişini yüksek seviyeye çıkardığını ifade etmişlerdir. Fakat bu deney odasındaki halkaların etkisinin katılma süresi üzerinde daha düşük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. (Mustaffar, Harvey ve Reay, 2015) beş katmanlı telden oluşturdukları ve %90 gözenekliliğe sahip malzemeleri tel kolonlarla birleştirerek test odasını oluşturmuşlardır. Faz değiştiren malzeme olarak tuz hidrat kullanmışlardır. Bu beş katmanlı test odasının erime süresini %14 azalttığını katmanlar arasını lehimle gibi daha temas direnci en aza indirildiğinde bu sürenin daha da azalabileceğini ifade etmişlerdir. (Opolot, Zhao, Keane, Liu, Mancin, Bruno ve Hoo-man, 2023) paslanmaz tel örgü kullanarak ısı geçişini arttırmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Deneysel sonuçlarında, faz değiştiren malzemenin tankına gevşek bir şekilde sarılmış periyodik bir yapı yerleştirmenin ısı geçişini iyileştirdiğini ve katılma sürecini kısalttığını göstermişlerdir. Bu tel örgünün performansın yaklaşık %10 oranında iyileştirdiği ifade etmişlerdir. Akışkan debileri artması ile

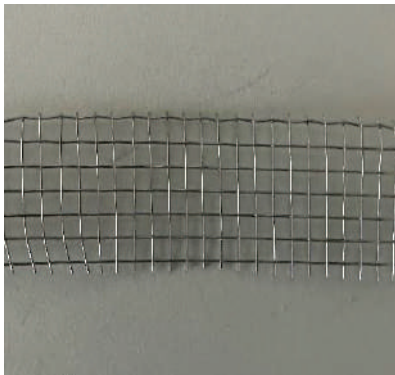
de deşarj sürelerinde kısalma söz konusu olduğunu göstermişlerdir. (Ebadi, Tasnim, Aliabadi ve Mahmud, 2020) yaptıkları çalışmada silindirik şekilde bir gizli ısı enerji depolama sistemi içine iki farklı gözeneklilik değerinde bakır tel örgü eklenmesinin ısı performansına etkisini araştırmışlardır. Bu tel örgünün eritme işlemi sırasında depolanan ısı akışı, Nusselt sayısı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Erime sürelerinde %17 ile %24 arasında iyileşme olduğunu ve Nusselt sayısı korelasyonu sunmuşlardır.

Bu çalışmada, piyasada bol miktarda ve uygun fiyata bulunabilen farklı sayıda tel örgü katmanlarının erime süresine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Oluşturulan tel örgü katmanlar yatay olarak 4 ve 8 adet tel örgü kafesin üst üste konulmasından oluşmaktadır. Deneyler üç farklı kombinasyonda yapılmış olup deney odasının tel örgüsüz (boş), 4 tel örgü katmanlı ve 8 katmanlı tel örgü katmanlı olması durumunda yapılmıştır. Her deney kombinasyonu için en az üç farklı sabit ısı akışı sınır şartlarında ve asimetric ısıtma (sadece alttan) olması durumunda faz değiştiren malzemelerin erime süreleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney odasının boş ve farklı katmanlarda bulunan tel örgülerin faz değiştiren malzemenin ısı performansına etkisi incelenmiştir. Tel örgü katmanlarının sayısı sıcaklık dağılımını ve erime süresini nasıl etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca her bir deney kombinasyonu için lapa bölgeleri ve erime süreleri de belirlenmiştir.

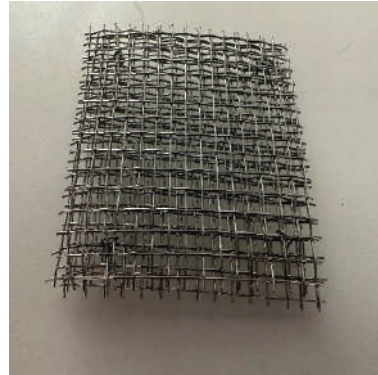
2. Deney Düzenegi

2.1 Test Örneği (Tel örgü)

Tel örgü olarak paslanmaz çelik (AISI 304) tel örgü kullanılmıştır. Süzgeç şeklinde olan bu tel örgünün tel çapı 0.65 mm'dir. Tel örgünün 1 cm²'de delik adedi 9.61 adettir. Deneysel çalışmada, deney odasında kullanılan tel örgülerin görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 1. Test Örneğinde Kullanılan Tel Örgüler a) 1 Katmanlı, b) 4 Katmanlı

Katmanlı tel örgüler yatay olarak üst üste konulmak üzere 4 ve 8 katmandan oluşmaktadır. Her bir tel örgü katmanının boyutları 50x50 mm'dir. Oluşturulan bu tel örgü katmanların gözenekliliğini Denklem (1)'de gösterildiği gibi hesaplamak mümkündür.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_k}{V_t} \quad (1)$$

Burada ε , gözenekliliği, V_k katı hacmi ve V_t ise toplam hacmi ifade etmektedir. 5x5 cm boyutlarında 4 katmanlı tel örgü numuneleri üretilmiş, 8 katmanlı elde etmek için 2 tane 4 katmanlı tel örgü üst üste konulmuştur. Bu tel örgü katmanlarının gözeneklilik değerini belirlemek için 10 tane yapılmış 4 katmanlı tel örgüleri kapalı kapta bulunan suya atılmış ve suyun yer değiştirdiği hacim katı hacme eşit kabul edilmiştir. 4 katmanlı tel örgülerin gözenekliliği yaklaşık %94 olarak hesaplanmıştır.

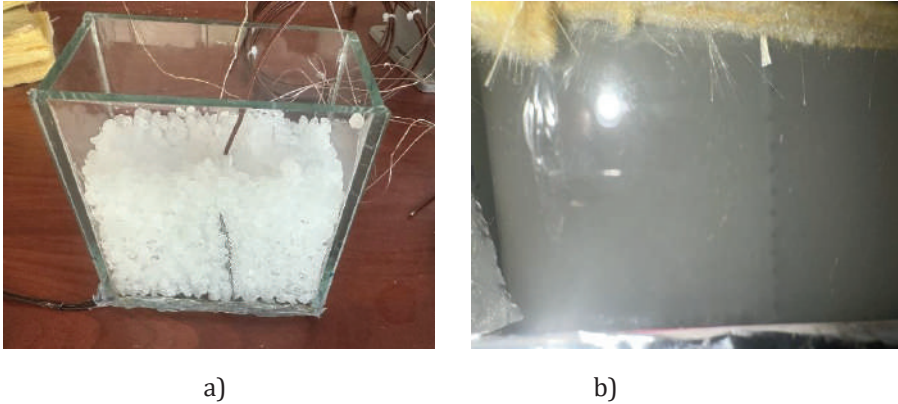
2.2 Faz Değiştiren Malzeme (FDM)

Faz değiştiren malzemeler, belirli bir sıcaklıkta katı ve sıvı halde olan ısıl enerji depolayabilen malzemelerdir. FDM katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya doğru hal değiştirdiklerinde ısı emilir veya salınır. FDM genel olarak inorganik ve organik olarak ayrılabilir. Yaygın olarak kullanılan FDM, parafinler (organik), tuz hidratları (inorganik) ve yağ asitleri (organik) örnek verilebilir (Kahwaji ve White, 2021). Deneysel çalışmada düşük maliyet, kolay tedarik ve ısıtıcının çalışma sıcaklıklarına karşılık gelen erime sıcaklıkları gibi başlıca sebeplerden faz değiştiren malzeme olarak Parafin mumu kullanılmıştır. Parafin mumunun, termodinamik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Erime sıcaklığı 56 ile 58 °C arasında değişmektedir. Ayrıca katı hal ve sıvı halde olmasına bağlı olarak bazı termodinamik özellikleride değişkenlik göstermektedir.

Tablo 1. Parafin mum malzemesinin özellikleri (Gasia, Miro, Gracia, Barreneche ve Cabeza, 2016)

Özellikler	Değerler
Erime noktası (°C)	53-59
Gizli ısı (kJ/kg)	160
Yoğunluk (kg/m ³)	880 (15°C, katı hal) 770 (80°C, sıvı hal)
Özgül ısı k(J/kgK)	2000
Isı İletim katsayısı (W/mK)	0.2 (katı ve sıvı hal)
Hacimsel genişleme (%)	12.5
En yüksek çalışma sıcaklığı (°C)	80

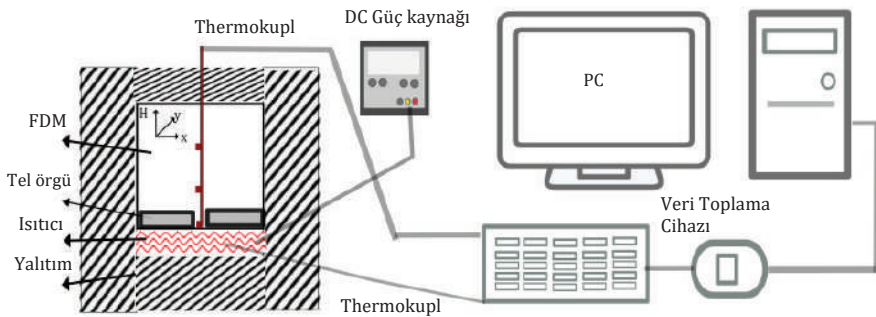
Parafin mumu boncuk şeklinde katı olarak temin edilmiştir. Deneylerden önce öğütme makinesi kullanarak parafin mumu toz haline getirilmiştir. Daha sonra deneylere hazır olması ve tüm deneylerde aynı şartlar sağlanabilmesi için parafin mumu eritilmiş ve tekrar katı hale gelmesi sağlanmıştır. Bu işlemlere ait görseller sırasıyla Şekil 2 a) ve b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Faz Değiştiren Malzeme; a) Boncuk Şekli, b) Eritilerek Deneye Hazırlanmış Hali

2.3 Deney Düzenegi

Deney düzeneginin şematik çizimi Şekil 3'te verilmiştir. Bu deney tesisatı faz değiştiren malzeme içerisinde tel örgü bulunması halinde erime süresinin etkisini araştırmak için tasarlanmıştır. FDM olarak Parafin mumu kullanılmıştır.



Şekil 3. Deney düzenegi

Deney düzenegi iki bölümden oluşmaktadır. Şekil 3'te gösterilen şematik çizimde sol taraf deney (test) odası sağ taraf ise kontrol ünitesidir. Deney odası bölümünde test örneği (FDM ve tel örgü katmanları), ısıtıcı, akışkan ve yüzey termokupl-

ları ve yalıtımdan oluşurken, kontrol ünitesi DC güç kaynağı, veri toplama cihazı ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Deney odası 5x5x10 cm ölçülerindedir. Deney odasının en altında 150 W gücünde film (esnek) ısıtıcı bulunmaktadır. Isıtıcı boyutları 5x10 cm olup deney odasına silikon aracılığıyla sabitlenmiş ve sızdırmazlığı sağlanmıştır. Deney odasının yan duvarları 1 cm kalınlığında camdan yapılmıştır. Isıtıcı, DC güç kaynağına (Marxlow, PS-305D, Çin) bağlıdır. Farklı ısı akıları uygulanarak deney boyunca sabit bir ısı akısı elde edilmesi amaçlanmıştır. 2090, 2464 ve 3185 W/m² olmak üzere her bir deney kombinasyonuna uygulanmıştır. Deney odasının alt kısmı, yan duvarları ve üst yüzeyleri taş yünü ile kaplanmıştır. Böylece deney odasına uygulanan ısı akısının çevreye kaybının önlenmesi ve deney odasına doğru geçmesi amaçlanmıştır.

Deney düzeneğinde K tipi (Omega, TT-K-30-SLE, USA) termokupl teli kullanılmıştır. Deney başlangıcından itibaren her 60 saniye bir sıcaklık verisi alınmıştır. Yüzey ve faz değiştiren malzemelerinde sıcaklığını ölçmek için kullanılan termokupulların konumları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Termokupl Konumları

Yüzey Sıcaklığı	Konum (X/Y) [mm]	Faz Değiştiren Malzeme sıcaklığı	Yükseklik (H) [mm]
T _{s1}	0/25	T _{fdm1}	0
T _{s2}	20/25	T _{fdm2}	20
T _{s3}	40/25	T _{fdm3}	40
T _{s4}	60/25		
T _{s5}	80/25		
T _{s6}	100/25		

Yüzey sıcaklıkları ısıtıcı plakanın tam ortasından soldan sağa doğru yatay olarak 0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm ve 100 mm olmak üzere altı farklı noktadan ölçülmüştür. Faz değiştiren malzemedan ise en alt (0 mm), 20 mm ve 40 mm yükseklikten olmak üzere üç farklı konumdan faz değiştiren malzemenin sıcaklığı ölçülmüştür.

Deneyler yaklaşık oda sıcaklığında başlatılmış ve deney odasındaki parafinin tam erimesine kadar devam edilmiştir. Deney odası alttan ısıtılmış (asimetrik ısı akısı) yan yüzeyleri ve üst yüzeyi ısıl olarak yalıtılmıştır. Deney odasının boş (tel-siz), 4 ve 8 katmanlı tel örgülerden oluşması durumunda ısıtıcı yüzey sıcaklığı ve parafin erime süresi deneysel olarak incelenmiştir.

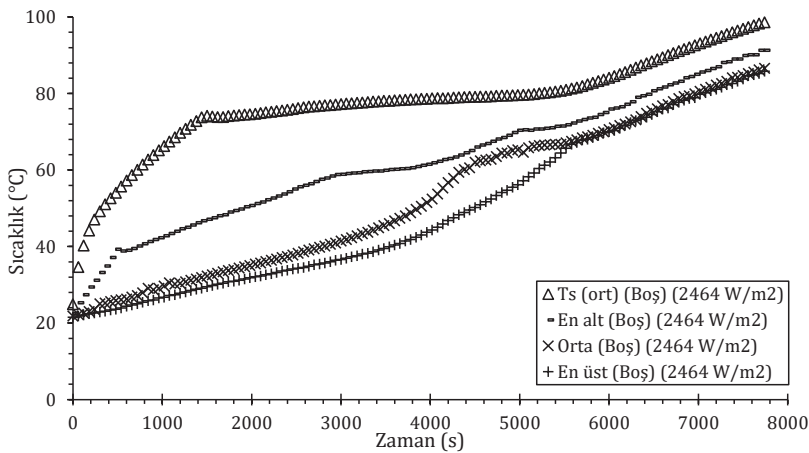
Deneysel çalışmalarda belirsizlik analizi, ölçüm cihazlarının belirsizliği dikkate

alınmalıdır. Bu ölçülen değerlerin kullanıldığı denklemlerden kaynaklanan belirsizlikler de vardır. Bu belirsizliklerin sonuçlara eklenmesi, sunulacak denklemin güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Termokupl belirsizliği 1.1 °C'dir. DC güç kaynağının belirsizliği ise okunan voltaj değerinin %0.01 okunan amper değerinin ise %0.02'sidir.

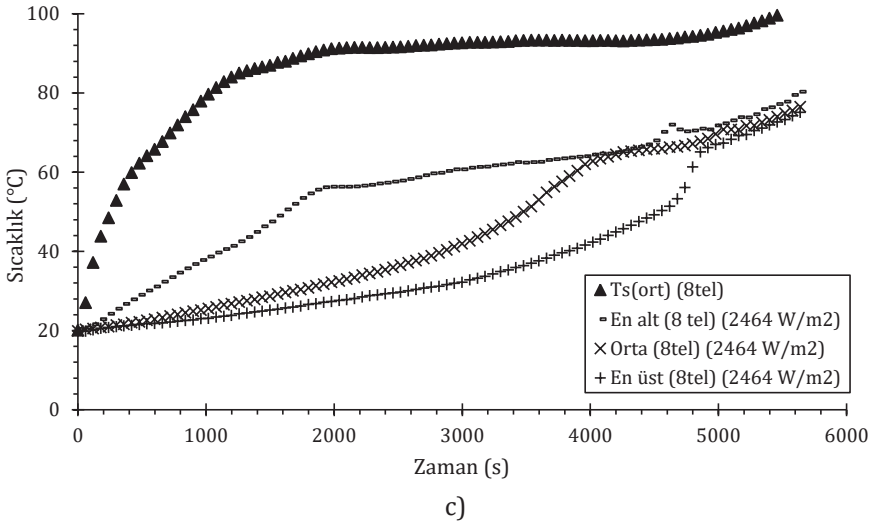
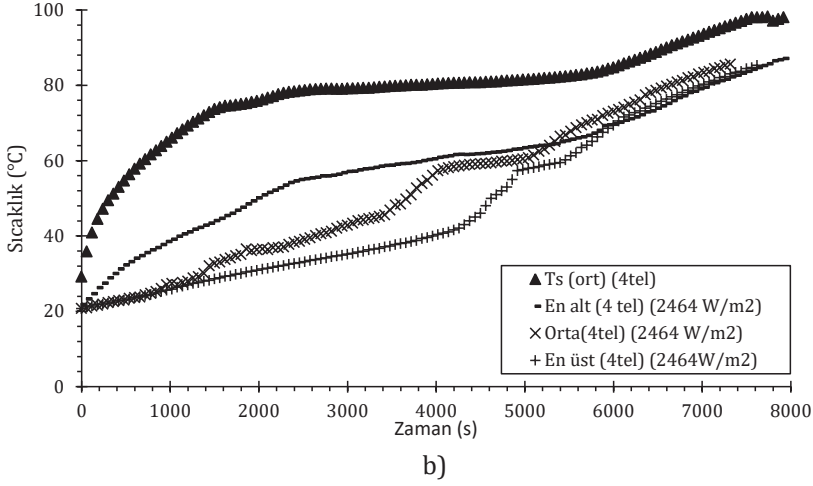
3. Deneysel Sonuçları

Deneysel olarak faz değiştiren malzemesi olarak parafin mumu kullanılmış olup teknik bilgileri Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel odasının içerisine 175 g. ağırlığında yarım küre şeklinde olan parafin mumu öğütücünden geçirilerek toz halde yerleştirilmiştir. Parafin mumu ısıtılarak sıvı forma gelmesi sağlanmış ve daha sonra soğumaya bırakılarak tekrar katı hale gelmesi beklenmiştir. Böylece her deneyde aynı başlangıç koşulu sağlanmıştır. Deneyler, deneysel odasının altından sabit ısı akışı uygulanarak ve deneysel odasının yan yüzeyleri ısı olarak yalıtılarak yapılmıştır. Asimetrik sınır koşulunun uygulandığı bu çalışmada parafin mumun erime süresinin farklı katmanda bulunan tel örgülerle değişimi incelenmiştir.

Deneysel odasının içerisinde bulunan parafin mumun 3 farklı yükseklikten sıcaklığı, 6 farklı noktadan yüzey sıcaklığı ve 1 adet ortam sıcaklığı olmak üzere 10 farklı konumdan sıcaklıklar ölçülmüştür. Deneyler ortam sıcaklığında başlatılmış ve deneysel odasında bulunan parafin mumun tamamı eriyene kadar devam edilmiştir. Deneysel tesisatının ve parafin mumun yapısı zarar görmemesi için FDM'nin sıcaklığının 80 °C'ye geçmemesine dikkat edilmiştir. Ayrıca parafin mumun en yüksek operasyon sıcaklığına çıkılmamasına özen gösterilmiştir. Böylece faz değiştiren malzemesinin yapısında bozulmalardan kaçınılmıştır.



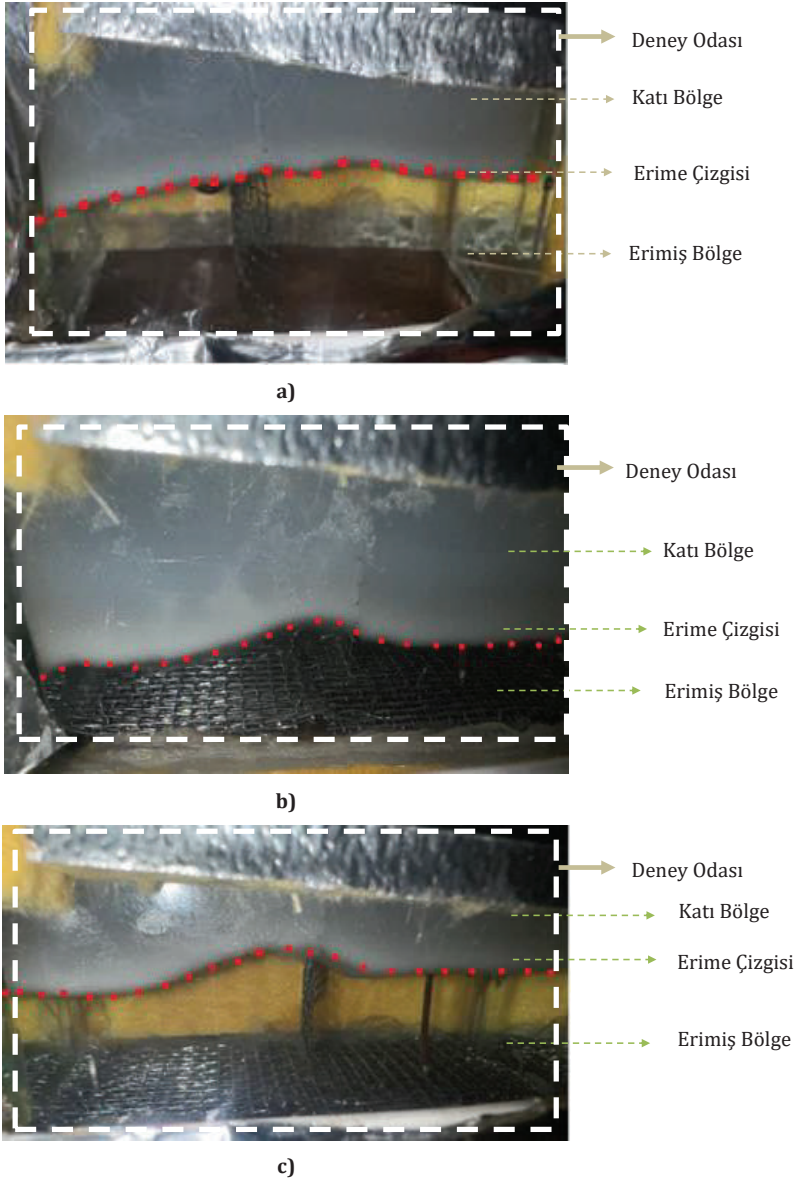
a)



Şekil 4. Faz Değiştiren Malzeme Erime Sıcaklığının Süre ile İlişkisi a) Tel Örgüsüz b) 4 Katmanlı Tel Örgülü c) 8 Katmanlı Tel Örgülü

Şekil 4'te, ısıtıcının üst kısmının boş (Şekil 4a), 4 katmanlı (Şekil 4b) 8 katmanlı (Şekil 4c) olduğu durumlar için yapılan deneylerde parafin ve yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir. Her üç deney kombinasyonunda hemen hemen aynı grafik eğilimi yakalansa da erime için geçen süreler farklıdır. Erime-nin başlaması için aktarılan gerekli enerji miktarı yüzey sıcaklığına bakıldığında 1400 saniyelerde başladığı görülmektedir. Parafin içinden ölçülen sıcaklıklarda

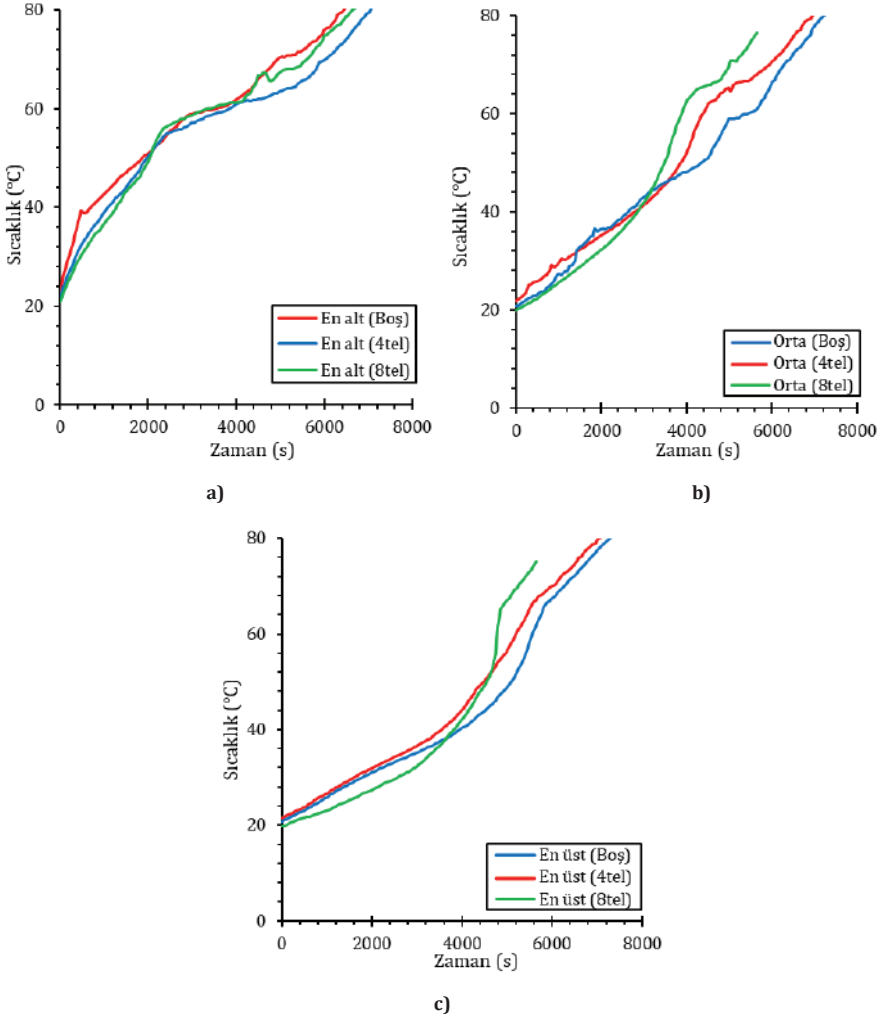
ise alttan ısıtma olduğu için erime alt noktalardan başlamış ve üst noktalara doğru ilerlemiştir. Isıtıcının üzerinin boş olma durumunda parafin ilk 3000. saniyede erimeye başlamış, ortasının erimesi 4500. saniye, tamamen erimesi ise 5640. saniyede gerçekleşmiştir. Isıtıcının üzerinde 4 katmanlı tel olma durumunda ise



Şekil 5. Farklı Deney Kombinasyonlarında ve Sürelerinde Deney Odalarının Görüntüsü a) Telsiz, b) 4 Katmanlı Tel Örgü, c) 8 Katmanlı Tel Örgü

parafin 2520. saniye erimeye başlamış orta noktası 4800. saniye ve parafinin tamamen erimesi ise 5400. saniye de gerçekleşmiştir. Isıtıcın üzerinde 8 katmanlı tel olması durumunda parafin 1920. saniye de orta noktası 3960. saniye de ve tamamen erimesi ise 4860. saniye de gerçekleşmiştir. Isıtıcıya tel örgü katmanlarının eklenmesi, iletimle olan ısı geçişini arttırmakta ve parafinin erime süresini kısaltmaktadır.

Şekil 5'te deney odasının tel örgüsü ve tel örgülü olması durumunda erime görüntüleri verilmiştir. Erime ısıtıcının bulunduğu alt noktalardan başlamış hemen



Şekil 6. 3185 W/m² Isıtıcı Gücünde Katmanlı Tel Örgü İle Boş Deney Odalarının Erime Sürelerinin Karşılaştırılması a) Tel Örgüsüz, b) 4 Katmanlı Tel Örgü, c) 8 Katmanlı Tel Örgü

hemen düzgün ve homojen olarak üst yüzeye doğru ilerlemiştir. Parafinin ısı iletim katsayısının düşük olmasından dolayı içerisine yerleştirilen paslanmaz çelik tellerin ısı iletim katsayılarının yüksek olması sebebiyle üst yüzeylere doğru erime daha hızlı gerçekleşmiştir. Sıcaklık artış eğimleri, deney odasının üstünden doğal taşınım etkisi nedeniyle beklendiği gibi, en üst noktadan en alt noktaya doğru azalmaktadır. Burada orta ve en üst noktadaki sıcaklıklar birbirine yakın profil seyrettiği görülmektedir.

Şekil 6'da aynı ısı akılarında parafinin erime süresinin deney odasının tel örgülü ve tel örgüsüz olması durumundaki karşılaştırılma verilmiştir. Şekil 6'da verilen grafikte 8 katmanlı tel örgünün erime süreni kısalttığı ve katman sayısı azaldıkça erime süresi arttığı görülmektedir. Parafinin en alt sıcaklığı için 4 katmanlı telde %12, 8 katmanlı tel örgü de ise %24 erime süresinde kısalma söz konusudur.

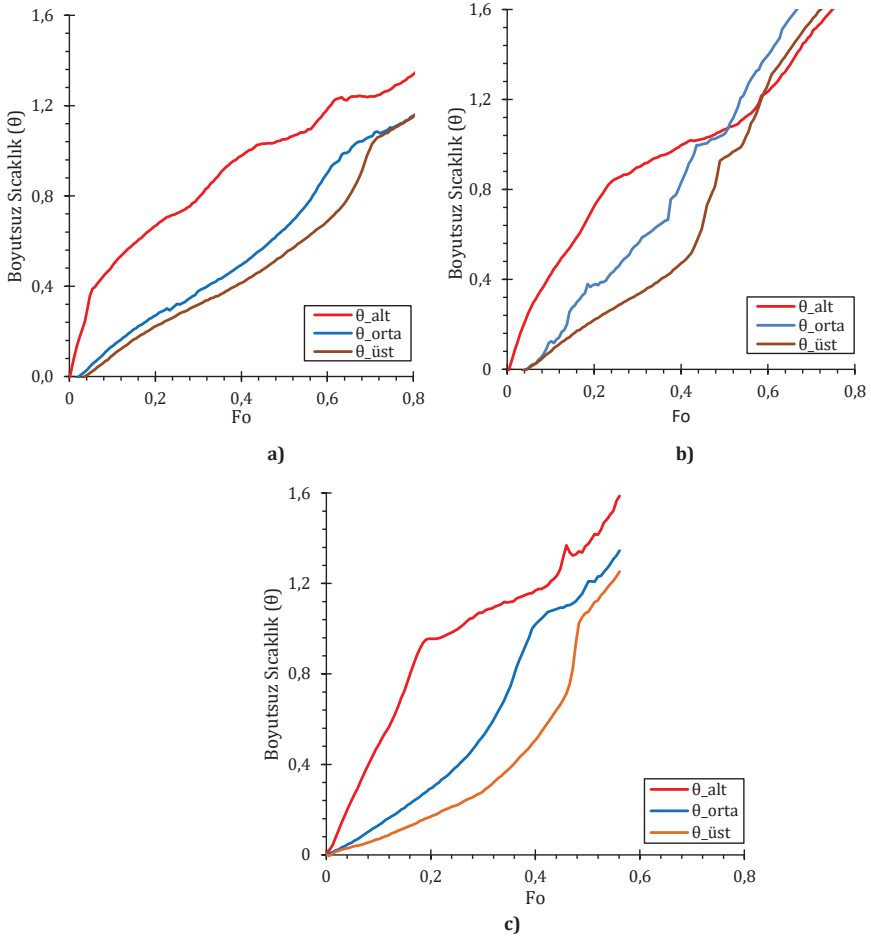
Aynı durum orta noktadan ölçülen parafin sıcaklığı için ise 4 katmanlı da %3.2 iken, 8 katmanlı tel örgü de %5.4 iyileşme söz konusudur. Parafinin en üstünden ölçülen sıcaklık başka bir deyişle parafinin tamamen erimesi durumunda 4 katmanlı tel örgü de %3.2, 8 katmanlı tel örgü de %5 iyileşme söz konusudur. Faz değiştiren malzemesinin içerisine tel örgü yerleştirmek ilave elektrik tüketimine, ısı kaybına vb. olumsuz durumlara sebep olmamaktadır. Dolayısıyla faz değiştiren malzemenin içerisine gözenekli ortam yerleştirmek ilave güç gerektirmeksizin parafinin daha hızlı erimesi sağlanmıştır. Erimenin etkisi boyutsuz parametreler kullanılarak da belirlenebilir. Bu kapsamda ilk olarak boyutsuz sıcaklık parametresini Denklem 2'de verildiği gibi hesaplamak mümkündür (Ray, Rakshit, Ravi Kumar ve Gurgenci, 2021).

$$\theta = \frac{T(t) - T_i}{T_m - T_i} \quad (2)$$

Burada, T (°C) herhangi bir zamandaki sıcaklık, T_i (°C) deneye başlangıç sıcaklığı, T_m (°C) parafinin erime sıcaklığını ifade etmektedir. Fourier sayısı ise Denklem (3)'te gösterildiği gibi hesaplanabilir (Ostrogorsky ve Glicksman, 2015; Ghasemi, Hoseinzadeh ve Memon, 2022).

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_s^2} \quad (3)$$

Burada, α (m^2/s) ısı yayılma katsayısı, t (s) zamanı ve L_s (m) ise karakteristik uzunluğu ifade etmektedir. Karakteristik uzunluk, hacmin (m^3) alana (m^2) bölünmesiyle elde edilir.



Şekil 7. 2464 W/m² Isıtıcı Gücünde Boyutsuz Sıcaklığının Fourier Sayısıyla İlişkisi a) Tel Örgüsüz, b) 4 Katmanlı Tel Örgü, c) 8 Katmanlı Tel Örgü

Şekil 7’de katmanlı tel örgülü ve örgüsüz test odalarında erime sürelerinin boyutsuz sıcaklık ve Fourier sayısı arasındaki ilişkisi verilmiştir. Deney odaları karşılaştırıldığında, ısıtıcı yakın faz değiştiren malzemesinin alt kısmında bulunan termokuplda ölçülen sıcaklıktan erime daha erken sürede olurken ısıtıcıdan uzakta olan üst kısımdan termokupldan ölçülen sıcaklığa göre erimesi süresinin daha geç olduğu görülmektedir. Denklem (2)’de verilen boyutsuz sıcaklık denkleminde faz değiştiren malzeme erime sıcaklığına ulaştığında boyutsuz sıcaklık bire eşit olacaktır. Dolayısıyla $\theta=1$ değerinden sonra o bölge faz değiştiren malzeme tamamen sıvı haldedir. Şekil 7’de katı halden sıvı hale geçiş ($\theta=1$) belirgin bir şekilde görülmektedir. Isıtıcı çalıştırılıp, ısı geçişi başladığında, katı fazdaki

belirli bir faz değiştiren malzeme kütlesi, enerji kaynağına daha yakın olan daha yüksek enerjiye sahip bitişik faz değiştiren malzemesi kütlesinden ısı alır.

Tablo 3. Farklı Deney Odalarında Bulunan Faz Değiştiren Malzemenin Erime Süreleri

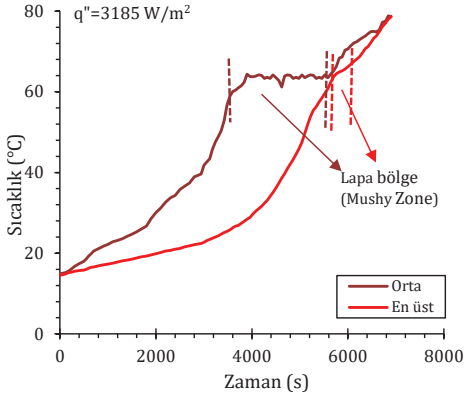
	2090 W/m ²				2464 W/m ²			3185 W/m ²	
	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst
4 katmanlı tel örgü (%)	-1,4	1,9	1,5	12,0	3,2	2,8		11,2	6,8
8 katmanlı tel örgü (%)	18,9	8,5	2,2	24,0	5,4	5,0		18,5	9,1

Tablo 3'te deney odasında tel örgüsüz ve farklı katman sayısındaki tel örgülerin içerisinde bulunan parafin mumun erime süreleri verilmiştir. 3185 W/m² ısı akısında tel örgüsüz deney çalışmasında deney odasının en alt kısmında bulunan termokupldan bağlantı sorunu nedeniyle sıcaklık verisi alınamamıştır. Tablo 3'te görüldüğü üzere deney odasında tel örgü bulunması ve bu tel örgülerin katman sayısı arttıkça erime süresi azalmaktadır. Beklenildiği gibi ısı akısının artmasıyla da parafinini her bir noktasından erime süresi de azalmaktadır.

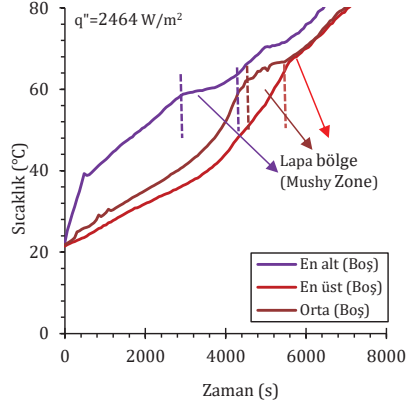
Tablo 4. Tel Örgü Katmanlarının Farklı Isıtıcı Güçlerine Göre Erime Süresindeki İyileşmeler

	2090 W/m ²				2464 W/m ²			3185 W/m ²	
	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst	En alt	Orta	En üst
4 katmanlı tel örgü (%)	-1,4	1,9	1,5	12,0	3,2	2,8		11,2	6,8
8 katmanlı tel örgü (%)	18,9	8,5	2,2	24,0	5,4	5,0		18,5	9,1

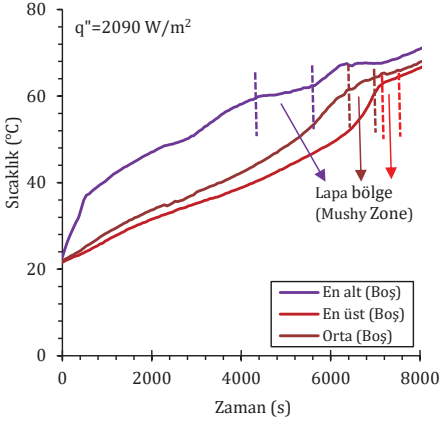
Tablo 4'te 4 ve 8 katmanlı tel örgülü test odalarında bulunan parafin mumun, tel örgüsüz halde bulunan parafin mum ile erime sürelerindeki iyileşmelerin kıyaslanması verilmiştir. Parafin mumun erime süresinde katman sayısı arttıkça erime süresinde iyileşmeler görülmektedir. Burada erime süresindeki iyileşme % 24'e kadar olduğu görülmektedir.



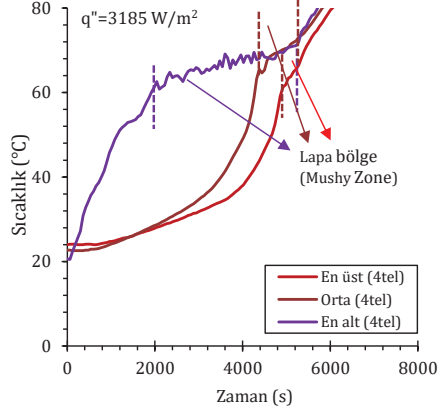
a)



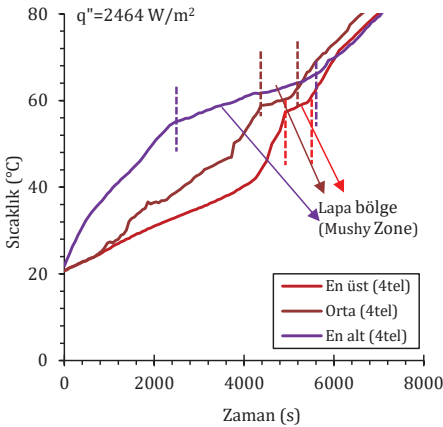
b)



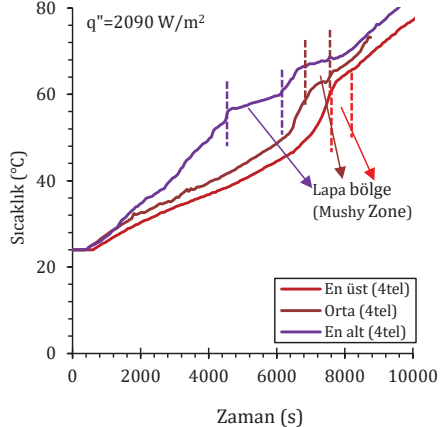
c)



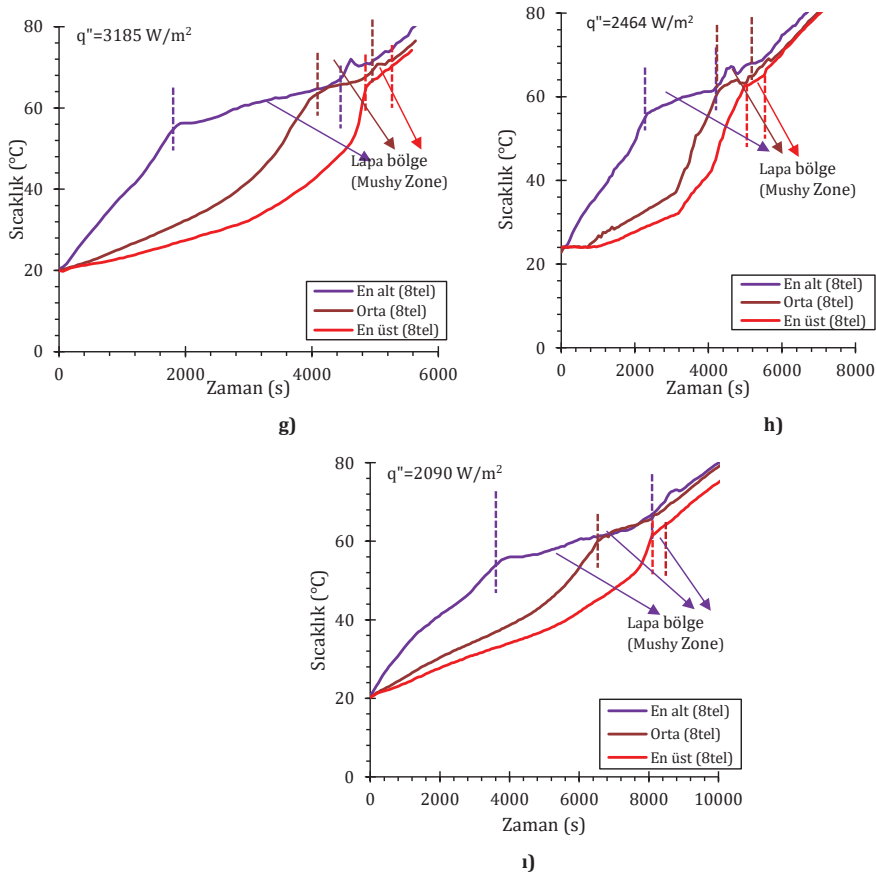
d)



e)



f)



Şekil 8. Farklı ısıtıcı güçlerinde Lapa Bölgelerin Belirlenmesi

Denklem 4'te faz değiştiren malzeme içerisinde sıvı oranını veren ifadeler sunulmuştur. Bu sıvı oranları FDM'nin sıcaklığına bağlı olarak:

$$f_{FDM} = \begin{cases} 0 & T_{FDM} \leq T_{katı} \\ \frac{T_{FDM} - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}} & T_{katı} \leq T_{FDM} \leq T_{sıvı} \\ 1 & T_{FDM} \geq T_{sıvı} \end{cases} \quad (4)$$

hal değişimleri belirlenebilir. f_{FDM} sıvı oranını, $T_{katı}$, $T_{sıvı}$ ve T_{FDM} sırasıyla faz değiştiren katı hal sıcaklığı, sıvı hal sıcaklığı ve o zamandaki FDM'nin sıcaklığını ifade etmektedir (Baki Sezgin, Gökaslan ve Uçkan, 2023).

Şekil 8'de farklı ısıtıcı güçlerinde a), b), c) tel örgüsüz, d), e), f) 4 katmanlı tel

örgü, g), h), ı) 8 katmanlı tel örgü test odalarının lapa bölge sınırları gösterilmiştir. Her bir deney odasının alt kısmındaki ısıtıcıya yakın bölgedeki faz değiştiren malzeme ilk erimeye başlar. Daha sonra ısı geçişi yukarıya doğru olmakta orta ve üst kısımdaki faz değiştiren malzeme erimeye başlar. Erime, deney odasında bulunan tel örgü katman seviyesine kadar, tel örgü sayesinde eşit dağılı olarak gerçekleşmektedir. Burada paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının faz değiştiren malzemesininkine göre yüksek olmasının etkisi söz konusudur. En yüksek ısı akısında, her bir deney odasında alt kısımda bulun FDM için lapa bölgeleri aralıkları diğer ısı akılarına göre daha geniştir. Katmanlı tel örgülü deney odasında yapılan deneylerde lapa bölgeleri aralıkları boş (tel olmayan) deney odasının lapa bölgesi aralıklarına göre daha belirgindir. Deney odasının en üst kısımda bulunan termokupplardan ölçülen verilere göre FDM'nin lapa bölgeleri çok kısa aralıktadır. Deney odası alttan ısıtıldığı için üst tarafta bulunan FDM'nin sıcaklığı sürekli artmakta ve alt kısımdan üst kısma doğru katı formdan sıvı forma dönüşecektir.

4. Tartışma

Isı depolama (gizli ısı) uygulamalarında tercih edilen faz değiştiren malzeme olarak daha çok parafin malzemesi kullanılmaktadır. Parafin malzemesinin düşük ısı iletim katsayısı sebebiyle dezavantaja sahip olsa da ısı enerjisi depolama süresi açısından avantajlıdır. Bu deneysel çalışmada deney odasının içerisine ısı iletim katsayısı yüksek malzeme yerleştirilerek düşük ısı iletim katsayılı parafinin erime süresindeki değişim araştırılmıştır.

Deney esnasında, parafin mumu faz değiştiren malzemenin en yüksek çalışma sıcaklığına (bozulma sıcaklığına) dikkat edilmiş ve deney odasında bulunan parafinin bütün deney kombinasyonlarında tamamen erimesi sağlanmıştır. Deneyler, deney odasına alttan sabit ısı akısı sınır şartı uygulanarak yapıldığı için deney odasının alt kısmında bulunan parafin mumunun erimesi daha erken, deney odasının üst kısmına doğru ilerledikçe parafin mumun erimesi biraz daha uzun süre almıştır. Bu bakımdan deney odasının alt kısmında kalan parafin mum malzemesinin üst noktalar tamamen eriyinceye kadar sıcaklığı deney sırasında kontrol edilmiş ve en yüksek çalışma sıcaklığına aşmaması dikkat edilmiştir. Isıtıcı plakanın üzerinde tel örgülü ya da tel örgüsüz olması durumundaki test odalarında yapılan bütün deneylerde mümkün mertebe aynı sabit ısı akılarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Üç farklı durumda (tel örgüsüz, 4 katmanlı ve 8 katmanlı tel örgü) ve üç farklı ısı akılarında deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre, tel örgüde katman sayısı arttıkça erime süresi azalmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre erime süresinde ısıtıcı gücünün etkisi çok önemlidir. Katmanlı tel örgülü deney sonuçları, tel örgüsüz deneylerden elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında en alt kısımda FDM'nin erime süresinde %24'e kadar iyileşme söz konusudur. Erime

süresi, en üst ve orta kısımda FDM biraz daha düşük olsa da tel örgüsüz deney sonuçlarıyla kıyaslandığında %1.5 ile 11.2 arasında iyileşme söz konusudur. Tel örgü malzemesinin ısı iletim katsayısı parafin mumuna göre oldukça yüksektir. Böylece ısıyı önemli ölçüde ve homojen olarak yukarıya taşımaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara dayanarak, tel örgü olan ve olmayan her üç deney odası için ısı gücü (DC güç kaynağından sağlanan) artmasıyla FDM erime (gizli ısı depolama) süresi azaltılmaktadır. Tel örgüler, ısı güce bağlı olarak yaklaşıklık olarak aynı miktarda parafin mumun erimesi için gereken süreyi boş deney odası ile kıyaslandığında 4 katmanlı ter örgüde %1.9-12, 8 katmanlı tel örgü de ise %2.2-24 arasında iyileşme elde edilmiştir. FDM'nin erime işlemi sırasında tel örgülü deney odalarında sıcaklık profilleri, tel örgüsüz deney odası sıcaklık profili arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Deney odalarındaki tel örgülerin paslanmaz çelik malzemeden yapılmış olup ısı iletim katsayısı FDM'e göre yüksektir. Tel örgünün ısı iletim katsayısının yüksek olmasından kaynaklı ısı geçişinin artırması nedeniyle, tel örgülü ortamların lapa bölge süresi üzerinde bir etkiye sahiptir. Yapılan deneylerdeki gözlemlerden sonucunda içerisinde tel örgü bulunan faz değiştiren malzemelerde erime dağılımı tel örgüsüz ortama göre daha homojen olduğu belirlenmiştir. Deney odasının içerisine tel örgü yerleştirmek ilave bir güç harcamaya etkisi olmayacağından erime sürelerindeki iyileşmeye de bakıldığında faz değiştiren malzemelerde ısı iletim katsayısı yüksek malzeme kullanmak erime süresine pozitif etki sağlamıştır.

Ayrıca katmanlı tel örgüler oluşturulurken tel kafesler üst üste konulmuş ve ince tel yardımıyla sıkıştırılmıştır. Bu durum tel örgülerin arasında temas direncine sebep olmaktadır. Temas direncini en aza indirmek için kaynak veya lehimleme işlemi ile yapılabilir. Böylece tel örgüler katmanları arasında her bir noktasından daha iyi temas edecektir. Temas direncini en az hale getirerek faz değiştiren malzemesinin erime sürelerinin daha da azalacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynakça

Akyurek, E. F. ve Yoladi, M. (2021) "An experimental investigation on melting and solidification behavior of phase change material in cylindrical latent heat storage units with minichannel", *Journal of Energy Storage*, 41, 102938. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102938>

- Albaldawi, R. A. H., Shyaa, A. K. ve Hammendy, B. M. H. (2015) "Experimental Study on the Effect of Insertion of Copper Lessing Rings in Phase Change Material (PCM) on the Performance of Thermal Energy Storage Unit", *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 60-72. Erişim adresi <https://alkej.uobaghdad.edu.iq/index.php/alkej/article/view/265/260>, Son Erişim Tarihi: 10.03.2024.
- Baki Sezgin, E., Gökaslan, M. Y. ve Uçkan, İ. (2023) "Numerical Analysis of The Multilayer Structures Melting with Different Hole Network with Phase Change Material", *Energy Environment and Storage*, 3(3), 88-95. <https://doi.org/10.52924/ZBHA5406>
- Chibani, A., Merouani, S. ve Bougriou, C. (2022) "The performance of hydrogen desorption from a metal hydride with heat supply by a phase change material incorporated in porous media (metal foam): Heat and mass transfer assessment", *Journal of Energy Storage*, 51, 104449. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104449>
- Duan, J. (2021a) "A novel heat sink for cooling concentrator photovoltaic system using PCM-porous system", *Applied Thermal Engineering*, 186, 116522. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116522>
- Duan, J. (2021b) "The PCM-porous system used to cool the inclined PV panel", *Renewable Energy*, 180, 1315-1332. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.097>
- Ebadi, S., Tasnim, S. H., Aliabadi, A. A. ve Mahmud, S. (2020) "An experimental investigation of the charging process of thermal energy storage system filled with PCM and metal wire mesh", *Applied Thermal Engineering*, 174, 115266. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115266>
- Gasia, J., Miró, L., de Gracia, A., Barreneche, C. ve Cabeza, L. (2016) "Experimental Evaluation of a Paraffin as Phase Change Material for Thermal Energy Storage in Laboratory Equipment and in a Shell-and-Tube Heat Exchanger", *Applied Sciences*, 6(4), 112. <https://doi.org/10.3390/app6040112>.
- Ghasemi, M. H., Hoseinzadeh, S. ve Memon, S. (2022) "A dual-phase-lag (DPL) transient non-Fourier heat transfer analysis of functional graded cylindrical material under axial heat flux", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 131, 105858. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmass-transfer.2021.105858>
- Juaifer, H. J. A., Ayani, M. B. ve Poursadegh, M. (2020) "Melting process of paraffin wax inside plate heat exchanger: experimental and numerical study", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(3), 905-916. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09275-w>

- Kahwaji, S. ve White, M. A. (2021) "Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Influence of Molecular Structure on Properties", *Molecules*, 26(21), 6635. <https://doi.org/10.3390/molecules26216635>
- Kozak, M. ve Kozak, Ş. (2012) *Enerji Depolama Yöntemleri, SDU International Technologic Science*, 24(2), 17-29. Erişim adresi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/utbd/issue/25984/273706>, Son Erişim Tarihi: 10.03.2024.
- Li, W. Q., Qu, Z. G., Zhang, B. L., Zhao, K. ve Tao, W. Q. (2013) "Thermal behavior of porous stainless-steel fiber felt saturated with phase change material", *Energy*, 55, 846-852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.064>
- Mashayekhi, M., Houshfar, E. ve Ashjaee, M. (2020) "Development of hybrid cooling method with PCM and Al₂O₃ nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries", *Applied Thermal Engineering*, 178, 115543. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115543>
- Mustaffar, A., Harvey, A. ve Reay, D. (2015) "Melting of phase change material assisted by expanded metal mesh", *Applied Thermal Engineering*, 90, 1052-1060. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.057>
- Opolot, M., Zhao, C., Keane, P. F., Liu, M., Mancin, S., Bruno, F. ve Hooman, K. (2023) "Discharge performance of a high temperature phase change material with low-cost wire mesh", *Applied Thermal Engineering*, 223, 120050. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120050>
- Ostrogorsky, A. G. ve Glicksman, M. E. (2015) "Segregation and Component Distribution", *Handbook of Crystal Growth*, 995-1047. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63303-3.00025-0>
- Ray, A. K., Rakshit, D., Ravi Kumar, K. ve Gurgenci, H. (2021) "Silicon as high-temperature phase change medium for latent heat storage: A thermo-hydraulic study", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101249>



EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) DESIGNED IN DIFFERENT SIZES

Adem YILMAZ^{1*}, Sinan ÜNVAR², Bünyamin AYGÜN³

¹ Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, BATMAN
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7266-0866>

² Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Tek. Böl, AĞRI
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9144-7638>

³ Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otom. Böl, AĞRI
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9384-1540>

Keywords

Fuel cell, membrane, performance, polymer electrolyte

Abstract

Fuel cells, the technology of the future, are devices that create electrical energy by combining hydrogen and oxygen as a result of a chemical reaction and release heat with H₂O as waste. Since electricity is produced without combustion, less pollution occurs. The part where the chemical reaction takes place in the Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cell consists of the membrane. In this study, the fuel consumption of different sizes (5-25-50 cm²) of fuel cells was investigated and the factors affecting the performance were determined experimentally. First of all, the PEM fuel cell was installed, and appropriate amounts of Hydrogen (H₂) and Oxygen (O₂) were sent to the fuel cell according to the characteristics of the established cell. During the study, the performances of different sizes of fuel cells were determined. The behavior of the fuel cell was determined according to the C-H ratio values in the fuel cell and power values were found according to the produced current. The performance of fuel cells was evaluated according to their size and the amount of electrical energy they would produce was calculated. In this case, it was determined that the fuel cell with a surface area of 5 cm² was the most efficient in C60H60, 25 cm² in C60H46 and 50 cm² in C60H46, respectively.

* adem.yilmaz@batman.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1358445

FARKLI EBATLARDA TASARLANAN POLİMER ELEKTROLİT MEMBRANLI YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Anahtar kelimeler

Öz

Yakıt hücresi, mebran, polimer elektrolit, güç performansı

Geleceğin teknolojisi olan yakıt hücreleri hidrojen ile oksijenin kimyasal reaksiyon sonucu birleşmesi ile elektrik enerjisinin meydana gelmesini ve atık olarak H₂O ile ısı açığa çıkmasını sağlayan cihazlardır. Yanma olmaksızın elektrik üretildiği için daha az kirlilik meydana gelmektedir. Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücresindeki kimyasal reaksiyonun olduğu kısım membran zardan oluşmaktadır. Bu çalışmada farklı boyutlardaki (5-25-50 cm²) yakıt hücrelerinin yakıt sarfiyatı ile ilgili incelemeler yapılarak performansa etki eden faktörler deneysel olarak belirlenmiştir. Öncelikli olarak PEM yakıt hücresi kurulumu yapılmış, kurulan hücrenin özelliklerine göre uygun miktarlarda Hidrojen (H₂) ve Oksijen (O₂) yakıt hücresine gönderilmiştir. Çalışma esnasında değişik boyutlardaki yakıt pillerinin performansları belirlenmiştir. Yakıt hücresindeki C-H oranı değerlerine göre yakıt hücresinin davranışı belirlenmiş ve üretilen akıma göre güç değerleri bulunmuştur. Boyutlarına göre yakıt hücrelerinin performansları değerlendirilerek üretecekleri elektrik enerji miktarları hesaplanmıştır. Bu durumda; yüzey alanı 5 cm² olan yakıt hücresinin C60H60'da, 25 cm² olanın C60H46'da ve 50 cm² olanın C60H46'da en verimli olduğu tespit edilmiştir.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 24.10.2023

Submission Date : 24.10.2023

Kabul Tarihi : 08.12.2023

Accepted Date : 08.12.2023

1. Introduction

Fuel cell, an electrochemical device, combine fuel (hydrogen) and oxidant (oxygen) and convert the resulting energy directly into electrical energy, waste heat and water. They are classified according to electrolyte types (Mogorosi, Oladiran and Rakgati, 2020). Fuel cells are globally divided into 6 types; Alkaline Fuel Cells (AFCs), Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFCs), Molten Carbonate Fuel Cells (MCFCs), Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), Proton Electrolyte/Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) and Direct Methanol Fuel Cells (DMFCs). A brief summary of the general features of these 6 types of fuel cells is shown in Table 1.1 (Ebrahimi, Kujawski, Fatyeyeva and Kujawa 2021, Li, Kujawski and Rynkowska, 2019)

Table 1.Characteristics of fuel cell types (Ebrahimi et al., 2021; Li et al., 2019)

Fuel Cell Type	Electrolyte Type	Operating temperature	Productivity	Fuel
Alkaline Fuel Cells (AFCs)	Potassium hydroxide solution	Room temperature up to 250 °C	60% - 70%	H ₂ - O ₂
Proton Electrolyte/Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs)	Proton Exchange Membrane	Room temperature up to 100 °C	40% - 60%	H ₂ - O ₂ or Air
Direct Methanol Fuel Cells (DMFCs)	Proton Exchange Membrane	Room temperature up to 130 °C	20% - 30%	CH ₂ OH - O ₂ or Air
Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFCs)	Phosphoric acid	160 °C – 220 °C	55%	Natural Gas, Biogas, H ₂ - O ₂ or Air
Molten Carbonate Fuel Cells (MCFCs)	Molten mixture of alkali metal carbonates	620 °C – 660 °C	65%	Natural Gas, Biogas, Coal gas, H ₂ - O ₂ or Air
Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs)	Ceramic that conducts oxide ion	800 °C – 1000 °C	60% - 65%	Natural Gas, Biogas, Coal gas, H ₂ - O ₂ or Air

Since the fuel cell type that constitutes our study subject is Proton Exchange Membrane Fuel Cells, information about these fuel cells will be given and in the

following sections, the performance evaluations of polymer electrolyte membrane fuel cells designed in different sizes will be explained.

1.1 Proton/Polymer Electrolyte/Exchange Membrane Fuel Cells

Scientific studies on proton exchange membrane fuel cells received noteworthy interest because of its broad and various implementations in electrochemical devices, chemical sensors, supercapacitors, batteries and power generation, leading to the planning of membrane electrode setups operating in distinct types of fuel cells. (Hammes-Schiffer and Soudackov, 2008; Kraytsberg and Ein-Eli, 2014; Kreuer, Paddison, Spohr and Schuster, 2004). PEMFCs are among the promising electrochemical manufacturing gadgets because of their superior productivity, eminent power intensity and energy sources (Cleghorn, Springer, Wilson, Zawodzinski, Zawodzinski, and Gottesfeld, 1997; Li, Jensena, Savinell, and Bjerrum, 2009). They are known to have similar configurations to redox flow batteries (RFBs) type gadgets. These two device types have the potential to convert the chemical energy present in the energy vectors gained from renewable sources into electrical energy. However, the absence of liquid components that make PEMFCs more useful for use in mobile devices makes them advantageous over RFBs (Zhang and Sun, 2021). Figure 1 shows a schematic diagram showing the components of a single PEMFC. These alternative energy sources provide the opportunity to obtain energy from hydrogen and synthetic or bio-synthetic fuel and can operate more efficiently and with environmental sustainability than thermal engines (Scott and Shukla, 2004; Whittingham, Savinell, and Zawodzinski, 2004). Fuel cells which utilized for a diverse of technological applications, such as in mobile phones, portable electronic devices, and etc. are electrochemical devices (Campanari, Manzolini, and García de la Iglesia, 2009; Cano, Banham, Ye, Hintennach, Lu, Fowler, and Chen, 2018; Zhang and Shen, 2012).

The polymer electrolyte membrane, which forms the main component of the electrochemical device, also provides proton conductivity by ensuring the transport of protons from the anode part to the cathode part (Haile, Boysen, Chisholm and Merle, 2001). Membranes containing perfluorosulfonic acid polymers are widely utilized among various types of fuel cells due to their eminent conductivity properties and strong mechanical and chemical characteristics. Among these, Nafion® is one of the best known. These membranes are utilized in high relative humidity environments and temperatures below 90 °C. Nafion® was developed and marketed by DuPont before the 2000s. Nowadays, it is utilized as low-temperature PEM by various researchers and companies. The expensive production processes of Nafion-type membranes and the intense decrease in proton conductivity, which is important for system performance in low hydration-high temperature (above 90 °C) situations, are important disadvantages of these

membranes in their operation as low-temperature PEMFCs. As a result of these limitations, the production process of PEMFCs that can operate at higher temperatures, taking into account the absence of water, has been initiated (Pineri and Eisenberg, 1987; Samms, Wasmus, and Savinell, 1996).

Figure 1. shows the different components of a single PEMFC. The core of a PEMFC is the MEA (Membrane Electrode Assembly), which consists of two catalytic materials that act as anodic and cathodic electrodes, separated by a PEM (Cruz-Martínez, Tellez-Cruz, Guerrero-Gutiérrez, Ramírez-Herrera, Salinas-Juárez, Velázquez-Osorio, and Solorza-Feria, 2019).

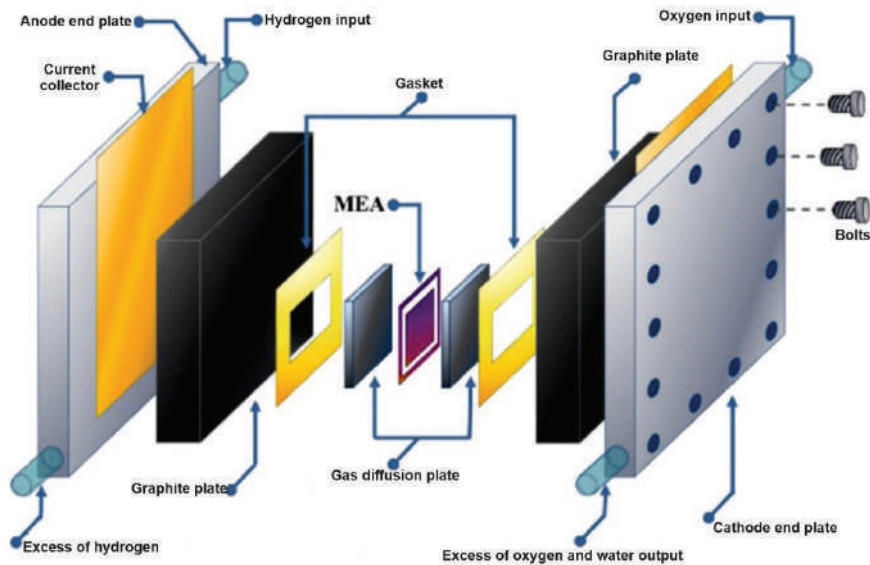


Figure 1. Different elements of a PEMFC (Cruz-Martínez et al., 2019)

1.2 Operating Principles of Proton Electrolyte/Exchange Membrane Fuel Cells

The operating principle of PEMFCs is that H₂ fuel oxidizes at the anode, releasing electrons and forming protons. Electrons and protons then flow to the cathode through the external circuit and proton exchange membrane tightly placed between the anode and cathode, respectively. At the cathode, they combine with dissolved oxidizing O₂ to produce water and heat. Fuel cell processes facilitate reactants moving through bipolar gas channel plates into GDLs (Gas Diffusion Layers). The function of GDLs is to spread the reactants over the catalyst layer with a more even distribution. In the catalyst layer, the reactants are then transported by diffusion and advection for an electrochemical reaction (Figure

2.). PEM can transport protons and dissolved water, but gases cannot penetrate (Magorosi, Oladiran, and Rakgati, 2020).

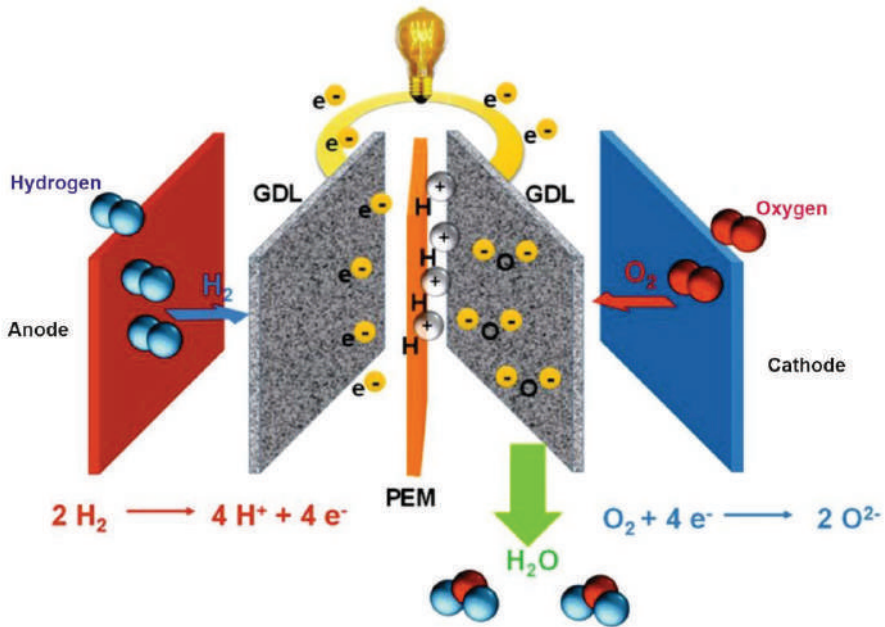


Figure 2. The operating principle of PEMFC (Magorosi et al., 2020)

1.3 Enhancement of Proton Exchange Membranes (PEMs)

Studies on the enhancement of new membranes with conductive properties for PEMFC implementations has increased recently (Esmaeili, Gray and Webb, 2019). The development of new environmentally and human-friendly alternatives to fossil fuels and efforts to reduce the concentration of carbon dioxide in the atmosphere have led scientists to conduct research on polymers that are stable and can operate over wide ranges. Among the many PEMFCs synthesized for these purposes, three need to be particularly noted (Wang, Chen, Mishler, Cho and Adroher, 2011). The first are those containing PFSA (Perfluorosulfonic Acid). For instance, Nafion is utilized quite intensively and is the most studied polymer in the fuel cell industry (Mauritz and Moore, 2004). Its use has led to a broad range of implementations, including in chlor-alkali processing technologies (Ito, Maeda, Nakano, and Takenaka 2011; Vidakovic-Koch, Gonzalez Martinez, Kuwertz, Kunz, Turek, and Sundmacher, 2012). Microbial fuel cells (Bakonyi, Koók, Rózsensberszki, Tóth, Bélafi-Bakó, and Nemestóthy, 2020; Chae, Choi, Ajayi, Park, Chang, and Kim, 2008), among others has become widespread, and merchant

Nafion type membranes of distinct coarseness can be purchased from various establishments.

The second main group consists of sulfonated aromatic polymers. The most studied sulfonated polymers are sulfonated poly ether ether ketone (SPEEK) and sulfonated poly arylene ether ketone (SPAEK) polymers. Poly ether ether ketone (PEEK), based on a linear polymeric basis, is a semi-crystalline polymer with a glass transition temperature of 143 °C and a melting point of 343 °C. This fluorine-free polymer shows high thermal stability and chemical resistance. The proton conductivity of the polymer can be significantly increased by the sulfonation feature of the aromatic position (Carbone, Pedicini, Portale, Longo, D'Ilario, and Passalacqua, 2006). This enables operation at temperatures where electrochemical reaction rates increase (Kaliaguine, Mikhailenko, Wang, Xing, Robertson, and Guiver, 2003).

The third and final class of polymers are those associated with heterocyclic systems containing derivatives of polybenzimidazole (PBI) (Escorihuela, Olvera-Mancilla, Alexandrova, del Castillo and Compañ, 2020). Recently, the synthesis of PBI-based polymer types that perform well as PEMFCs in several new fields has been achieved (Escorihuela et al., 2020; Liu, Khan, Lee, Kim, Akhtar, and Han, 2013; Wang, Ni, Liu, Gong, and Wang, 2018). The high thermal stability of PBI polymers and their derivatives has led to the idea of considering them as potential polymers as high-temperature PEMFCs. Despite its superb mechanical and thermal stability, pure PBI has low conductivity and these membranes need to be supported with inorganic acids which is by far the most commonly used (Aili, Henkensmeier, Martin, Singh, Hu, Jensen and Qingfeng, 2020).

2. General Information

2.1 Previous Studies

There are many factors that affect the performance of PEMFCs. As a result of the literature research, it has been determined that performance evaluation has been tried to be determined by applying different methods in many different applications. Considering the developing technology over the years, it has been determined that the structures of fuel cells have been tried to be improved with innovative processes and performance evaluations have been carried out in this direction. In order to better emphasize the importance of the subject, this section provides information about some recent studies. (Han, Park and Chung, 2016) presented an operation optimization method and demonstrated its implementation to a PEMFC system. For this purpose, researchers studied on the optimization problem to maximize system efficiency. Many types of modeling were developed with the help of artificial neural networks and semi-empirical equations.

Optimization values showed that the efficiency difference could reach 1.2-5.5% depending on the power output range. As a result of the study, the difference between the measured and predicted values was determined to be insignificant. This showed that the proposed method was successful in increasing the system efficiency of the fuel cell. (Vazifeshenas, Sedighi and Shakeri, 2016) examined the effect of composite flow field application in PEMFC by utilizing computational fluid dynamics. Validation studies were carried out using simulations. Observations were made using different reactant parameters. It was determined that especially the way the reactants were distributed on the surface affected the system performance. (Mubin, Bahrom, Azri, Ibrahim, Rahim, and Raihan, 2017) developed mathematical thermodynamic modeling and examined its effect on PEMFC performance. The efficiency of the model was figured out by applying the energy conversion gadget equations on thermal efficiency and was found to be 33.8%. It was found that the voltage output performance of PEMFC could be increased by increasing the input pressure and temperature of hydrogen. (Özgür and Yakaryilmaz, 2018) examined the 1 kW Horizon H-1000 XP PEMFC in their study on exergy and energy analysis. In the study, a test device was established and system efficiency analysis was carried out in accordance with the laws of thermodynamics. In the established mechanism, pure hydrogen was used directly as fuel. By changing the operating temperature and pressure, the performance of the system was examined with experimental and exergy-based parameters. The energy efficiency of the fuel cell was determined as 45.58% in the experimental examination and 41.27% in the parametric examination. (Parnian, Rowshan-zamir, Prasad, and Advani, 2018) examined SPEEK-based membranes containing SeO₂ nanoparticles in terms of performance and durability parameters. Various membranes were synthesized and their physicochemical properties were analyzed through tests such as TGA, XRD and FESEM. As a result of mechanical and thermal analyses, it was determined that the nanocomposite membrane had more advanced properties than the pure SPEEK membrane. (Toghyani, Nafchi, Afshari, Hasanpour, Baniasadi, and Atyabi, 2018) examined the effect of compression pressure on the performance of a PEMFC in terms of three different channel widths. The deformation of the GDL due to compression pressure was modeled and used as input in the Computational Fluid Dynamics (CFD) model. In the study, factors such as temperature distribution and mole fraction were also examined to determine the geometry with the best performance. As a result of the study and experiments, it was determined that when the channel width was reduced, the flow rate increased and the performance of PEMFC increased. (Huang, Ding and Zou, 2020) studied waste heat recycling by combining a thermoelectric generator and cooler with a PEMFC. For this new modeling in their research, they also derived a series of analytical formulas to examine the power output factor. The parameter known as the ecological performance coefficient was determined

as the objective function in evaluating the system performance. When compared with the individual fuel cell, it was determined that the maximum power density and ecological performance coefficient of this new hybrid system increased by 1.42% and 4.47%, respectively. When the Thompson effect was examined, it was determined that it might have a negative impact on the system performance to some extent. (Nalbant, Colpan and Devrim, 2020) conducted a mathematical modeling study of a high-temperature PEMFC with a natural gas-fed energy system. In the study, analyzes were made by examining the effects of some basic parameters (operating temperature, etc.) on system performance (various efficiency values). It was determined that the parameter that has the greatest impact on system performance is the anode stoichiometric ratio. Wilberforce and Olabi (2020) investigated the application of using an artificial neural network (ANN) to determine voltage and current in a proton exchange membrane fuel cell with a membrane area of 11.46 cm². Performance predictability for group data processing method (GDPM) as well as feed-forward back propagation (FFBP) neural networks have been used to predict the current and voltage obtained from the PEMFC under investigation. The research revealed that the GDPM neural network outperformed the FFBP neural network. Therefore, the study recommended GDPM neural network as the best model to predict the performance of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Additionally, it was determined that an increase in the reactant flow rate had a direct effect on the performance of the fuel cell, but this was directly proportional to the total irreversibilities in the battery. And therefore it was necessary to make the hydrogen flow lower for the fuel cell to operate economically. (Omran, Lucchesi, Smith, Alaswad, Amiri, Wilberforce and Olabi, 2021) studied the mathematical modeling of a PEMFC combined with a resistive load. In the study, the electric current parameter was determined by the intersection of the polarization curve and used as the input value to determine the PEM fuel cell performance. Differences varied between 2% and 6% depending on the applied load resistance. A controlled current source was used to simulate the variation of fan power consumption with stack temperature ranging from 36.5 W at 23 °C to 52 W at 65 °C. Both the model and the experiments showed an overall PEMFC system maximum efficiency of approximately 48%.

3. Material and Method

In this study titled Evaluation of the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC) Designed in Different Sizes, a device called Scribner 850e Multi Range Fuel Cell Test System was used to carry out the tests. Research and publication ethics were complied with in this study. The Model 850 Multi-Range Fuel Cell Test System features a complete test station for the operation and measurement of PEM/DMFC fuel cells. The Model 850 is ideal for single-cell and

short-stack fuel cell research and university programs. The Model 850 combines a computer-controlled device with fuel processing hardware in an integrated benchtop unit. The 850 uses the proven 890 as the basis for the electronic payload design. The powerful FuelCell® software package is included in the system to control station operation (The Model 850 Fuel Cell Test System, 2023). Photos of the 850e Multi Range Fuel Cell Test System used to perform the tests are given in Figure 3.

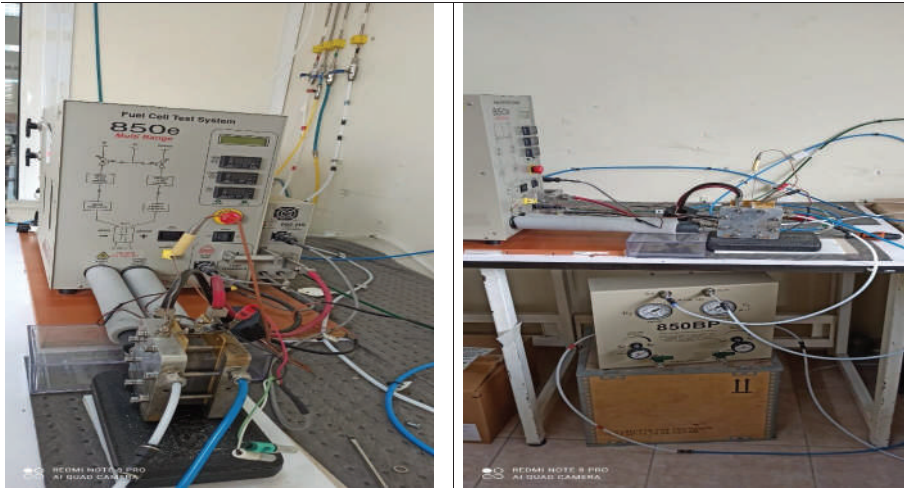


Figure 3. Views of the 850e Multi Range Fuel Cell Test System

In addition to the information mentioned above, the 850e Multi Range Fuel Cell Test System has some important advantages and features. Table 3.1 provides information summarizing the features of the 850e Multi Range Fuel Cell Test System (The Model 850 Fuel Cell Test System, 2023).

Table 2. Various Features of the 850e Multi Range Fuel Cell Test System (The Model 850 Fuel Cell Test System, 2023)

1. Multiple current range electronic load options: 5/25/50 A or 10/50/100 A, 100 W, 20 V
2. Convenient for PEM cells up to 50 cm².
3. User-friendly computer-controlled cell operation and FuelCell® software for experimentation
4. Temperature controlled high performance 316L stainless steel humidifiers and heated gas transfer lines
5. Computer control of anode and cathode mass flow rates

6. Automatic control of N2 purge gas into the cell
 7. Detection of pressure loss for reactant and purge gases
 8. Current, voltage or power control modes
 9. Continuous real-time cell resistance and IR-free voltage measurement with current interruption
 10. Two high impedance reference inputs for full cell voltage plus half cell data
 11. Cell main terminals tolerant to a non-insulated cell and detection inputs
 12. Automatic Water Filling for Humidifiers
 13. Detection of alarm conditions and automatic hardware
-

During the experiments, 5 cm², 25 cm² and 50 cm² electrodes were used as Membrane Electrode Assemblies (MEA). The appearances of the MEAs used in the experiments are shown in Figure 4.

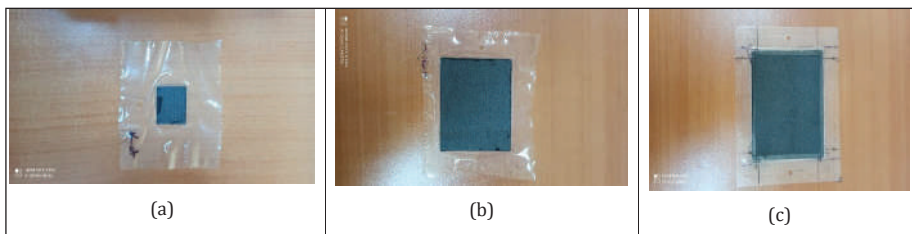


Figure 4. MEAs used in the experiments (a) 5 cm², (b) 25 cm² and (c) 50 cm²

Before starting the analysis and experimental performance tests of PEMFC, suitable materials were selected for the components of the fuel cell to be used. In the selection of these materials, parameters such as desired electrical and heat conduction, gas permeability, adequate mechanical strength and chemical stability, suitable and cheap in high-volume manufacturing methods, corrosion resistance and low density are important. In order to calculate the voltage produced in fuel cells, energy must first be explained. In addition, it is not possible to obtain full efficiency during the reaction. Since full efficiency cannot be achieved, lost heat occurs. Not all of the heating value of hydrogen can be used efficiently. Gibbs free energy, which expresses the energy difference between reactants and products and useful energy, is defined as follows.

The cell polarization curve obtained by subtracting activation, ohmic and condensation losses from the theoretical cell voltage was calculated. Anode and cathode activation losses are considered the same, but the majority of losses occur at the cathode due to the slowness of the oxygen reduction reaction.

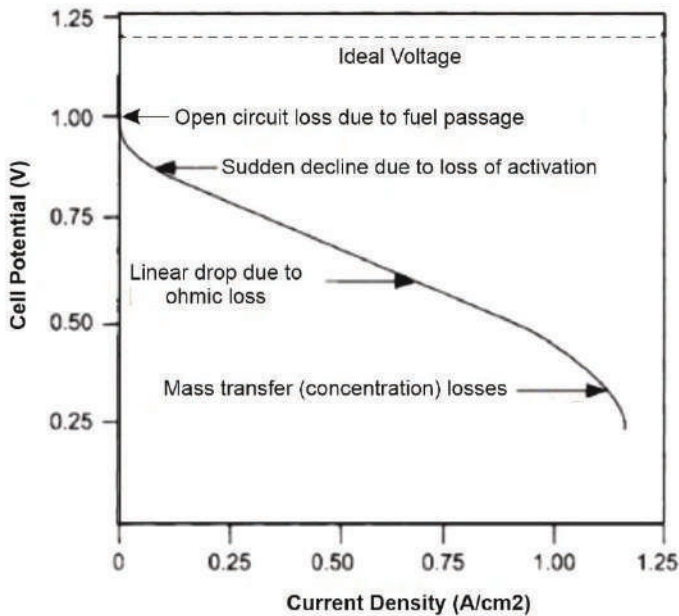


Figure 5. Voltage-Current Density Characteristic of Fuel Cell

$$V_K = V_{akt} + V_{ohm} + V_{kon} \tag{1}$$

The value of Gibbs free energy can be taken at different values for different temperatures. Negative values indicate that energy is released. ΔS in the Gibbs free energy formula expresses the lost energy (entropy) resulting from the reactants and the products occurred as a result of the reaction, as seen in expression (2).

$$G_0 = \Delta H - T \cdot \Delta S \tag{2}$$

Theoretically, the maximum fuel cell efficiency is calculated by assuming that all Gibbs free energy is converted into electrical energy.

$$W_{elk} = V_r \cdot Q \tag{3}$$

$$Q = n \cdot F \tag{4}$$

$$G_0 = -n \cdot F \cdot V_r \tag{5}$$

$$V_r = -\frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{n \cdot F} \tag{6}$$

In order to examine the test results accurately, measurements were made with the Hydrogen Control System. The temperatures of hydrogen and oxygen gases before they entered the system were determined and it was checked whether the system worked as desired at these temperatures. In order for the system to work properly, the temperature, humidity and flow rate values of the fuels were determined.

4. Results and Discussion

PEM fuel cells with sizes of 5 cm², 25 cm² and 50 cm² were used in the study. The performances of fuel cells of different sizes were compared. As a result of this comparison, it was determined which fuel cell size had the best performance. There are gas flow channels on the surface of the bipolar plate for the distribution of reactant gases within the fuel cell. Channel geometry may be different. In addition, the flow direction of the reactants in the fuel cell system can be equal or opposite as desired. The selection and optimization of the bipolar plate gas flow channel pattern greatly affects the performance of the fuel cell.

In three fuel cells, the current density value corresponding to the decreasing voltage value increased. These large increases continued up to 1V for the three-cell fuel cell and 0.5V for the single-cell fuel cell, and the increases in current density after these values decreased. Losses may take different forms depending on the number of cells. These losses may occur due to reasons such as disruptions in the stack connection, pressure drop due to friction, and increase in the number of transitions through which the reactants move.

It can be seen in Figure 6 that the amount of electrical power to be produced increases due to the increase in the number of cells in the PEM fuel cell.

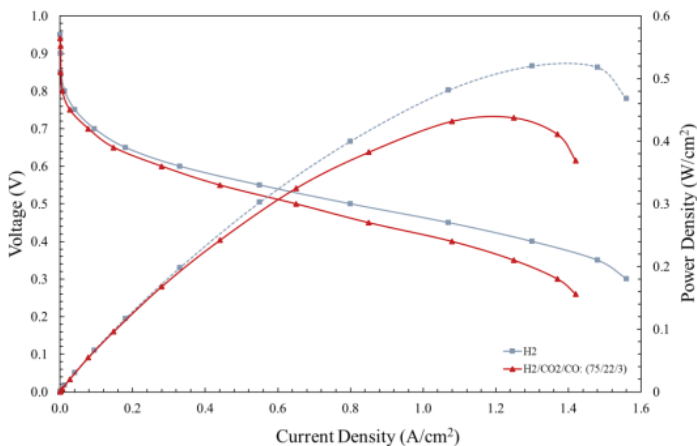


Figure 6. Electrical power to be produced due to the increase in the number of cells

As seen in Figure 4.1; when measurements were made within these given values range, it was observed that there was not much difference in volt values when the temperature values were increased at certain intervals. The appropriate temperature for the system was 10 °C, humidity was 20%, 9.8 Volt, 9.4 A. Current values were taken, checking the change in Watt values and looking at the system performance, the results were given in Table 4.1-2-3.

If we consider the value of approximately 25-50 cm² here, it is observed that the electrical power obtained from fuel cells increases up to this value and starts to decrease at 5 cm². The maximum electrical power values obtained from these three fuel cells are calculated as 2.40E+00 W, 9.88E+00 W and 19.89 W. This is due to the decrease in the resulting current density. This again occurs due to losses depending on the size of the fuel cell.

Table 3. Power data according to C-H ratio of a fuel cell with a surface area of 5 cm²

C-H ratio in fuel cell	Current I (mA/cm²)	Power (Watts)	Temperature (°C)	RH_Anode (%)	RH_Cathode (%)
C60H45	2,49E+03	2,40E+00	6,00E+01	4,83E+01	4,83E+01
C60H60	2,64E+03	2,75E+00	6,05E+01	5,02E+01	5,06E+01
C70H55	2,55E+03	2,51E+00	7,06E+01	5,01E+01	5,02E+01
C70H70	2,59E+03	2,67E+00	7,03E+01	9,91E+01	9,91E+01

Table 4. Power data according to C-H ratio of a fuel cell with a surface area of 50 cm²

C-H ratio in fuel cell	Current I (mA/cm²)	Power (Watts)	Temperature (°C)	RH_Anode (%)	RH_Cathode (%)
C60H46	9,74E+02	9,88E+00	6,04E+01	4,98E+01	4,98E+01
C60H60	9,42E+02	9,66E+00	6,04E+01	9,81E+01	9,74E+01
C70H55	8,29E+02	7,88E+00	6,98E+01	5,01E+01	5,07E+01
C70H70	7,62E+02	8,18E+00	7,00E+01	9,91E+01	9,83E+01
C80H65	5,80E+02	4,54E+00	7,98E+01	5,24E+01	5,29E+01

Table 5. Power data according to C-H ratio of a fuel cell with a surface area of 50 cm²

C-H ratio in fuel cell	Current I (mA/cm ²)	Power (Watts)	Temperature (°C)	RH_Anode (%)	RH_Cathode (%)
C60H46	9,74E+02	19,89E+00	8,04E+01	5,98E+01	5,98E+01
C60H60	9,42E+02	19,87E+00	9,04E+01	10,81E+01	10,71E+01
C70H55	8,29E+02	17,81E+00	8,98E+01	9,01E+01	9,17E+01
C70H70	7,62E+02	18,10E+00	7,00E+01	9,90E+01	9,13E+01
C80H65	5,80E+02	17,50E+00	7,98E+01	5,24E+01	5,29E+01

5. Conclusions and Recommendations

In the study, PEM fuel cells with sizes of 5 cm², 25 cm² and 50 cm² were produced. The performances of fuel cells of different sizes were compared. The behavior of the fuel cell was determined according to the best operating temperatures and C-H percentage values, and power values were found according to the current generated. The results obtained in the current study;

- PEM fuel cell efficiency decreases because ion transfer decreases at high temperatures.
- Due to the increase in the amount of catalyst used in the fuel cell, hydrogen production increased, which in turn reduces the efficiency of the fuel cell.
- It was determined that the fuel cell with C60H60 content with a surface area of 5 cm² showed the best performance.
- It was determined that the fuel cell with C60H46 content with a surface area of 25 cm² showed the best performance.
- It was determined that the fuel cell with C60H46 content with a surface area of 50 cm² showed the best performance.
- It was concluded that large surface area and low temperatures should be preferred in fuel cell cell production.

Acknowledgement

We would like to thank all the employees of Ağrı İbrahim Çeçen University BAP unit for providing financial support to the project.

References

Aili, D., Henkensmeier, D., Martin, S., Singh, B., Hu, Y., Jensen, J., ... Qingfeng, L.

- (2020). Polybenzimidazole-based high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells: New insights and recent progress. *Electrochemical Energy Reviews*, 3, 793–845. Doi: <https://doi.org/10.1007/s41918-020-00080-5>
- Bakonyi, P., Koók, L., Rózsenberszki, T., Tóth, G., Bélafi-Bakó, K. & Nemestóthy, N. (2020). Development and application of supported ionic liquid membranes in microbial fuel cell technology: A concise overview. *Membranes*, 10(16). Doi: <https://doi.org/10.3390/membranes10010016>
- Campanari, S., Manzolini, G. & García de la Iglesia, F. (2009). Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations. *Journal of Power Sources*, 186, 464–477. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.09.115>
- Cano, Z.P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M. & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*, 3, 279–289. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0108-1>
- Carbone, A., Pedicini, R., Portale, G., Longo, A., D’Ilario, L. & Passalacqua, E. (2006). Sulphonated poly(ether ether ketone) membranes for fuel cell application: Thermal and structural characterization. *Journal of Power Sources*, 163, 18–26. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.066>
- Chae, K.J., Choi, M., Ajayi, F.F., Park, W., Chang, I.S. & Kim, I.S. (2008). Mass transport through a proton exchange membrane (Nafion) in microbial fuel cells. *Energy Fuels*, 22, 169–176. Doi: <https://doi.org/10.1021/ef700308u>
- Cleghorn, S., Springer, T., Wilson, M., Zawodzinski, C., Zawodzinski, T.A. & Gottesfeld, S. (1997). PEM fuel cells for transportation and stationary power generation applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22, 1137–1144. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00016-5)
- Cruz-Martínez, H., Tellez-Cruz, M.M., Guerrero-Gutiérrez, O.X., Ramírez-Herrera, C.A., Salinas-Juárez, M.G., Velázquez-Osorio, A. & Solorza-Feria, O. (2019). Mexican contributions for the improvement of electrocatalytic properties for the oxygen reduction reaction in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 12477–12491. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydne.2018.05.168>
- Ebrahimi, M., Kujawski, W., Fatyeyeva, K. & Kujawa, J. A. (2021). Review on Ionic Liquids-Based Membranes for Middle and High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEM FCs). *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 5430. <https://doi.org/10.3390/ijms22115430>

- Escorihuela, J., Olvera-Mancilla, J., Alexandrova, L., del Castillo, L. & Compañ, V. (2020). Recent progress in the development of composite membranes based on polybenzimidazole for high temperature proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications. *Polymers*, 12(9), 1861. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym12091861>
- Esmaeili, N., Gray, E.M.A. & Webb, C.J. (2019). Non-fluorinated polymer composite proton exchange membranes for fuel cell applications-A review. *Chemphyschem: a European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 20, 2016–2053. Doi: <https://doi.org/10.1002/cphc.201900191>
- Haile, S.M., Boysen, D., Chisholm, C.R.I. & Merle, R. (2001). Solid acids as fuel cell electrolytes. *Nature*, 410, 910–913. Doi: <https://doi.org/10.1038/35073536>
- Hammes-Schiffer, S. & Soudackov, A. (2008). Proton-coupled electron transfer in solution, proteins, and electrochemistry. *The Journal of Physical Chemistry B*, 112, 14108–14123. Doi: <https://doi.org/10.1021/jp805876e>
- Han, I., Park, S. & Chung, C. (2016). Modeling and operation optimization of a proton exchange membrane fuel cell system for maximum efficiency. *Energy Conversion and Management*, 113, 52-65. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.045>
- Huang, Y., Ding, H. & Zou Y. (2020). Ecological Performance Analysis of an Integrated Proton Exchange Membrane Fuel Cell and Thermoelectric Devices. *International Journal of Electrochemical Science*, 2581-2593. Doi: <https://doi.org/10.20964/2020.03.31>
- Ito, H., Maeda, T., Nakano, A. & Takenaka, H. (2011). Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 10527–10540. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.127>
- Kaliaguine, S., Mikhailenko, S.D., Wang, K., Xing, P., Robertson, G.P., & Guiver, M.D. (2003). Properties of SPEEK based PEMs for fuel cell application. *Catalysis Today*, 82, 213-222. [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861\(03\)00235-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861(03)00235-9)
- Kraytsberg, A. & Ein-Eli, Y. (2014). Review of advanced materials for proton exchange membrane fuel cells. *Energy Fuels*, 28, 7303–7330. Doi: <https://doi.org/10.1021/ef501977k>
- Kreuer, K.D., Paddison, S.J., Spohr, E. & Schuster, M. (2004). Transport in proton conductors for fuel-cell applications: Simulations, elementary reactions, and phenomenology. *Chemical Reviews*, 104, 4637–4678. Doi: <https://doi.org/10.1021/cr020715f>

- Li, Q., Jensena, J., Savinell, R.F. & Bjerrum, N. (2009). High temperature proton exchange membranes based on polybenzimidazoles for fuel cells. *Progress in Polymer Science*, 34, 449–477. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.prog-polymsci.2008.12.003>
- Liu, C., Khan, S., Lee, M., Kim, K., Akhtar, K. & Han, H. (2013). Fuel cell based on novel hyper-branched polybenzimidazole membrane. *Macromolecular Research*, 21, 35–41. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-012-0191-2>
- Li, G., Kujawski, W. & Rynkowska, E. (2019). Advancements in proton exchange membranes for high-performance high-temperature proton exchange membrane fuel cells (HT-PEMFC). *Reviews in Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1515/revce-2019-0079>
- Mauritz, K.A. & Moore, R.B. (2004). State of understanding of Nafion. *Chemical Reviews*, 104, 4535–4585. Doi: <https://doi.org/10.1021/cr0207123>
- Mogorosi, K., Oladiran, M.T. & Rakgati, E. (2020). Mathematical Modelling and Experimental Investigation of a Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Energy and Power Engineering*, 12, 653-670. Doi: <https://doi.org/10.4236/epe.2020.1211039>
- Mubin, A.N., Bahrom, M.H., Azri, M., Ibrahim, Z., Rahim, N.A. & Raihan, S.R. (2017). Analysis performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 210 012052. Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/210/1/012052>
- Nalbant, Y., Colpan, C.O. & Devrim, Y. (2020). Energy and exergy performance assessments of a high temperature-proton exchange membrane fuel cell based integrated cogeneration system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3584-3594. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.252>
- Omran, A., Lucchesi, A., Smith, D., Alaswad, A., Amiri, A., Wilberforce, T., ... Olabi, A.G. (2021). Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell. *International Journal of Thermofluids*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100110>
- Özgür, T., & Yakaryilmaz, A.C. (2018). Thermodynamic analysis of a Proton Exchange Membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 18007-18013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.152>
- Parnian, M.J., Rowshanzamir, S., Prasad, A. & Advani, S.G. (2018). High durability sulfonated poly (ether ether ketone)-ceria nanocomposite membranes for proton exchange membrane fuel cell applications. *Journal of Membrane Science*, 556, 12-22. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.083>

- Pineri, M. & Eisenberg, A. (1987). Structure and Properties of Ionomers. Springer: Dordrecht, *The Netherlands*. ISBN-10: 9401082049, ISBN-13: 978-9401082044
- Samms, S.R., Wasmus, S. & Savinell, R.F. (1996). Thermal stability of nafion® in simulated fuel cell environments. *Journal of The Electrochemical Society*, 143, 1498. Doi: <https://doi.org/10.1149/1.1836669>
- Scott, K. & Shukla, A. (2004). Polymer electrolyte membrane fuel cells: Principles and advances. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3, 273–280. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11157-004-6884-z>
- Toghyani, S., Nafchi, F.M., Afshari, E., Hasanpour, K., Baniasadi, E. & Atyabi, S.A. (2018). Thermal and electrochemical performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell under assembly pressure on gas diffusion layer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 4534–4545. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.068>
- Vazifeshenas, Y., Sedighi, K. & Shakeri, M. (2016). Numerical investigation of a novel compound flow-field for PEMFC performance improvement. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(43), 15032–15039. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.077>
- Vidakovic-Koch, T., Gonzalez Martinez, I., Kuwertz, R., Kunz, U., Turek, T. & Sundmacher, K. (2012). Electrochemical membrane reactors for sustainable chlorine recycling. *Membranes*, 2, 510–528. Doi: <https://doi.org/10.3390/membranes2030510>
- Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, J., Cho, S.C. & Adroher, X.C. (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*, 88, 981–1007. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030>
- Wang, L., Ni, J., Liu, D., Gong, C. & Wang, L. (2018). Effects of branching structures on the properties of phosphoric acid-doped polybenzimidazole as a membrane material for high-temperature proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 16694–16703. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.181>
- Whittingham, M., Savinell, R. & Zawodzinski, T. (2004). Introduction: Batteries and fuel cells. *Chemical Reviews*, 104, 4243–4244. Doi: <https://doi.org/10.1021/cr020705e>
- Wilberforce, T. & Olabi, A.G. (2020). Proton exchange membrane fuel cell performance prediction using artificial neural network. *International Journal*

of Hydrogen Energy, 46, 6037-6050. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydne.2020.07.263>

The Model 850 Fuel Cell Test System. (2023). Erişim adresi: <https://www.scribner.com/products/fuel-cell-test-systems/850-fuel-cell-test-system/#1503940946730-2-374a5-f1ee>

Zhang, H. & Shen, P.K. (2012). Recent development of polymer electrolyte membranes for fuel cells. *Chemical Reviews*, 112, 2780–2832. Doi: <https://doi.org/10.1021/cr200035s>

Zhang, H. & Sun, C. (2021). Cost-effective iron-based aqueous redox flow batteries for large-scale energy storage application: A review. *Journal of Power Sources*, 493, 229445. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229445>



LPG YAKITLI BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA STROK/ÇAP ORANI ETKİLERİNİN EKSERJİ ANALİZİYLE İNCELENMESİ

İsmet SEZER^{1*}

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane

ORCID No : <http://orcid.org/0000-000-342-9172>

Anahtar kelimeler

Öz

Buji ateşlemeli motor, LPG yakıtı, strok/çap oranı, ekserji analizi, tersinmezlikler, verim

Sunulan çalışmada LPG (%100 Propan) yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda strok/çap (s/ç) oranının etkileri kullanılabilirlik (ekserji) analiziyle teorik olarak incelenmiştir. Bu amaçla iki bölgeli yanma modeline sahip sanki boyutlu bir buji ateşlemeli çevrim modeli kullanılmıştır. Çevrim modelinde yanma işlemi türbülanslı alev yayılması yaklaşımıyla, emme ve egzoz işlemleri ise basit ampirik bağıntılar kullanılarak modellenmiştir. Ekserji analizini gerçekleştirmek için kullanılan çevrim modeline termodinamiğin ikinci kanunuyla ilgili yaklaşımlar uygulanmıştır. Ekserji analizinde ısı, iş ve egzozla transfer edilen ekserjiler, tersinmezlikler, yakıt kimyasal ekserjisi, termomekanik ekserji ve toplam ekserji gibi ekserjitik terimler seçilen strok/çap oranları için hesaplanmıştır. Ayrıca, 1. ve 2. Kanun verimleri ile indike özgül yakıt tüketimi de hesaplanmıştır. Böylece, buji ateşlemeli LPG yakıtlı motorlarda s/ç oranının ekserjitik terimler, 1. ve 2. Kanun verimleri ve indike özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda s/ç oranının artırılmasının ısı kayıpları ve tersinmezlik değerlerini ve indike özgül yakıt tüketimini azalttığını, çevrim işi, egzoz gazlarıyla kaybedilen ekserji, 1. Kanun verimini ve 2. Kanun verimini artırdığını göstermiştir. LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda strok/çap oranının 0,7 değerinden 1,3 değerine çıkarılması ısı kayıplarını %10,67, tersinmezlikleri %1,89 ve indike özgül yakıt tüketimini %3,91 oranlarında azaltırken işle transfer edilen ekserjiyi %4,12, egzozla kaybedilen ekserjiyi %2, 1. Kanun verimini %4,07 ve 2. Kanun verimini %4,08 oranlarında artırmıştır.

* isezer@gumushane.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1257235

INVESTIGATION OF STROKE/BORE RATIO EFFECTS IN LPG FUELLED SPARK IGNITION ENGINES VIA EXERGY ANALYSIS

Keywords

Spark ignition engine, LPG, stroke/bore ratio, exergy analysis, irreversibilities, efficiency

Abstract

This study investigates theoretically the effects of stroke/bore (s/b) ratio with availability (exergy) analysis in LPG (100% Propane) fuelled spark ignition (SI) engines. For this purpose, a two-zone quasi-dimensional cycle model of SI engines has been used. The combustion process is simulated as turbulent flame entrainment model, the intake and exhaust processes is simulated by using the simple empirical equations in the cycle model. The principles of the second law of thermodynamics were applied to the cycle model in order to perform the exergy analysis. In the exergy analysis, the exergetic terms such as the exergies transferred by heat, work and exhaust, irreversibilities, fuel chemical exergy, thermomechanical exergy and total exergy were calculated for the selected s/b ratios. In addition, the first and second law efficiencies and indicated specific fuel consumption were also calculated. Thus, the effects of s/b ratio on the exergetic terms, the first and second law efficiencies and indicated specific fuel consumption were determined for LPG fuelled SI engines. The results of the study showed that the increase of the s/b ratio reduces the values of the heat losses, irreversibility and indicated specific fuel consumption, increases the cycle work, exergy losses by exhaust gasses with the first and second law efficiencies in SI engines. The increasing of stroke/bore ratio from 0.7 to 1.3 in LPG fuelled SI engines decreases the heat losses by 10.67%, irreversibilities by 1.89% and indicated specific fuel consumption by 3.91%, while it increases exergy transfer with work by 4.12%, exergy losses with exhaust gasses by 2%, the first law efficiency by 4.07% and the second law efficiency by 4.08%, respectively.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 27.02.2023

Kabul Tarihi : 11.01.2024

Research Article

Submission Date : 27.02.2023

Accepted Date : 11.01.2024

Extended Abstract

Introduction

The design parameters such as compression ratio, combustion chamber geometry, valve design, cam profile, spark plug position, stroke/bore (s/b) ratio significantly affect the engine characteristics i.e. combustion, engine performance, fuel consumption and exhaust emissions in internal combustion engines (ICEs). Therefore, a large number of studies were performed to examine the effects of these design parameters on engine characteristics i.e. combustion, engine performance, fuel consumption and exhaust emissions. In most of these studies, it was tried to contribute to the development of the ICEs by using thermodynamic-based cycle models, usually dimensionless or quasi-dimensional, in order to determine the characteristics of ICEs. The methods based on the first law of thermodynamics were used in dimensionless or quasi-dimensional thermodynamic cycle models to determine the characteristics of ICEs in the cycle models. However, it was clearly understood in recent years that the first law of thermodynamics is not sufficient for the modeling of the ICEs operations and this method can often give the inaccurate results. For this reason, it is seen that the second law of thermodynamics has been began to used widely with the first law of thermodynamics in the studies on ICEs in recent years. The investigation of a thermodynamic process and system by means of the second law of thermodynamics is called as second law (exergy or availability) analysis. Exergy analysis can be very useful since it allows the determination of irreversibility and losses in a system or process. In this way, the efficiency of the system can be determined in realistic and the processes or regions that cause to decrease in the efficiency of the system can be determined, and so, the system can be made more efficient. On the other hand, LPG is mostly used alternative fuel in spark ignition (SI) engines due to it is abundant and cheap. Therefore, variation of the effects of stroke/bore (s/b) ratio with exergy analysis in LPG (100% Propane) fuelled SI engines were investigated in this study

Objectives/Research Purpose

The main objective of this study is to investigate the stroke/bore effects in LPG fuelled spark ignition (SI) engines. It can be seen that a large number of studies have been carried out especially for the application of exergy analysis to the SI engines in recent years. However, the studies on the exergy analysis applied to the ICEs have not examined the effects of the stroke/bore ratio by means of exergy analysis. Therefore, this study intends to contribute to the literature by investigating the effects of the stroke/bore ratio in LPG fuelled SI engines by means of exergy analysis.

Methods/Methodology

A two-zone quasi-dimensional cycle model of SI engines was used in this study. The combustion process is simulated as turbulent flame entrainment model, intake and exhaust processes was simulated by using the simple empirical equations in the cycle model. The principles of the second law of thermodynamics were applied to the cycle model to perform the exergy analysis. In the exergy analysis, the exergetic terms such as the exergies transferred by heat, work and exhaust, irreversibilities, fuel chemical exergy, thermomechanical exergy and total exergy were calculated for the selected stroke/bore ratios. The first and second law efficiencies and indicated specific fuel

consumption were also calculated. Thus, the effects of stroke/bore ratio on the exergetic terms, the first and second law efficiencies and indicated specific fuel consumption were determined for LPG fuelled SI engines.

Results/Findings

The results of the study showed that the increase of the stroke/bore ratio generally reduced the irreversibilities sourced from the heat losses and combustion, increased the cycle work (also exergy transfer with work) and the first and second law efficiencies, and decreased the indicated specific fuel consumption in LPG fuelled SI engines.

Discussion and Conclusions

Within the scope of the study, it was seen that the increasing of the stroke/bore ratio from 0.7 to 1.3 in LPG fuelled SI engines decreased the heat losses, irreversibilities and indicated specific fuel consumption are about 10.67%, 1.89% and 3.91%, respectively, while it increased the exergy transfer with work, the first law efficiency and the second law efficiency about 4.12%, 4.07% and 4.08%, respectively. According to these results; it can be said that increasing of the stroke/bore ratio up to a certain value increases the useful work obtained from the engine by reducing the some exergetic losses, thus the engine can be operated more efficiently and economically.

1. Giriş

İçten yanmalı motorlarda sıkıştırma oranı, yanma odası geometrisi, supap tasarımı, kam profili, buji konumu, strok/çap (s/ç) oranı gibi tasarım parametreleri yanma, motor performansı, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları gibi motor karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, bu tasarım parametrelerinin yanma, motor performansı, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları gibi motor karakteristiklerine etkilerini incelemek için oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır (Poulos ve Heywood, 1983; Hu, Whitelaw ve Vafidis, 1992; Sung ve Jun, 1997; Filipi ve Assanis, 2000; Sher ve Bar-Kohany, 2002). Bu çalışmaların çoğunda söz konusu motor karakteristiklerini belirlemek için genellikle boyutsuz veya sanki boyutlu termodinamik esaslı çevrim modelleri kullanılarak motorların geliştirilmesine katkı sağlanmaya çalışılmıştır. Motor karakteristiklerini belirlemeye yönelik geliştirilen boyutsuz veya sanki boyutlu termodinamik çevrim modellerinde genellikle termodinamiğin birinci kanununa (TD1K) dayalı yaklaşımlar uygulanmıştır. Ancak, son yıllarda açıkça anlaşılmıştır ki TD1K tek başına içten motorların çalışmasını modellemede ve karakteristiklerini belirlemede yetersiz kalmakta ve yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir (Caton, 2002; Rakopoulos ve Giakoumis, 2006). Bu nedenle, özellikle son yıllarda içten yanmalı motorlara yönelik yapılan çalışmalarda TD1K ile birlikte termodinamiğin ikinci kanunun (TD2K) da yaygın şekilde kullanılmaya başladığı görülmektedir. Bir termodinamik sürecin veya sistemin TD2K'na dayalı yaklaşımlar kullanılarak incelenmesine ekserji veya kullanılabilirlik analizi adı verilmektedir. Ekserji analizi bir sistem veya süreçteki tersinmezliklerin ve kayıpların belirlenebilmesine imkan sağladığı için oldukça yararlı olabilmektedir. Bu sayede sistemin verimi gerçeğe oldukça yakın olarak belirlenebilmekte, sistemin veriminin düşmesine neden olan süreç veya bölgeler tespit edilebilmekte ve bunun sonucunda sistem daha verimli çalışabilecek hale getirilebilmektedir (Moran ve Shapiro, 2000). Bu nedenlerle, diğer alanlara benzer şekilde içten yanmalı motorlarda da ekserji analizine yönelik çalışmalar son yıllarda hızlı bir şekilde artış göstermiştir. İçten yanmalı motorlarda ekserji analizinin kullanıldığı çalışmaların sonuçlarının bir arada toplandığı bir derleme çalışması Caton (2000) tarafından ve daha kapsamlı başka bir derleme çalışması ise Rakopoulos ve Giakoumis (2006) tarafından yayınlanmıştır. Bu derleme çalışmaları ve mevcut literatür incelendiğinde son yıllarda özellikle buji ateşlemeli motorlara ekserji analizinin uygulanmasına yönelik oldukça fazla sayıda çalışmanın yapıldığı görülebilmektedir (Shapiro ve Van Gerpen, 1989; Gallo ve Milanez, 1992; Rakopoulos, 1993; Alasfour, 1997; Caton, 1999; Caton, 2000). Ancak, alternatif yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda ekserji analizinin uygulanmasına yönelik literatürde bulunan çalışmalarda s/ç oranının etkileri incelenmemiştir. Bu nedenle, sunulan çalışmada LPG (%100 Propan) yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda s/ç oranının değişiminin etkileri ekserji analizi

ile incelenerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Yakıt-hava karışımı ve yanmış gazların özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan katsayılar literatürde sadece saf propan için verildiğinden çalışmada LPG olarak %100 propan kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Çevrim Modeli ve Temel Bağıntılar

Sunulan çalışmada Ferguson (1985) tarafından sunulan boyutsuz çevrim modeline ait bağıntılar yeniden düzenlenip model sanki boyutlu hale getirilerek kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çevrim modelinde silindir içerisindeki gazların ideal gaz olduğu varsayımıyla TD1K (enerjinin korunumu denklemi) krank mili açısına (KMA) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta E_{in} = Q - W \Rightarrow m \frac{de_{in}}{d\theta} + e_{in} \frac{dm}{d\theta} = \frac{dQ}{d\theta} - p \frac{dV}{d\theta} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de; m silindirdeki kütle miktarı, e_{in} özgül iç enerji, Q toplam ısı kayıpları, p silindir basıncı, V silindir hacmi ve θ krank mili açısıdır.

Çevrim modelinde; anlık silindir hacmi, anlık silindir basıncı ile yanmış ve yanmamış gaz bölgelerinin sıcaklıkları sırasıyla aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmiştir.

$$V(\theta) = V_{cc} \left\{ 1 + \frac{r_{comp} - 1}{2} \left[1 - \cos\theta + \frac{1}{r_{cr}} \left[1 - (1 - r_{cr}^2 \sin^2\theta)^{0,5} \right] \right] \right\} \quad (2)$$

(2)'de; r_{cr} strok uzunluğunun (l_s) yarısının biyel boyuna (l_{cr}) oranı olup $r_{cr} = l_s / 2l_{cr}$ şeklinde belirlenmektedir.

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{A + B + C}{D + E} \quad (3)$$

Eşitlik (3)'de; A, B, C, D ve E büyüklükleri aşağıdaki bağıntılardan belirlenmektedir. $A = \frac{1}{m} \frac{dV}{d\theta}$,

$$B = \frac{\lambda_g}{\omega m} \left[\frac{v_b}{C_{pb}} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \left(1 - \frac{T_w}{T_b} \right) A_b + \frac{v_u}{C_{pu}} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \left(1 - \frac{T_w}{T_u} \right) A_u \right], C = -\frac{dr_{bmf}}{d\theta} \left[(v_b - v_u) + v_b \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \frac{h_b - h_u}{C_{pb} T_b} \right],$$

$$D = x_b \left[\frac{v_b^2}{C_{pb} T_b} \left(\frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \right)^2 + \frac{v_b}{p} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln p} \right], E = (1 - r_{bmf}) \left[\frac{v_u^2}{C_{pu} T_u} \left(\frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \right)^2 + \frac{v_u}{p} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln p} \right]. \quad (4)$$

$$\frac{dT_b}{d\theta} = \frac{-\lambda_g A_b (T_b - T_w)}{\omega m C_{pb} r_{bmf}} + \frac{v_b}{C_{pb}} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \frac{dp}{d\theta} + \frac{h_u - h_b}{r_{bmf} C_{pb}} \frac{dr_{bmf}}{d\theta}$$

$$\frac{dT_u}{d\theta} = \frac{-\lambda_g A_u (T_u - T_w)}{\omega m C_{pu} (1 - r_{bmf})} \frac{dp}{d\theta} + \frac{v_u}{C_{pu}} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \quad (5)$$

Ayrıca, çevrimde iş ve ısı kayıpları sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla belirlenir.

$$\frac{dW}{d\theta} = p \frac{dV}{d\theta} \quad (6)$$

$$\frac{dQ_w}{d\theta} = \frac{\lambda_g}{\omega} [A_b (T_b - T_w) + A_u (T_u - T_w)] \quad (7)$$

Yukarıdaki bağıntılarda; A_b ve A_u sırasıyla yanmış ve yanmamış gazların temasta bulunduğu yüzey alanları olup sayısal değerleri geometrik alt model yardımıyla hesaplanmakta, açılmal hız (ω), silindir duvar sıcaklığı (T_w) ve ısı transfer katsayısı (λ_g) ise aşağıdaki bağıntılarla belirlenmektedir.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (8)$$

$$T_w = T_{cw} + R_w \frac{dQ_w}{d\theta} \quad (9)$$

$$\lambda_g = 3,26 b^{-0,2} p^{0,8} T^{-0,55} U_g^{0,8} \quad (10)$$

Yukarıdaki bağıntılarda; U_g silindirdeki gazların ortalama hızı, T_{cw} soğutma suyu sıcaklığı ve R_w silindir duvarlarının ısı direnç katsayısı olup çevrim hesabında $T_{cw} = 350$ K ve $R_w = 0,01$ K/W değerleri kullanılmıştır (Ferguson, Gren ve Lucht, 1987).

Yanma olayının modellenmesinde ise yanma işlemi başladıktan sonra yanma odasında yanmış ve yanmamış bölgeler olmak üzere iki bölgenin oluştuğu ve türbülanslı alev cephesinin yanma odası içerisinde küresel olarak ilerlediği varsayımıyla kütesel yanma oranı Blizard ve Keck (1974) tarafından verilen aşağıdaki bağıntılardan belirlenmiştir.

$$\frac{dm_e}{d\theta} = \rho_u A_f U_e \quad (11)$$

$$\frac{dm_b}{d\theta} = \rho_u A_f U_L + \frac{m_e - m_b}{\tau_{bd}} \quad (12)$$

$$\tau_{bd} = \frac{l_T}{U_L} \quad (13)$$

Yukarıdaki bağıntılarda; A_f alev cephesi yüzey alanı τ_{bd} ise l_T boyutundaki bir girdabın karakteristik yanma süresidir.

Kütleli yanma oranı alev cephesi yüzey alanı ve alev hızı ile orantılıdır. Alev cephesi yüzey alanı, yanmış gazların hacmine (V_f) bağlı olarak geometrik alt modelden hesaplanır. Yanmamış gazların alev cephesi içine çekilme hızı (U_e), türbülanslı alev cephesinin ilerleme hızı (U_T) ve türbülanslı alev cephesinin karakteristik uzunluk ölçeğini (l_T) hesaplamak için aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır.

$$U_e = U_T + U_L \quad (14)$$

$$U_T = 0.08 \bar{U}_{int} \left(\frac{\rho_{int}}{\rho_e} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$\bar{U}_{int} = \eta_v \left(\frac{A_{pc}}{A_{intval,max}} \right) \frac{n l_s}{30} \quad (16)$$

$$l_T = 0.8 l_{intval,max} \left(\frac{\rho_e}{\rho_{int}} \right)^{3/4} \quad (17)$$

Yukarıdaki bağıntılarda; \bar{U}_{int} emme sürecinde silindire giren gazların ortalama hızı, A_{pc} piston tablası yüzey alanı, $A_{intval,max}$ emme supabı maksimum açıklık alanı ve $l_{intval,max}$ emme supabı maksimum açılma miktarıdır.

Laminer alev hızı (U_L) ise Gülder (1984) tarafından verilen aşağıdaki denklemlerden hesaplanmaktadır:

$$U_L(\phi, T, p) = U_{L,0} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^\delta \left(\frac{p}{p_0} \right)^\varphi (1 - \psi f) \quad (18)$$

Yukarıdaki bağıntıda; ϕ_0 , δ ve φ yakıt hava karışım oranına bağlı sabitler olup değerleri literatürden bulunabilir (Gülder, 1984). $U_{L,0}$ ise $T_0=298$ K ve $p_0=1$ bar standart koşullarındaki laminer alev hızı olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U_{L,0}(\phi) = \Phi \Omega \phi^\sigma \exp \left[-\xi (\phi - 1.075)^2 \right] \quad (19)$$

Eşitlik (19'da); δ , φ , Φ , Ω , σ ve ξ katsayılarının değerleri literatürde verilmiş olup (Gülder, 1984) ψ katsayısının $0 \leq f \leq 0,3$ aralığında 2,5 olarak alınması önerilmektedir. Burada; f bir önceki çevrimden silindirde kalan artık egzoz gazlarının kütleli oranıdır.

Çevrim modeli, yanma modeli ve geometrik model hakkında daha detaylı bilgi

literatürde bulunabilir (Ferguson, 1985; Sezer ve Bilgin, 2008; Sezer ve Bilgin, 2012).

2.2 Ekserji (Kullanılabilirlik) Kavramı ve Bağlıları

TD2K, entropinin artışı ilkesine dayalı olup bir sistemin entropi değişimi aşağıdaki gibi ifade edilir (Cengel ve Boles, 1994; Moran ve Shapiro, 2000).

$$\Delta S = \int (Q/T)_{\text{boundary}} + S_{\text{in}} \quad (20)$$

(11)'de; S_{in} sistemde iç tersinmezlikler nedeniyle üretilen entropidir.

TD1K ve TD2K birleşimi ile kapalı sistem için ekserji (kullanılabilirlik) bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir (Cengel ve Boles, 1994; Moran ve Shapiro, 2000).

$$X = E_{\text{tot}} + p_0 V - T_0 S \quad (21)$$

Eşitlik (21)'de; V ve S sistemin hacim ve entropisi, p_0 ve T_0 ise sistemin ölü hal koşullarındaki basınç ve sıcaklığıdır. E ise sistemin toplam enerjisi olup $E_{\text{tot}} = E_{\text{in}} + E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$ şeklinde iç enerji, kinetik ve potansiyel enerjilerin toplamından oluşmaktadır.

Kullanılabilirlik veya ekserji, bir sistemin çevre ile termal, mekanik ve kimyasal olarak dengeye ulaştığında, sistem ve yakın çevresinden oluşan birleşik sistemden elde edilebilecek maksimum teorik iş olarak tanımlanmaktadır (Van Gerpen ve Shapiro, 1990; Caton, 2000; Rakopoulos ve Giakoumis, 2006). Bir sistemden elde edilebilecek maksimum teorik iş veya ekserji termomekanik ekserji (X_{tm}) ve kimyasal ekserji (X_{ch}) olmak üzere iki bileşenden oluşur. X_{tm} , sistem uzak çevresiyle termal ve mekanik dengeye geldiğinde, birleşik sistemden elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi belirlenir (Van Gerpen ve Shapiro, 1990; Moran ve Shapiro, 2000; Rakopoulos ve Giakoumis, 2006).

$$X_{\text{tm}} = E_{\text{tot}} + p_0 V - T_0 S - \sum m_i \mu_{0,i} \quad (22)$$

Eşitlik (22)'de; m_i ve $\mu_{0,i}$ sırasıyla sistemdeki her bir kimyasal bileşenin kütlesi ve kimyasal enerji potansiyeli olup sınırlı ölü hal koşullarında belirlenir.

Sınırlı ölü hal koşullarındaki birleşik sistem çevresiyle termal ve mekanik denge olduğundan sıcaklık ve basınç farkından dolayı iş üretme potansiyeli bulunmamaktadır. Ancak, sistem çevreyle kimyasal dengeye ulaşmadığından sahip olduğu kimyasal potansiyeli sayesinde sınırlı ölü haldeki sistemden çevreyle kimyasal dengeye ulaşıncaya kadar ek iş elde edilebilir. Bu şekilde sınırlı ölü haldeki bir sistemden elde edilebilecek maksimum teorik işe kimyasal ekserji de-

nir ve aşağıdaki gibi belirlenir (Van Gerpen ve Shapiro, 1990; Moran ve Shapiro, 2000; Rakopoulos ve Giakoumis, 2006)..

$$X_{ch} = \sum m_i (\mu_{0,i} - \mu_i^0) \quad (23)$$

Eşitlik (23)'de; μ_i^0 sistemdeki her bir kimyasal bileşenin gerçek ölü haldeki kimyasal enerji potansiyelidir.

Kapalı bir sistem için kullanılabilirlik veya ekserji dengesi ise aşağıdaki gibi ifade edilir (Caton, 1999; Caton, 2000).

$$\Delta X = X_2 - X_1 = X_Q - X_W - X_{des} \quad (24)$$

Eşitlik (24)'de; ΔX sistemin toplam ekserjisindeki değişim, X_2 sistemin süreç sonundaki toplam ekserjisi, X_1 sistemin süreç başlangıcındaki toplam ekserjisi, X_Q ısı alışverişiyle transfer edilen ekserji, X_W iş alışverişiyle transfer edilen ekserji ve X_{des} tersinmezlikler nedeniyle yok edilen ekserjidir.

İçten yanmalı motorlar için krank mili açısına bağlı olarak ekserji değişimi yakıt kimyasal ekserjisi dikkate alınarak aşağıdaki gibi yazılabilir (Sezer ve Bilgin, 2008; Sezer ve Bilgin, 2012).

$$\frac{dX}{d\theta} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \frac{dQ}{d\theta} - \left(\frac{dW}{d\theta} - P_0 \frac{dV}{d\theta}\right) + \frac{m_f}{m_{tot}} \frac{dr_{bmf}}{d\theta} x_{f,ch} - \frac{dI_{comb}}{d\theta} \quad (25)$$

Eşitlik (16)'da; m_f ve m_{tot} sırasıyla yakıtın ve silindirdeki gazların toplam kütleleridir.

$x_{f,ch}$ ise birim kütledeki yakıt kimyasal ekserjisi olup sıvı ve gaz yakıtlar için Kotas (1995) tarafından verilen aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$X_{f,ch} = x_{f,ch} m_f = Q_{LHV} \left[1,0401 + 0,01728 \frac{h'}{c'} + 0,0432 \frac{o'}{c'} + 0,2196 \frac{s'}{c'} \left(1 - 2,0628 \frac{h'}{c'} \right) \right] \quad (26)$$

Eşitlik (26)'de; Q_{LHV} yakıtın alt ısıl değeri olup aşağıda verilen Mendeleyev bağıntısından hesaplanır (Moran ve Shapiro, 2000).

$$Q_{LHV} = [33,91c' + 125,6h' - 10,89(o' - s') - 2,51(9h' - w')] \quad (27)$$

Eşitlik (26) ve (27)'de; h' , c' , o' , s' ve w' sırasıyla yakıt içerisindeki karbon, hidrojen, oksijen, kükürt ve su elementlerinin kütle oranlarıdır.

Eşitlik (25)'de; I_{comb} yanma nedeniyle oluşan tersinmelikler olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{dI_{\text{comb}}}{d\theta} = T_0 \frac{dS_{\text{comb}}}{d\theta} \quad (28)$$

Eşitlik (28)'de; S_{comb} yanma işlemi nedeniyle üretilen entropi olup aşağıdaki gibi hesaplanır (Sezer ve Bilgin, 2008)

$$\frac{dS_{\text{comb}}}{d\theta} = \frac{d(m_b s_b)}{d\theta} + \frac{d(m_u s_u)}{d\theta} \quad (29)$$

Çevrim modelinde yanma ve ısı geçişinden kaynaklanan toplam tersinmezlikler ise aşağıdaki gibi belirlenir (Sezer ve Bilgin, 2008).

$$\frac{dI_{\text{tot}}}{d\theta} = \frac{dI_{\text{comb}}}{d\theta} + \frac{dI_Q}{d\theta} \quad (30)$$

Isı geçişinden kaynaklanan entropi geçişi ise aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$\frac{dS_Q}{d\theta} = \frac{dQ_b/d\theta}{T_b} + \frac{dQ_u/d\theta}{T_u} \quad (31)$$

Çevrim modelinde 1. Kanun verimi çevrim işi (W) kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenmektedir (Ferguson, 1985).

$$\eta_I = \frac{W}{m_f Q_{\text{LHV}}} \quad (32)$$

2. Kanun verimi ise işle transfer edilen ekserji (X_w) kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenir (Sezer ve Bilgin, 2008).

$$\eta_{II} = \frac{X_w}{m_f x_{f,\text{ch}}} \quad (33)$$

3. Sayısal Uygulamalar

3.1 Bilgisayar Programı ve Çözüm Metodu

İstenen büyüklüklerin hesaplanabilmesi için buji ateşlemeli motor çevrimi için FORTRAN program dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu programda r_{comp} , n , ϕ , r_{sp} , θ_{st} , yakıt özellikleri ve dış ortam basınç ve sıcaklığı gibi program girdileri kullanılarak emme sonu koşulları belirlenmiş ve çevrim modelindeki diferansiyel denklemler çözülerek çevrim boyunca termodinamik özellikler ve ekserji büyüklükleri hesaplanmıştır. Bilgisayar programında diferansiyel denklemlerin çözümü için DVERK ve yanmış ve yanmamış gazların termodinamik özelliklerinin belirlenmesi için ilk olarak Ferguson (1985) tarafından geliştirilen FARG ve ECP alt programları yeniden düzenlenerek kullanılmıştır. Çevrim modelinin ve bilgisayar programının güvenilirliği sağlayabilmek için hesaplanan de-

ğerler hata analizinde aşağıdaki bağıntularla kontrol edilmiştir (Sezer ve Bilgin, 2008; Sezer ve Bilgin, 2012).

$$\varepsilon_1 = 1 - [vm/V] \quad (34)$$

$$\varepsilon_2 = 1 + [W/\Delta(me_{in}) + Q_w] \quad (35)$$

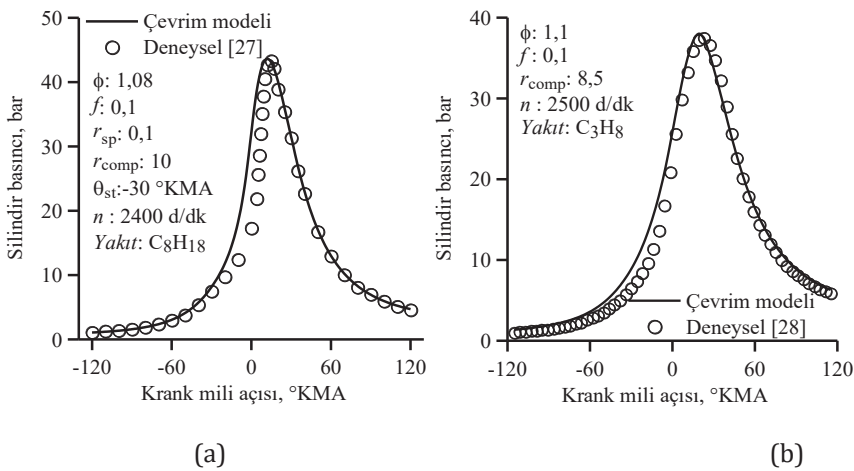
ε_1 ve ε_2 hata değerleri 10^{-4} seviyesinde tutularak bilgisayar programının güvenilirliği sağlanmıştır.

3.2 Modelin Güvenirliliği

Kullanılan çevrim modelinin güvenilirliğini göstermek amacıyla özellikleri Tablo 1’de verilen motorlar için literatürden elde edilen deneysel verilerle modelden elde edilen sonuçlar Şeki 1 (a) ve (b)’de karşılaştırılmıştır. Şeki 1 (a) ve (b)’de görüldüğü gibi modelden elde edilen silindir basıncı ve kütesel yanma oranı değerleri deneysel verilerle uyum içerisinde olup kullanılan çevrim modelinin motor karakteristiklerinin belirlenmesi ve parametrik çalışma yapılması için yeterli güvenilirliğe sahip olduğu söylenebilir.

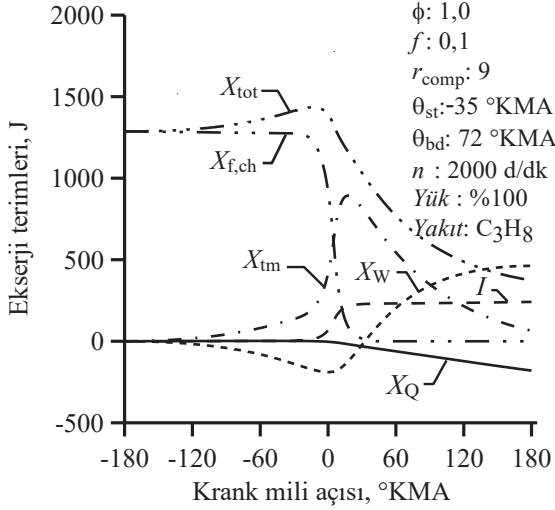
Tablo 1. Karşılaştırma yapılan motorların özellikleri

Özellikler	r_{comp}	r_{sp}	b [mm]	l_s [mm]	l_{cr} [mm]	d_{intval} [mm]	l_{intval} [mm]
Motor I [27]	10	0,2	100	115	190	42	5
Motor II [28]	7	0,0	76,2	111,25	220	30	4,2



Şeki 1. Modelden elde edilen verilerin deneysel verilerle karşılaştırılması

4. Bulgular ve Tartışma

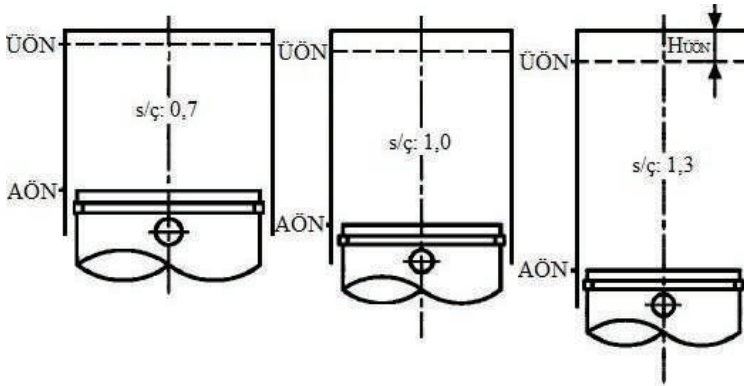


Şekil 2. Ekserji terimlerinin krank mili açısı ile değişimleri

Şekil 2’de ekserji büyüklüklerinin çevrim boyunca değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yakıt kimyasal ekserjisi ($X_{f,ch}$) sıkıştırma sürecinde sabit kalmasına rağmen termomekanik ekserji (X_{tm}) üst ölü nokta (ÜÖN)’dan 35 °KMA önce yanma işleminin başlamasıyla hızlı bir biçimde artmaktadır. X_{tm} ’deki bu artış işle transfer edilen ekserjideki (X_w) artışın sonucu olup X_w ile ters işaretlidir. Sıkıştırma sürecinde silindirdeki gazların sıcaklığı nispeten düşük olduğu için ısıyla transfer edilen ekserjide (X_Q) önemli bir değişim olmamakta, ancak tersinmezlikler (I) yanmanın başlamasıyla hızlı bir şekilde artmaya başlamaktadır. Ayrıca, yanma işleminin başlamasıyla yakıtın kimyasal enerjisinin ısıya dönüşmesi sebebiyle $X_{f,ch}$ hızlı bir şekilde azalırken silindir içerisinde basınç ve sıcaklığın yükselmesi sonucu X_Q ve X_w dolayısıyla X_{tm} artmaya devam etmektedir. Diğer taraftan, yanma sürecinde yanma işleminden kaynaklanan entropi üretimi ve silindirdeki gazlardan silindir duvarlarına olan ısı transferi sonucu I da artmaya devam etmektedir. Yanma işlemi 37 °KMA’da sona erdiğinde genişleme süreci piston alt ölü nokta (AÖN)’ya ininceye kadar devam etmektedir. Bu süreçte tersinmezlikler yaklaşık sabit kalırken X_{tm} ve X_{tot} silindirden dışarıya iş ve ısı transferi sebebiyle sürekli azalmaya devam etmektedir. Genişleme sürecinin sonunda silindir içerisindeki gazların taşıdığı ekserji egzoz gazlarıyla birlikte dışarı atılmakta olup egzoz gazlarıyla transfer edilen ekserji (X_{exh}) olarak isimlendirilmektedir. Grafikte verilen çalışma koşullarında X_Q , X_w , I ve X_{exh} gibi ekserji büyüklüklerinin silindire giren yakıt ekserjisi içindeki dağılımları sırasıyla %13,97, %35,91, %18,73 ve %29,02 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Ekserji analizinde kullanılan motorların özellikleri [3]

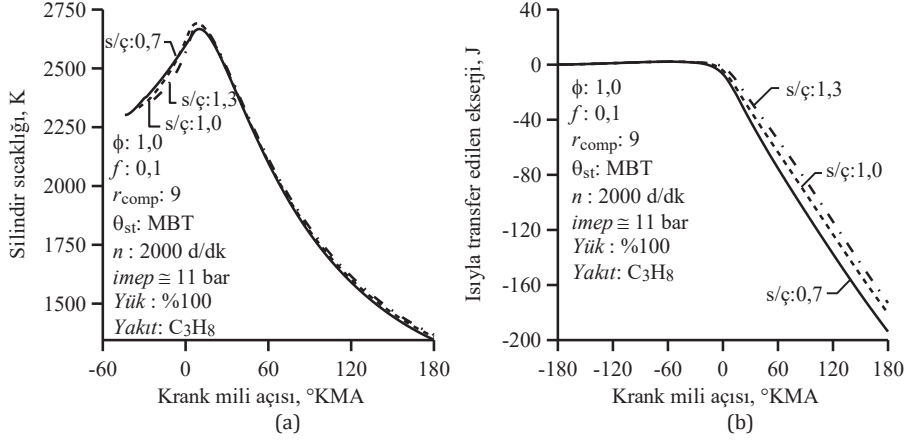
s/ç oranı	0,7	1,0	1,3
Strok uzunluğu (l_s), mm	62,8	79,5	95,5
Çap (b), mm	90	80	73
Biyel boyu (l_{cr}), mm	126	159	191
Sıkıştırma oranı (r_{comp})	9	9	9
Emme supabı çapı (d_{intval}), mm	39,4	35	32
Emme supabı maksimum açılma miktarı (l_{intval}), mm	7,7	8,95	8,17
Strok hacmi (V_s), cm^3	400	400	400



Şekil 3. Ekserji analizinde kullanılan motorların strok/çap oranları [3]

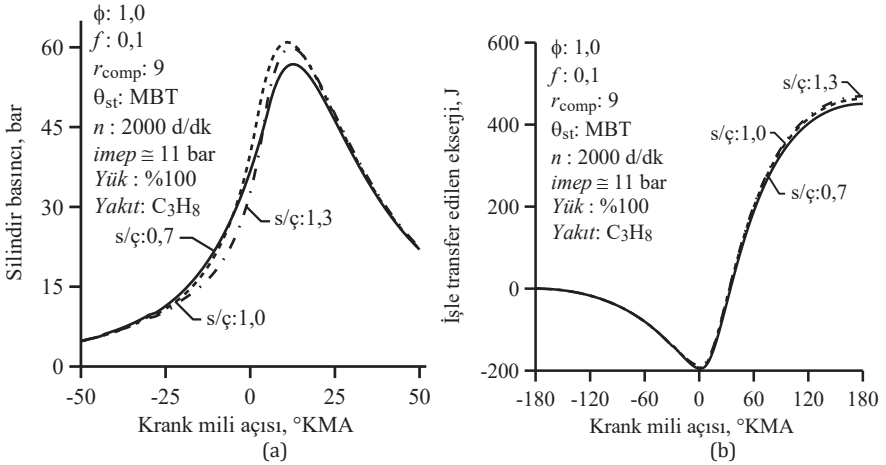
Ekserji analizinde, Tablo 2’de boyutları ve Şekil 3’de geometrileri verilen aynı strok hacmine (400 cm^3) fakat farklı s/ç oranlarına sahip motorlar kullanılmıştır. Şekil 4(a)’da yanma işleminin başlamasıyla silindir içindeki gazların sıcaklığının ve Şekil 4(b)’de ısıyla transfer edilen ekserjinin strok/çap oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ısıyla transfer edilen ekserji artan strok/çap oranı ile azalmakta ve s/ç=1,3 için en düşük değere ulaşmaktadır. Isıyla transfer edilen ekserjideki bu değişimin Şekil 4(a)’da verilen silindir içindeki gazların sıcaklığındaki ve yanma süresindeki değişimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4(a)’da görüldüğü gibi strok/çap oranı arttıkça ateşleme zamanının da değişimiyle başlangıçta silindirde daha düşük sıcaklık değerleri ortaya çıkmasına rağmen genişleme sürecinde artan s/ç oranı ile silindir içindeki gazların sıcaklığı da yükselmiştir. Diğer taraftan, yanma süreleri 0,7, 1,0 ve 1,3 strok/çap oranları için sırasıyla 96, 74 ve 60 °KMA olarak elde edilmiş olup verilen bu yanma süresi silindirdeki tüm yakıtın yanmasını yani %0-100 kütleli yanma oranı aralığını kapsamaktadır. Yanma süresinin uzaması yüksek sıcaklıktaki gaz-

ların silindir içerisinde daha uzun süre kalmasının doğal bir sonucu olarak silindir duvarlarından olan ısı geçişinin ve dolayısıyla ısıyla transfer edilen ekserjinin artmasına neden olmaktadır. İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için $s/\ç=0,7$ ile elde edilen değerle kıyaslandığında ısıyla transfer edilen ekserji $s/\ç=1,0$ ve $1,3$ için %6,81 %10,67 oranlarında azalmıştır.



Şekil 4. Strok/Çap oranının a) silindir sıcaklığının ve b) ısıyla transfer edilen ekserjinin değişimine etkisi

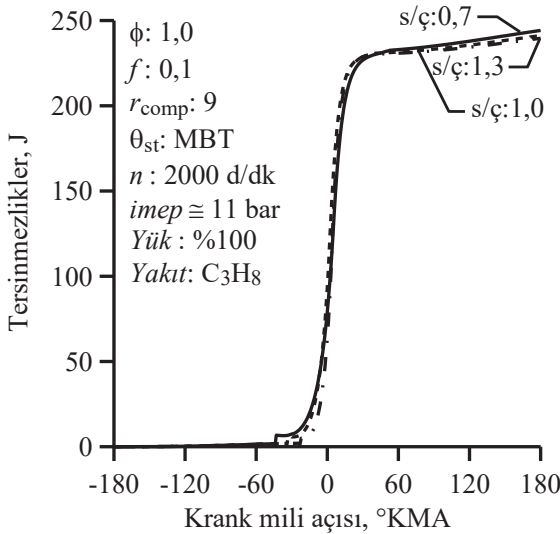
Şekil 5(a) silindir basıncının ve Şekil 5(b)'de işle transfer edilen ekserjinin strok/çap oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi işle transfer



Şekil 5. Strok/Çap oranının a) silindir basıncının ve b) işle transfer edilen ekserjinin değişimine etkisi

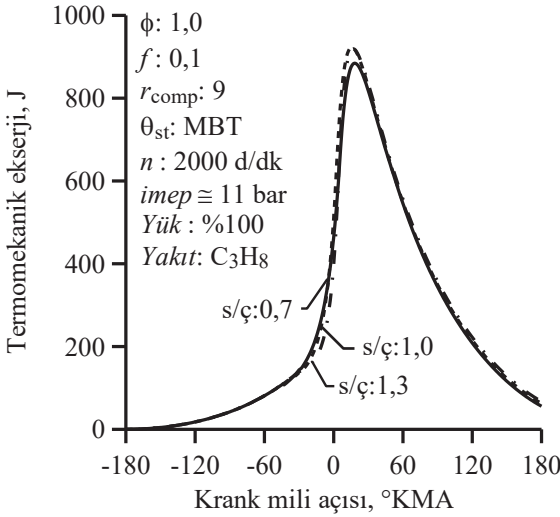
edilen ekserji artan strok/çap oranı ile artmakta ve $s/\ç=1,3$ için en yüksek değere ulaşmaktadır. İşle transfer edilen ekserjideki bu artışın strok/çap oranı arttıkça strok uzunluğundaki artıştan ve silindir içi basıncın değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Strok uzunlunun artması genişleme sürecinde elde edilen yararlı iş ve dolayısıyla işle transfer edilen ekserjinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca, Şekil 5(a) görüldüğü gibi strok/çap oranı arttıkça silindir basıncının özellikle yanmanın ilerleyen safhasında ve genişleme sürecinde daha yüksek değerler almasının çevrim işinin dolayısıyla işle transfer edilen ekserjinin artmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için $s/\ç=0,7$ ile elde edilen değerle kıyaslandığında işle transfer edilen ekserji $s/\ç=1,0$ ve $s/\ç=1,3$ için sırasıyla %2,69 ve %4,12 oranlarında artmıştır.

Şekil 6'da tersinmezliklerin strok/çap oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tersinmezlikler artan strok/çap oranı ile azalmakta ve $s/\ç=1,3$ için en düşük değere ulaşmaktadır. Bu çalışmada yanma ve ısı transferinden kaynaklanan tersinmezlikler dikkate alınmış olup yanmadan kaynaklanan tersinmezliklerin yanma süresinin uzamasıyla arttığı literatürde bildirilmektedir [9]. Benzer şekilde ısı transferinden kaynaklanan tersinmezlikler de yanma süresinin uzamasıyla transfer edilen ısı miktarının artmasıyla artmaktadır [10]. Bu etkiler nedeniyle, strok/çap oranının artmasıyla tersinmezlikler azalmaktadır. İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için $s/\ç=0,7$ ile elde edilen değerle kıyaslandığında tersinmezlikler $s/\ç=1,0$ ve $s/\ç=1,3$ için sırasıyla %1,25 ve %1,89 oranlarında azalmıştır.



Şekil 6. Strok/Çap oranının tersinmezliklerin değişimine etkisi

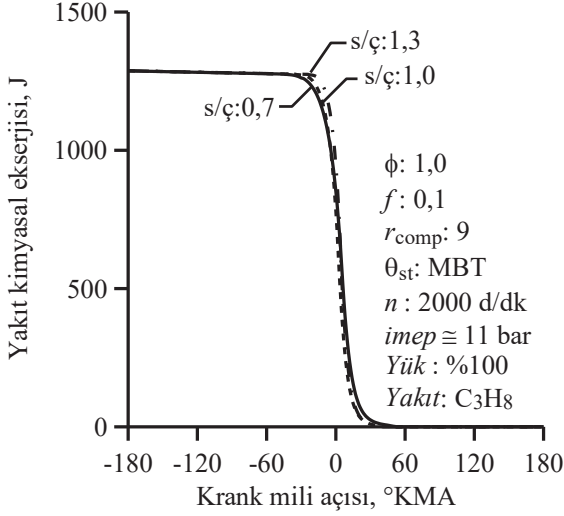
Şekil 7’de termomekanik ekserjinin strok/çap oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi termomekanik ekserji artan strok/çap oranı ile yanma ilk sürecinde ateşleme zamanının değişmesiyle azalmakta ancak yanmanın ilerleyen safhasında ve genişleme sürecinde artmaktadır. Böylece, $s/\ç=1,0$ için yanma sürecinin ilk aşamasında en yüksek termomekanik ekserji değerine ulaşılırken ve genişleme sürecinin sonunda $s/\ç=1,0$ için en yüksek termomekanik ekserji değerine ulaşılmıştır. Strok/çap oranına bağlı olarak termomekanik ekserjideki bu değişimin ısıyla ve işle transfer edilen ekserjilere ve dolaylı olarak da silindir basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. Yukarıda da ifade edildiği gibi strok/çap oranı arttıkça ateşleme zamanının geciktirilmesi sonucu yanma sürecinin başlangıcında daha düşük silindir basıncı ve sıcaklığının ortaya çıkmasının yanmanın ilerleyen safhasında ve genişleme sürecinde ise yanma işleminin daha geç tamamlanması daha yüksek basınç ve sıcaklıkların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda, strok/çap oranı arttıkça termomekanik ekserji yanma sürecinin başlangıcında azalırken yanmanın ilerleyen safhasında ve genişleme sürecinde artmaktadır.



Şekil 7. Strok/Çap oranının termomekanik ekserjinin değişimine etkisi

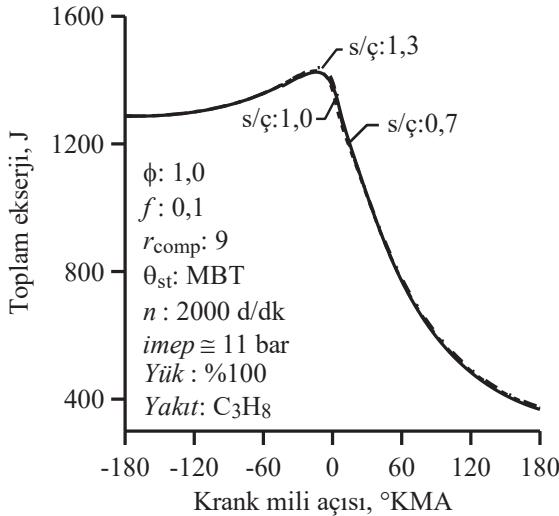
Şekil 8’de yakıt kimyasal ekserjisinin strok/çap oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi silindire giren yakıt miktarı yaklaşık aynı olduğundan yakıt kimyasal ekserjisi sıkıştırma sürecinde strok/çap oranı ile değişmemektedir. Yanma sürecinde ise strok/çap oranının değişimi ile ateşleme zamanının ve yanma sürelerinin farklı değerler almasına nedeniyle yakıt kimyasal ekserjisinde farklı değişimler görülmektedir. Ancak, bu çalışmada stokiyometrik yakıt-hava

karışımı kullanıldığından yanma işlemi sonunda yanmamış yakıt kalmadığından yanmanın sona ermesiyle tüm strok/çap oranları için yakıt kimyasal ekserjisi sıfır olmaktadır.



Şekil 8. Strok/Çap oranının yakıt kimyasal ekserjisinin değişimine etkisi

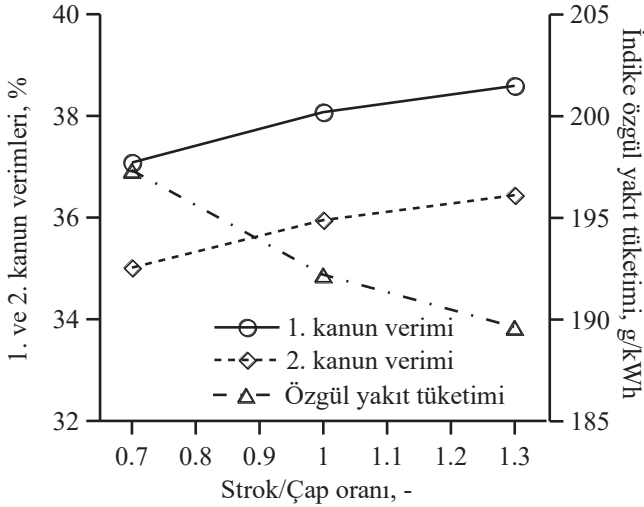
Şekil 9'da toplam ekserjisinin strok/çap oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sıkıştırma sürecinde strok/çap oranına bağlı olarak toplam ekserjideki değişim oldukça düşük seviyededir. Ancak, strok/çap oranının



Şekil 9. Strok/Çap oranının toplam ekserji değişimine etkisi

artmasıyla ateşleme zamanının değişmesi ve yanma süresinin kısılması sonucu yanma ilerleyen safhasında ve genişleme sürecinde toplam ekserji strok/çap oranının artmasıyla artmaktadır. Toplam ekserjideki bu değişim termomekanik ekserji ve yakıt kimyasal ekserjisindeki değişimlerin kombinasyonu olup genişleme süreci sonunda egzozla transfer edilen ekserji artan strok çap oranı ile artmıştır. İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için $s/\ç=0,7$ ile elde edilen değerle kıyaslandığında egzozla transfer edilen ekserji $s/\ç=1,0$ ve $s/\ç=1,3$ için sırasıyla %1,21 ve %2 oranlarında artmıştır.

Şekil 10'da 1.ve 2. Kanun verimlerinin ve özgül yakıt tüketiminin strok/çap oranına bağlı olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan strok/çap oranı ile 1.ve 2. Kanun verimleri artarken indike özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Eşitlik (32) ve (33)'ten görüleceği gibi 1. ve 2. Kanun verimlerindeki artışların artan strok/çap oranına bağlı olarak motordan elde edilen işin ve işle transfer edilen ekserjinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için $s/\ç=0,7$ ile elde edilen değerlerle kıyaslandığında $s/\ç=1,0$ ve $s/\ç=1,3$ için 1. Kanun verimi %2,67 ve %4,07 oranlarında ve 2. Kanun verimi %2,67 ve %4,08 oranlarında artmıştır. Strok/çap oranına bağlı olarak indike özgül yakıt tüketimindeki azalma ise doğrudan verimdeki artışın bir sonucudur. Çünkü özgül yakıt tüketimi verimle zıt yönde değişen bir büyüklüktür. İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için $s/\ç=0,7$ ile elde edilen değerlerle kıyaslandığında indike özgül yakıt tüketimi $s/\ç=1,0$ ve $s/\ç=1,3$ için sırasıyla %2,6 ve %3,91 oranlarında azalmıştır.



Şekil 10. Strok/Çap oranının a) 1. ve 2. Kanun verimlerine ve b) indike özgül yakıt tüketimine etkisi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada LPG (%100 Propan) yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda strok/çap oranının etkilerinin ekserji analizi ile teorik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, buji ateşlemeli motorlar için iki bölgeli sanki boyutlu bir çevrim modeli geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu model kullanılarak, strok/çap oranının ekserjetik terimlerin, birinci ve ikinci kanun verimlerinin ve özgül yakıt tüketiminin değişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada elde edilen bulguların ışığında aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- Ekserji analizi farkı çalışma koşullarında enerji dönüşümü ve transfer süreçleri arasındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasını ve çevrim süresince kaybedilen faydalı iş potansiyelinin 1. Kanun (enerji) analizinden daha gerçekçi ve detaylı bir şekilde belirlenmesini sağlayarak motorun performansı ve veriminin iyileştirilmesi için yeni yöntemler gösterebilmektedir.
- İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için strok/çap oranının artırılması motordan elde edilen yararlı işin ve dolayısıyla işle transfer edilen ekserjinin artmasını sağlarken ısı ile transfer edilen ekserjinin yani ısı kayıplarının azalmasını sağlamıştır. Strok/çap oranının 0,7 değeri için elde edilen verilerle kıyaslandığında strok/çap oranının 1,3 değerine artırılması durumunda işle transfer edilen ekserji yaklaşık %4,12 oranında artmış ısı ile transfer edilen ekserji ise yaklaşık %10,67 oranında azalmıştır.
- İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için strok/çap oranının artırılması tersinmezliklerin azalmasını sağlarken egzozla transfer edilen ekserji kayıplarının artmasına neden olmuştur. Strok/çap oranının 0,7 değeri için elde edilen verilerle kıyaslandığında strok/çap oranının 1,3 değerine artırılması durumunda tersinmezlikler yaklaşık %1,89 oranında azalmış egzozla transfer edilen ekserji ise yaklaşık %2 oranında azalmıştır.
- İncelenen LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlar için strok/çap oranının artırılması 1. ve 2. Kanun verimlerinin artmasını indike özgül yakıt tüketiminin ise azalmasını sağlamıştır. Strok/çap oranının 0,7 değeri için elde edilen verilerle kıyaslandığında strok/çap oranının 1,3 değerine artırılması durumunda 1. ve 2. Kanun verimleri sırasıyla %4,07 ve %4,08 oranlarında artmış indike özgül yakıt tüketimi ise yaklaşık %3,91 oranında azalmıştır.
- Bu sonuçlara göre; LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda strok/çap oranının belirli bir değere kadar artırılmasının bazı ekserji kayıplarının azalmasını sağlayarak motordan elde edilebilecek faydalı işi artırdığı, böylece motorun daha verimli ve yakıt tüketimi açısından daha ekonomik çalışmasının sağlanabileceği söylenebilir. Ancak, strok/çap oranının artması durumunda daha iyi sonuçlar elde edebilmek için ateşleme avansı ve diğer işletme özellikleri-

nin uygun şekilde ayarlanması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, strok/çap oranının artırılmasının motorun boyutlarında dolayısıyla kütlede değişime neden olabileceği bu durumda bir optimizasyon çalışmasının gerekli olabileceği düşünülmektedir.

Kısaltma ve Semboller

A	:	Alan, m^2
b	:	Silindir çapı, mm
C_p	:	Sabit basınçta özgül ısı, J/kg K
d_{intval}	:	Emme supabı çapı, mm
e	:	Özgül enerji, J/kg
E	:	Enerji, J
f	:	Artık egzoz gazlarının kütleli oranı, boyutsuz
h	:	Özgül entalpi, J/kg
I	:	Tersinmezlikler, J
$imep$:	Ortalama indike basınç, bar
l_{cr}	:	Biyel uzunluğu, mm
l_{intval}	:	Emme supabı maksimum açılma miktarı, mm
l_s	:	Strok uzunluğu, mm
KMA	:	Krank mili açısı, °
LPG	:	Sıvılaştırılmış petrol gazı
m	:	Kütle, kg
MBT	:	Maksimum torku veren ateşleme avansı, °
p	:	Basınç, bar
r_{comp}	:	Sıkıştırma oranı, boyutsuz
r_{bmf}	:	Yanmış kütle oranı, boyutsuz
r_{sp}	:	Bujinin silindir merkezinden uzaklık oranı, boyutsuz
s	:	Özgül entropi, J/kgK
S	:	Entropi, J/K
s/ζ	:	strok/çap oranı, boyutsuz
Q_w	:	Silindir duvarlarından olan ısı geçişi, J
Q_{LVH}	:	Alt ısıl değer, kJ/kg
T	:	Mutlak sıcaklık, K
TD1K	:	Termodinamiğin 1. Kanunu
TD2K	:	Termodinamiğin 2. Kanunu

U	:	Hız, m/s
v	:	Özgül hacim, m ³ /kg
V	:	Hacim, m ³
W	:	İş, J
x	:	özüml ekserji veya Kullanılabilirlik, J/kg
X	:	Ekserji veya Kullanılabilirlik, J
X_{exh}	:	Egzoz gazlarıyla transfer edilen ekserji, J
$X_{\text{f,ch}}$:	Yakıt kimyasal ekserjisi, J
X_Q	:	Isıyla transfer edilen ekserji, J
X_{tm}	:	Termomekanik ekserji, J
X_W	:	İşle transfer edilen ekserji, J
X_{tot}	:	Toplam ekserji, J

Yunan Harfleri

ϕ	:	Yakıt-hava ekivalans oranı, boyutsuz
η_I	:	1. Kanun verimi, %
η_{II}	:	2. Kanun verimi, %
θ	:	Krank mili açısı, °KMA
θ_{st}	:	Ateşleme zamanı, °KMA
θ_{bd}	:	Yanma süresi, °KMA
ρ	:	Yoğunluk, kg/m ³
τ_{bd}	:	Karakteristik yanma süresi, s
ω	:	Açısal hız, 1/s

Alt indisler

0	:	ölü hal koşulları
b	:	yanmış
cc	:	yanma odası
comb	:	yanma
cr	:	biyel kolu
cw	:	soğutma suyu
e	:	giren veya çekilen
f	:	alev veya yakıt
g	:	gaz
in	:	iç
int	:	emme

kin	:	kinetik
L	:	laminer
n	:	piston tablası
pot	:	potansiyel
T	:	türbülanslı
tot	:	toplam
u	:	yanmamış
w	:	duvar

Araştırmacıların Katkısı

Makale tek yazarlı olduğu için tüm katkı yazara aittir.

Çıkar Çatışması

Makale tek yazarlı olduğu için herhangi bir çıkar çatışması söz konusu değildir.

Kaynakça

- Alasfour, F. N. (1997). Butanol-a single-cylinder engine study: availability analysis. *Applied Thermal Engineering*, 17(6), 537-549. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(96\)00069-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(96)00069-5)
- Blizard, N. C., & Keck, J. C. 1974. Experimental and theoretical investigation of turbulent burning model for internal combustion engines. *Society of Automotive Engineering*, SAE paper no 740191, 846-864. Doi: <https://doi.org/10.4271/740191>
- Caton, J. A. (1999). *Results from the second-law of thermodynamics for a spark-ignition engine using a cycle simulation*. Fall Technical Conference of the ASME, Internal Combustion Engine Division, 35-49, Ann Arbor, Michigan.
- Caton, J. A. (2000). *A review of investigations using the second law of thermodynamics to study internal-combustion engines*. SAE World Congress, 1-15, Detroit, Michigan.
- Caton, J. A. (2000). *Operation characteristics of a spark-ignition engine using the second law of thermodynamics: effects of speed and load*. SAE World Congress, 1-17, Detroit, Michigan.
- Caton, J. A. (2002). *Detailed results for nitric oxide emissions as determined from a multiple-zone cycle simulation for a spark-ignition engine*. Fall Technical Conference of the ASME, Internal Combustion Engine Division, 1-19, New Orleans, Los Angeles.

- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (1994). *Thermodynamics, an engineering approach*. 2nd Edition, New York, USA, McGraw-Hill Inc.
- Fanhua, M., Chuanli, L., Deming, J., & Longbao, Z. 1994. Study on validation of turbulent entrainment combustion model for spark-ignition engines. Society of Automotive Engineers, SAE paper no 941935, p. 1-15. Doi: <https://doi.org/10.4271/941935>
- Ferguson, C. R. (1985). *Internal combustion engine, applied thermosciences*. New York, USA, John Wiley & Sons Inc.
- Ferguson C. R., Green R. M., & Lucht, R. P. 1987. Unburned gas temperatures in internal combustion engine II: Heat release computations. *Combustion Science and Technology*, 55, 63-81. Doi: <https://doi.org/10.1080/00102208708947071>
- Filipi, Z. S., & Assanis, D. N. 2000. The effect of the stroke-to-bore ratio on combustion, heat transfer and efficiency of a homogeneous charge spark ignition engine of given displacement. *International Journal of Engine Research*, 1(2), 191-208. Doi: <https://doi.org/10.1243/1468087001545137>
- Gallo, W. L. R., & Milanez, L. F. 1992. Exergetic analysis of ethanol and gasoline fueled engines. Society of Automotive Engineers, SAE paper no. 920809, 907-915. Doi: <https://doi.org/10.4271/920809>
- Gülde, Ö. 1984). Correlations of laminar combustion data for alternative S.I. engine fuels. Society of Automotive Engineers; SAE paper no. 841000, 1-23. Doi: <https://doi.org/10.4271/841000>
- Hu, Z., Whitelaw, J. H., & Vafidis, C. 1992. Flame propagation studies in a four-valve pentroof-chamber spark ignition engine. Society of Automotive Engineering, SAE paper no. 922321, 1-11. Doi: <https://doi.org/10.4271/922321>
- Kotas, T. J. (1995). *The exergy method of thermal plant analysis*. Florida, USA, Krieger Publishing.
- Moran, M. J., & Shapiro H. N. (2000). *Fundamentals of engineering thermodynamic*. New York, USA, John Wiley & Sons Inc.
- Poulos, S. G., & Heywood, J. B. 1983. The effect of chamber shape on spark ignition engine combustion. Society of Automotive Engineering, SAE paper no. 830334, 1-24. Doi: <https://doi.org/10.4271/830334>
- Rakopoulos, C. D. 1993. Evaluation of a spark ignition engine cycle using first and second law analysis techniques. *Energy Conversion and Management*, 34(12), 1299-1314. Doi: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(93\)90126-U](https://doi.org/10.1016/0196-8904(93)90126-U)
- Rakopoulos, C. D., & Giakoumis, E. G. 2006. Second law analyses applied to in-

ternal combustion engines operation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(1), 2–47. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.10.001>

Shapiro H. N., & Van Gerpen, J. H. 1989. Two zone combustion models for second law analysis of internal combustion engines. Society of Automotive Engineers, SAE paper no. 890823, 1408–1422. Doi: <https://doi.org/10.4271/890823>

Sher, E., & Bar-Kohany, T. 2002. Optimization of variable valve timing for maximizing performance of an unthrottled SI engine—a theoretical study. *Energy*, 27, 757–775. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00022-1)

Sezer, I., & Bilgin, A. 2008. Mathematical analysis of spark ignition engine operation via the combination of the first and second laws of thermodynamics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 464, 3107–3128. Doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.2008.0190>

Sezer, I., & Bilgin, A. 2012. Exergetic evaluation of speed and load effects in spark ignition engines. *Oil & Gas Science and Technology*, 67(4), 647–660. Doi: <https://doi.org/10.2516/ogst/2012002>

Sung, N. W., & Jun, S. P. 1997. The effects of combustion chamber geometry in an SI engine. Society of Automotive Engineering, SAE paper no. 972996, 227–239. Doi: <https://doi.org/10.4271/972996>

Van Gerpen, J. H., & Shapiro, H. N. 1990. Second law analysis of diesel engine combustion. *Transaction of ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 112, 129–137. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.2906467>

Yamin, J. A. A., Gupta, H. N. & Bansal, B. B. 2003. The effect of combustion duration on the performance and emission characteristics of propane-fueled 4-stroke S. I. engines. *Emirates Journal for Engineering Research*, 8(1), 1–14.



TEDARİK ZİNCİRİNDE DİRENÇ KONULU LİTERATÜRÜN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ

Batuhan KOCAOĞLU¹, Utkan ULUÇAY^{2*}

¹ İstanbul Topkapı Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İstanbul
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6876-1362>

² Maltepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi
Bölümü, İstanbul, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8182-9093>

Anahtar kelimeler

Öz

CAS, karmaşıklık,
direnc, tedarik zinciri,
simülasyon

Küreselleşmenin etkisi ve karmaşıklaşan ürün-üretim yapıları nedeniyle tedarik zincirlerinin geleneksel doğrusal yöntemlerle açıklanması giderek zorlaşmaktadır. Literatürde dinamik ortamlara uyumu vurgulayan CAS (Complex Adaptive Systems-Karmaşık Uyumlu Sistemler) yapısı ve direnc konuları birlikte ele alınmamıştır. Bu çalışmanın amacı literatürdeki bu boşluğun tamamlanmasına katkı sağlamaktır. Sistematik literatür tarama ve bibliyometrik bilimsel haritalama yöntemleriyle Web of Science veri tabanında üretim odaklı tedarik zinciri özelinde araştırma yapılmıştır. Tedarik zinciri ve direnc konularının akademide son yıllarda ilgi çektiği, CAS yaklaşımının tedarik zinciri ve direnc konularına uygun bulunduğu, önerilen en yaygın analitik doğrulama yönteminin simülasyon olduğu görülmüştür. Bulguların ilgili fakültelerde müfredat güncellemesine ve konuyla ilgili çalışmaların literatürdeki eğilime göre ayarlanmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

* utkan.ulucay@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1374937

BIBLIOMETRIC REVIEW OF RESILIENCE IN SUPPLY CHAIN LITERATURE

Keywords

CAS, complexity, resilience, supply chain, simulation

Abstract

The impact of globalization and the increasingly complex nature of BOM (Bill of Materials) and manufacturing structures make it progressively challenging to explain supply chains using traditional linear methods. The literature lacks an integrated examination of Complex Adaptive Systems (CAS), which emphasizes adaptability to dynamic environments, and the resilience concept. This study aims to contribute to filling this gap in the literature. Research was conducted on production-oriented supply chains through a systematic literature review and bibliometric mapping methods using the Web of Science database. It was observed that supply chain and resilience issues have gained attention in academia in recent years, the CAS approach is deemed suitable for supply chain and resilience topics, and simulation is the most recommended analytical validation method. The findings are expected to contribute to curriculum updates in relevant faculties and the alignment of studies on the subject with the current trends in the literature.

Derleme Makalesi

Başvuru Tarihi : 12.10.2023

Kabul Tarihi : 11.01.2024

Review Article

Submission Date : 12.10.2023

Accepted Date : 11.01.2024

Extended Abstract

Introduction/Background

Supply chains are changing as the paradigm is shifting from scarcity to abundance of supply. Industry 4.0 is accelerating the transformation from linear solutions to non-linear alternatives. Supply chains are becoming network webs with adaptive capabilities. Hence different theories are discussed to explain the supply chain, robustness, and resilience issues.

Resource-Based Dependency View is based on a linear formation in isolation of the environment. It focuses on productivity and a specific actor in a chain. Therefore, it is criticized for not reflecting adaptivity and a holistic view in an ever-changing business environment (Tukamuhabwa, Stevenson, Busby and Zorzini, 2015; Yaroson, Breen, Hou and Sowter, 2021).

Dynamic Capabilities reflect learning and cooperating abilities within the chain. But it is not strong enough to explain the systematic nature of a supply chain (Tukamuhabwa et al, 2015; Yaroson et al, 2021).

The Social Capital/Exchange-Network approach refers to a web rather than a chain. Providing a higher level of collaboration between actors is not easy and has a cost of fragility due to increasing complexity (Durach, Wiengarten, and Choi, 2020; Son, Chae, and Kocabaşoğlu-Hillmer, 2021; Wissuwa, Durach, and Choi, 2022).

Complexity Theory, System Theory, Network Theory, and CAS (Complex Adaptive Systems) are similar in nature and complement each other. In this study, CAS is the main focus to demonstrate its ability to explain supply chain and resilience attributes.

Objectives/Research Purpose

Research questions are based on CAS and its power to explain supply chains and resilience requirements. A learning and interacting supply chain is adaptive and non-linear since its actors could react in different tones and directions to similar signals. The purpose of this study is to review relevant articles to determine gaps in the literature. Research questions are listed below:

Research Question 1: Does CAS fit to explain resilience?

Research Question 2: Does CAS fit to explain a supply chain?

Research Question 3: What are the gaps in the literature concerning resilient supply chains?

Methods/Methodology

Web of Science (WoS) database is solely employed. A systematic literature review process is followed by complexity, resilience, sales and operations planning, supply chain, publication date window, WoS index types, and WoS categories as inclusion criteria. Since the systems theory and CAS are rooted in biology an exclusion criteria is applied to remove non-supply chain-related articles. Selected articles were read and a backward search ended up with 54 final articles complying with the inclusion criteria partly. VOSviewer is used to analyze keyword relationships and citation networks.

Results/Findings

Sales and operations planning (S&OP) is not a non-linear tool and frequent reviews of plans are not helping to navigate a supply chain smoothly. S&OP requires a mechanism to employ feedback and the dynamic nature of the environment and the supply chain (Duong and Chong, 2020; Noroozi and Wikner, 2017; Thome, Scavarda, and Scavarda, 2016).

Analytical tools are not performing well in dynamic environments involving feedback loops and emergent cases. There is an increasing tendency in favor of simulation in the literature emphasizing agent-based and system dynamics techniques (Ghadge, Er, Ivanov, and Chaudhuri, 2022; Ledwoch, Yaşarcan, and Brintrup, 2018).

In the new paradigm, CAS is the common denominator for supply chain and resilience domains. As for the first research question, CAS explains the dynamic nature of resilience by learning, adapting, and interacting with the environment. As for the second research question, CAS explains the dynamic network of self-motivated, independent actors with emerging situations in the environment. As for the last research question, there is a gap in the literature seeking a holistic model for S&OP or supply chain management backed up with feedback loops in a dynamic fashion. Simulation is fitting to this environment as an analytical tool for validation.

Discussion and Conclusions

Conventional academic studies in Operations Research literature are criticized for two reasons: Academic interests do not match industrial needs and heavy use of surveys is not convincing compared to simulation (van Veele and van Raaij, 2014).

In supply chains, there are several actors in different levels of complication simultaneously. In case of mismanagement, the expected order of any chain is chaos (Naim and Gosling, 2023). In the dynamic environment of a supply chain, static-linear tools are not performing well (Higgins, Miller, Archer, Ton, Fletcher, and McAllister, 2010). Digitizing a chain is not a silver bullet since it also increases the complexity of the chain (Duong and Chong, 2020; Noroozi and Wikner, 2017; Peralta and Soltero, 2020; Tuomikangas and Kaipia, 2014). The S&OP approach does not cover the "human aspect" of any chain (Kristensen and Jonsson, 2018).

All actors in any supply chain are a source of variation and unexpectedness. They have different reactions in varying degrees to similar signals. Their aggregate reaction is the supply chain's response to those signals (Azadegan and Dooley, 2021; Pournader, Rotaru, Kach, and Razavi Hajiagha, 2016).

CAS is learning, adapting, and dynamic structure. It fits into supply webs and resilience concepts.

1. Giriş

Küreselleşme, tedarik zincirlerinin genişlemesi, ürün ağaçlarının büyümesi, tüketici taleplerinin çeşitlenmesi, tedarik aksamaları gibi unsurlar iş ortamında belirsizlik ve karmaşaya yol açmaktadır (Hou, Wang, Wu, ve He, 2018; Ledwoch, Yaşarcan, ve Brintrup, 2018; Tuomikangas ve Kaipia, 2014; Yan, Yin, Chen, ve Jia, 2022; Yaroson, Breen, Hou, ve Sowter, 2023; Zhao, Zuo, ve Blackhurst, 2019). Maliyet etkinliği sağlamak veya verim iyileştirmek için kullanılan Yalın Üretim benzeri teknikler belirsizliklere olan direnci azaltabilmektedir (Tukamuhabwa, Stevenson, Busby, ve Zorzini, 2015).

Tedarik zincirlerinin varlıklarını sürdürebilmeleri için karmaşıklığa dirençli olmaları gerekmektedir. Bu noktada çevresiyle etkileşimi olan ve bağımsız hareket eden etmenlerden (agent) oluşan CAS (Complex Adaptive Systems-Karmaşık Uyumlu Sistemler) öne çıkmaktadır (Sheth ve Kusiak, 2022).

Bu çalışma, üretim odaklı tedarik zincirinde CAS ve direnç kavramlarını birlikte ele alarak inceleyen bir literatür taramasına rastlanılmadığı için yapılmıştır.

Literatürde direnç (resilience) için 22 farklı tanım derlenmiş, maliyet etkinliği faktörünün ilavesiyle “Bir tedarik zincirinin olası aksamalara hazırlanma ve/veya tepki verme, hızlı ve maliyet etkin toparlanarak, idealde, öncekinden daha iyi bir duruma gelebilme kabiliyetidir” tanımı öne çıkmıştır (Tukamuhabwa ve diğ., 2015). Direnç konusu hazırlık (preparedness), tepki (response), toparlanma (recovery) ve gelişme (growth) olarak dört fazda değerlendirilmektedir. Bu fazlara ilişkin stratejiler proaktif ve reaktif olarak iki gruba ayrılmaktadır (Tukamuhabwa ve diğ., 2015).

Direnç kavramı mühendislik (engineering), çevre (ecological) (Adobor ve McMullen, 2018) ve evrim (evolution) (Adobor, 2020) olmak üzere üç boyutlu değerlendirilmektedir. Mühendislik boyutu sistemlerin durağanlığına, bilinen optimum noktaya geri dönmesine ilişkin bir görüştür (Novak, Wu, ve Dooley, 2021; Wieland ve Durach, 2021). Çevre boyutuna göre tek bir optimum nokta yoktur, değişen çevre şartlarına uygun ve “daha iyi” bir yeni denge noktası söz konusudur (Adobor ve McMullen, 2018; Novak ve diğ., 2021). Bu yaklaşımın sosyo-çevre (social-ecological) yorumu evrim boyutuna benzerlik göstermektedir (Wieland ve Durach, 2021). Evrim boyutunda sistemlerin statik değil, dinamik olduğu dik-kate alınmakta, sürekli uyum göstererek çevresiyle birlikte öğrenen yapı konu edilmektedir (Adobor ve McMullen, 2018; Massari ve Giannoccaro, 2021).

Karmaşıklık Teorisi, benzer nitelikleri itibariyle Kaos Teorisi (Chaos Theory) (Kumar ve Arun, 2021), çevresiyle etkileşimli ağ yapısı itibariyle Şebeke/Ağ Teorisi (Network/Graph Theory) (Choudhary, Ramkumar, Schoenherr ve Rana, 2021) ve çevreyle olan geri bildirimli etkileşimi açıklayan Sistem Teorisi (System

Theory) ile birlikte değerlendirilmiştir (Blackhurst, Dunn ve Craighead, 2011; Hosseini, Ivanov ve Blackhurst, 2022; Ghadge, Er, Ivanov, ve Chaudhuri, 2022).

Karmaşık sistemin temel yapı taşı CAS'tır. CAS sistemlerde etmenler benzer kuralları paylaşır, farklı tepkiler verseler bile sistem belirlenen amaca yakınsar, sistemin kendi içinde veya çevresinden alacağı benzer sinyallere (signal & boundary) değişen şiddette tepkiler verir, sürekli etkileşim (akış) halindedir (Adobor, 2020; Massari ve Giannoccaro, 2021; Sadeghi, Struckell, Ojha, ve Nowicki, 2021; Yan ve diğ., 2022; Yaroson ve diğ., 2023). Bu sistemler dinamikdir, sürekli evrimleşir ve bilinen bir optimum yoktur (Adobor, 2020; Akpınar ve Caylan, 2023; Novak ve diğ., 2021).

Bu noktada araştırma soruları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- AS1: CAS yaklaşımı tedarik zincirinde direnç kavramına uygun mudur?
- AS2: CAS yaklaşımı tedarik zinciri modellemesine uygun mudur?
- AS3: Tedarik Zincirinde direnç konulu literatürdeki boşluklar nelerdir?

Bu çalışmada alanın yapısını görebilmek üzere sistematik literatür taraması yöntemi ve bibliyometrik analiz birlikte kullanılmıştır. Nitelikli dergileri içeren, geniş bir arşiv tutan ve erişim kolaylığı olan Web of Science (WoS) veri tabanı tercih edilmiştir. Ücretsiz erişimi, ilgili dokümantasyona ulaşma kolaylığı, literatür taramalarında sık kullanılması ve görselleştirme olanağı nedeniyle VOSviewer ver 1.6.19 yazılımı kullanılmıştır. Kavramların zaman içindeki eğilimini gösterebilmek amacıyla temel analiz konuları anahtar kelimelerden ortak kelime analizi ve atıf analizi olarak seçilmiştir. Zaman içindeki eğilim tabakalama (overlay) gösterimiyle belirlenmiştir.

Makalenin ikinci bölümünde literatürde direnç alanında kullanılan teoriler ve yöntemler gözden geçirilmiş, üçüncü bölümünde sistematik literatür tarama için izlenen yöntem, taksonomi ve sürecin iş akışı araştırma sorularına uygun olarak açıklanmış, dördüncü bölümünde Web of Science (WoS) analiz araçları ve VOSviewer bibliyometrik analiz sonuçlarını içeren bulgularla birlikte belirlenen makalelerin kavram matrisi paylaşılmış, beşinci bölümünde bulgular literatürle kıyaslanarak araştırma soruları cevaplanmış ve araştırma önerileri listelenmiştir. Altıncı bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Tedarik zincirlerinin direncini inceleyen araştırmalarda rastlanılan teorik alt-yapı Tablo 1'de verilmiştir (Akpınar ve Caylan, 2023; Rahman, Paul, Shukla, ve Agarwal, 2022; Tukamuhabwa ve diğ., 2015; Yaroson ve diğ., 2021).

Tablo 1. Literatürde Tedarik Zincirlerini Açıklarken Kullanılan Teoriler

Teoriler	Referanslar
Kaynak Bazlı (Resource Based/ Dependency View)	(Akpınar ve Caylan, 2023; Barakat, Tipi, ve Wu, 2023; Blackhurst ve diğ., 2011; Mena, Humphries, ve Choi, 2013; Treiblmaier, 2018; Tukamuhabwa ve diğ., 2015; van Weele ve van Raaij, 2014; Yaroson ve diğ., 2021)
Dinamik Yetenekler (Dynamic Capabilities)	(Barakat ve diğ., 2023; Tukamuhabwa ve diğ., 2015; van Weele ve van Raaij, 2014; Yaroson ve diğ., 2021;)
Karmaşıklık – Sistem – Şebeke Teorisi (CAS, Complexity Theory, System Theory, Network / Graph Theory)	(Adobor, 2018; Adobor, 2020; Akpınar ve Caylan, 2023; Azadegan ve Dooley, 2021; Barakat ve diğ., 2023; Blackhurst ve diğ., 2011; Choudhary, Kim, ve Ramkumar, 2022; Choudhary ve diğ., 2021; Day, 2014; Demirel, MacCarthy, Ritterskamp, ve Champneys, 2019; Ghadge ve diğ., 2022; Higgins, Miller, Archer, Ton, Fletcher, ve McAllister, 2010; Hosseini ve diğ., 2022; Hou ve diğ., 2018; Ivanov, 2022; Koh, Gunasekaran, Morris, Obayi, ve Ebrahimi, 2017; Kumar ve Arun, 2021; Ledwoch ve diğ., 2018; Lusiantoro ve Pradiptyo, 2022; Massari ve Giannoccaro, 2021; Mena ve diğ., 2013; Naim ve Gosling, 2023; Novak ve diğ., 2021; Peralta ve Soltero, 2020; Pournader, Rotaru, Kach, ve Razavi Hajiagha, 2016; Sadeghi ve diğ., 2021; Son ve diğ., 2021; Treiblmaier, 2018; Tukamuhabwa ve diğ., 2015; Wieland ve Durach, 2021; Wissuwa ve diğ., 2022; Yan ve diğ., 2022; Yaroson ve diğ., 2021; Yaroson ve diğ., 2023; Zavala, Nowicki, ve Ramirez-Marquez, 2018; Zhao ve diğ., 2019)
Sosyal Sermaye/ Değişim/ Sistem/ Şebeke (Social Capital/ Exchange/ System/ Network)	(Durach, Wiengarten, ve Choi, 2020; Lusiantoro ve Pradiptyo, 2022; Mena ve diğ., 2013; Son ve diğ., 2021; van Weele ve van Raaij, 2014; Wissuwa ve diğ., 2022)

2.1 Kaynak Bazlı Bakış Yaklaşımı

Tedarik zincirleri ve direnç konusu incelenirken, kaynak bazlı bakış ancak zincirin doğrusal olduğu ve izole bir ortamda çalıştığı varsayımları geçerli olarak uygun bir teorik çerçeve olmuştur. Ancak bu bakışta direncin kompleks yapıdaki bir zincirin tek bir firmasındaki iç işleyişi söz konusu edilmekte, dirençli olmak için kulla-

nılan kaynakların maliyet yarattığı ve verim kaybına yol açtığı düşünülmekte (Yarosan ve diğ., 2021) ve tek bir firmanın başarılı olmasının zincire katkısı şüpheli görülmektedir (Barakat ve diğ., 2023). Bu yaklaşımda zincirin değişen çevreye uyumu yer almamaktadır (Tukamuhabwa ve diğ., 2015). Bu noktada firmaların zincir içinde iş birliğine dayalı genişletilmiş kaynak bazlı bakış (extended resource based view) gündeme getirilmiştir (Barakat ve diğ., 2023).

2.2 Dinamik Yetenekler Yaklaşımı

Dinamik yetenekler görüşü firmaların kabiliyetlerini zincir içinde iş birliği yaparak zincirin faydasına kullanabildiğini öngörmektedir (Barakat ve diğ., 2023). Bunun için firmaların çevredeki değişimlere duyarlı olması ve iş birliği yapması kritiktir ancak yine de tedarik zincirlerinin sistematik yapısını açıklamakta yetersiz bulunmaktadır (Tukamuhabwa ve diğ., 2015; Yarosan ve diğ., 2021). Tedarik zincirleri içerdikleri insan unsuru ve alınan kararların sonuçlara etkisi nedeniyle doğadaki evrim-simbiyoz gibi yaklaşımlardan farklıdır (Kristensen ve Jonsson, 2018).

2.3 Sosyal Sistem-Şebeke Teorisi Yaklaşımı

Tek bir firma yerine zincir içindeki firma yaklaşımını gözeten bir diğer görüş sosyal sistem-şebeke teorisi. Bu teoride zincir artık ağ (network) formundadır ve ağ içinde iş birliği arttıkça firmaların ihtiyaç duydukları kaynaklara erişimlerinin artacağı kabul edilir (Lusiantoro ve Pradiptyo, 2022). Firmaların sosyal becerileri kadar, ağ içinde ilişkili oldukları firma sayıları ve ağdaki konumları da önem kazanmaktadır (Son ve diğ., 2021). Bu ilişkilerde karşılıklı fayda ve güven olmadığında ağ içinde iş birliği sağlamak zorlaşmaktadır (Durach ve diğ., 2020). Sosyal sistem teorisine göre iş birliği sayesinde ağ içinde aksamalar azalmalıdır ancak Normal Kaza Teorisine (Normal Accident Theory) göre karmaşık sistemler, daha sade sistemlere göre daha çok aksamakta ve aksamaları görmekte daha fazla zorlanmaktadır. Dolayısıyla iş birliği olanağı olması iyi sonuç almayı garanti edememektedir (Wissuwa ve diğ., 2022).

2.4 Satış ve Operasyon Planlama Yaklaşımı

Tedarik zincirlerinde artan belirsizlikle mücadelede alternatif yöntem Satış ve Operasyon Planlamasıdır (S&OP). S&OP kullanılırken plandan ziyade uygulamaya öncelik verilmiştir (Noroozi ve Wikner, 2017). S&OP sürecinin olgunluğunu ölçen kriter olmayışı eleştirilmiştir (Thome, Scavarda, Fernandez, ve Scavarda, 2012). S&OP için bütüncü bir model olmadığı gibi yoğun, doğru, güncel veri toplamanın zorluklarını organize edebilen bir kullanım kılavuzu da yoktur (Tomikangas ve Kaipia, 2014). Tedarik zincirlerinde firmaların birbirleriyle olan ilişkileri, sözleşmeleri, güvensizlikler, farklı bilgi sistemlerindeki entegrasyon

zorlukları, verinin güncel tutulmasındaki güçlükler gibi faktörler iş birliğini zorlaştırmaktadır (Duong ve Chong, 2020). Karmaşıklığı dinamik ve detay olarak sınıflayan bir makalede S&OP yaklaşımının “insan” unsuru içerdiğine dikkat çekilmekte, aynı zamanda sektör – ürün ağacı – firma büyüklüğü gibi karakteristikler nedeniyle bağlam (context) hassasiyeti vurgulanmaktadır (Kristensen ve Jonsson, 2018). İş ortamındaki belirsizliğe cevap olarak S&OP yaklaşımı değerlendirilmiş ancak sık düzeltme yapılmasına rağmen uygulamada güçlükler görülmüştür (Noroozi ve Wikner, 2017). Zaman içinde S&OP yaklaşımı incelendiğinde firmadan tedarik zincirine ve S&OP’den sistem yaklaşımına doğru bir evrilme görülmektedir (Thomé, Scavarda, ve Scavarda, 2016).

2.5 Simülasyon Yaklaşımı

Artan belirsizlik karşısında geleneksel analitik yöntemler yerine, özellikle etmen tabanlı yani duruma uygun adapte olabilen simülasyon teknikleri tercih edilmektedir (Tang, 2006). Operasyonel yöneticilerin belirsizlik – muğlak- karmaşık yapıları anlamakta zorlanmaları ve gerçekleşmesi kesin olmayan olaylar için yatırım yapmaktan kaçınmaları gibi çekinceler listelenmiştir (Tang, 2006). Tedarik zincirlerinin farklı noktalarındaki risklerin etkilerini ve olası önlemlerin sonuçlarını içeren çok yönlü incelemeler için simülasyon teknikleri kullanışlı olmaktadır (Pereria, Oliveir, ve Carravilla, 2020). Dinamik ve karmaşık sistemlerde CAS yapılarının farklı karar setlerini gözetebilmek üzere etmen tabanlı (Naim ve Gosling, 2023; Zhao ve diğ., 2019) ve çevreyle olan etkileşimdeki geri bildirimleri yansıtabilmek üzere sistem dinamikleri (system dynamics) esaslı simülasyon yöntemleri önerilmiştir (Ghadge ve diğ., 2022; Ledwoch ve diğ., 2018).

Literatürün ortak noktası, iş ortamının giderek belirsizleştiği ve geleneksel doğrusal analitik yöntemlerin yetersiz kaldığıdır. Tedarik zincirlerinde bu belirsizlik sık toplantılı S&OP yaklaşımıyla karşılanmaya çalışılmış, ancak genel olarak bu konuda alternatif araştırma yapılması önerilmiştir. İş birliğinin olumlu etkisi olacağı belirtilmekle beraber, karmaşıklığı artıracak uyarısı da yapılmaktadır. En yaygın doğrulama aracı önerisi etmen tabanlı (agent based) ve tercihen aynı zamanda ayrık olay (discrete event) veya sistem dinamikleri (system dynamics) içeren simülasyon tekniğidir.

3. Yöntem

Bu çalışmada sistematik literatür araştırma için beş adımlı süreç (vom Brocke, Simons, Björn, Riemer, Plattfaut ve Clevon, 2009) takip edilmiş, kapsam belirlemesi taksonomiyle (Cooper, 1988) yapılmış, sınıflamada kavram matrisi (Webster ve Watson, 2002) kullanılmıştır. Şekil 1’de gösterilen sürecin üçüncü adımı bibliyometrik analizle desteklenmiştir.

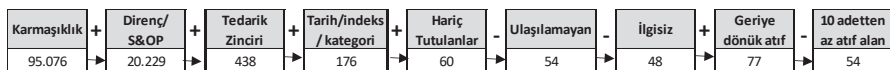
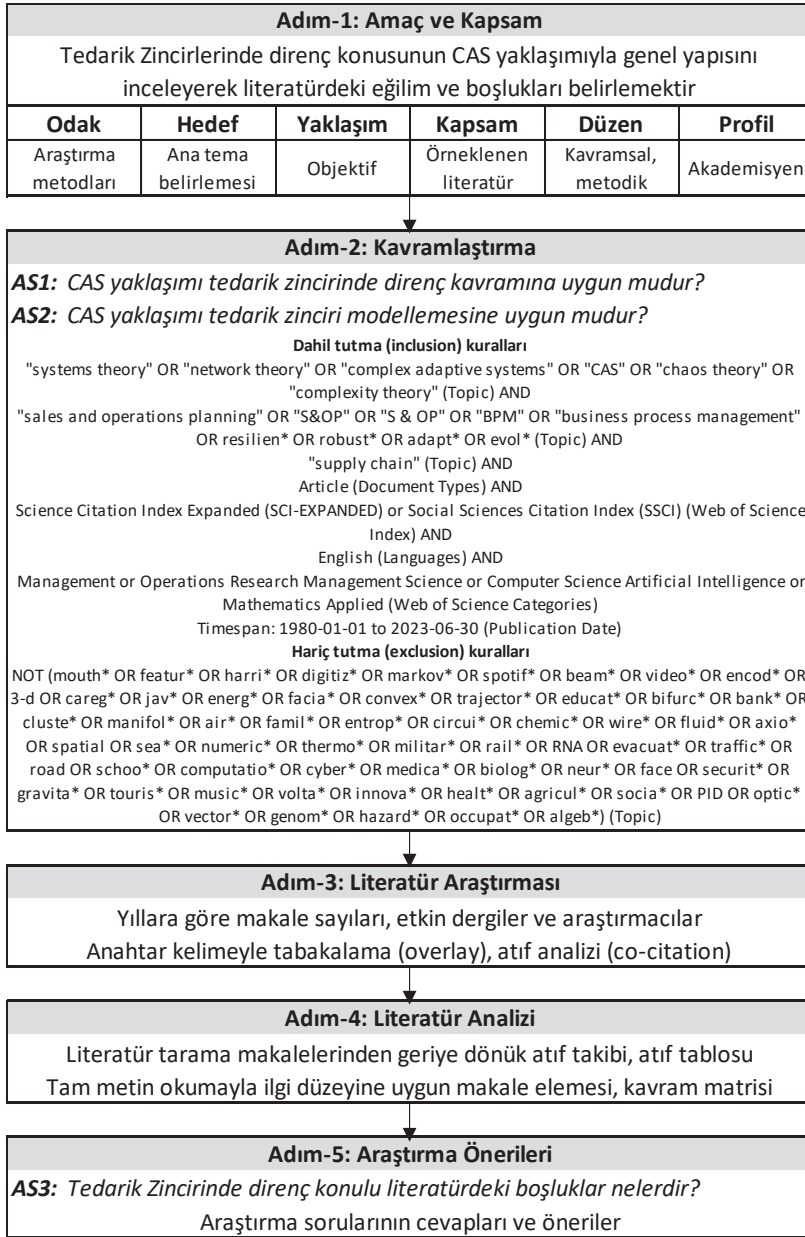
Adım-1'de çalışmanın çerçevesi akademisyenler için tedarik zincirinde direnç ve CAS kavramlarının birlikte değerlendirileceği literatür taraması olarak belirlenmiştir.

Adım-2'de araştırma soruları, veri tabanı seçimi ve dahil tutma (inclusion) ve hariç tutma (exclusion) kuralları listelenmiştir. Veriler, Web of Science (WoS) veri tabanından 15/08/2023 tarihinde saat 12:00 itibariyle sorgulanmıştır. Sistem teorisi ve CAS kavramları temel bilimlerden geldiği için üretim odaklı tedarik zinciriyle ilgisi zayıf olan medikal - biyoloji - optik - enerji - matematiksel hesaplama algoritmaları - yazılım - eğitim - ulaştırma - askeri - aile - turizm - iş güvenliği - güvenlik konuları hariç tutulmuştur.

Adım-3'te WoS istatistikleriyle makale sayıları ve etkin dergiler incelenmiştir. VOSviewer ile anahtar kelimeler bazında tabakalama (overlay) ve atıf analizi (co-citation) yapılmıştır.

Adım-4'te WoS filtrelemeyle belirlenen 60 makeden altı adedine ulaşamamıştır. Hariç tutma kuralları sadece konu (topic) olarak yer almıştır ancak makaleler incelendiğinde aynı kurallar uyarınca kalan 54 makale içinden altı makale hariç tutulmuştur. Kalan 48 makaleye geriye dönük atıf takibi neticesinde dahil tutma kurallarının tamamı yerine, sadece karmaşıklık veya sadece S&OP şartlarını sağlayan 29 makale eklenerek 77 makale belirlenmiştir. 77 makale içinde 10 adetten az atıf alan 23 makale etkisiz kabul edilerek çıkarılmış ve finalde tam metin incelenecek 54 makale netleştirilmiştir.

Adım-5'te araştırma sorularının cevapları tartışılmış, araştırma önerileri belirtilmiştir.



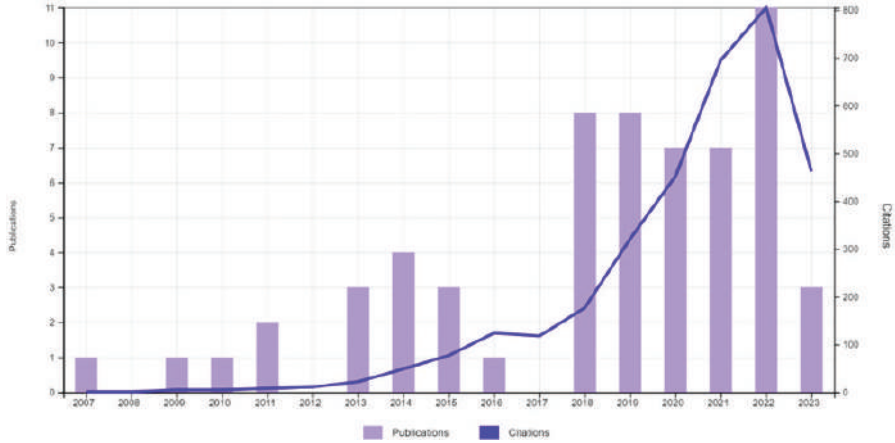
Şekil 1. Sürecin Akış Şeması

4. Bulgular

4.1 Adım-3: WoS Üzerinde Makale-Dergi Analizi

Listelenen 60 makalenin 2007 ile 2023 arasında toplam atıf sayısı 3.333 adettir. Şekil 2'de gösterilen ve yıllara göre artan makale sayısı, konunun akademik ilgi çekiciliğine işaret etmektedir. Makalelerin WoS kategorilerine bakıldığında 39 adedinin Management, 21 adedinin Operations Research Management Science olduğu görülmüştür.

Makalelerin %52'si 26 derginin ilk altısında yayınlanmıştır: International Journal of Operations Production Management, Journal of Supply Chain Management, International Journal of Production Economics, International Journal of Production Research, Supply Chain Management an International Journal, International Journal of Logistics Management.



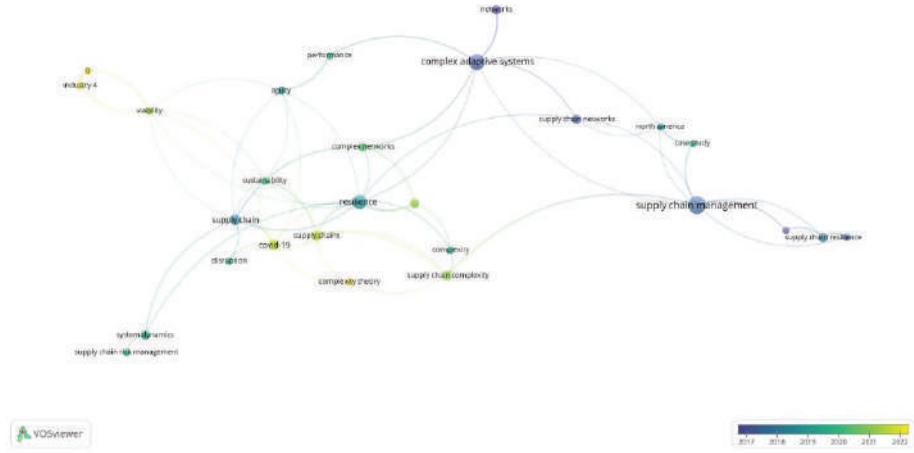
Şekil 2. Listelenen 60 Makalenin Yıllık Dağılımı (WoS- yazar tarafından alınmıştır)

4.2 Adım-3: VOSviewer ile Tabakalama ve Atıf Analizi

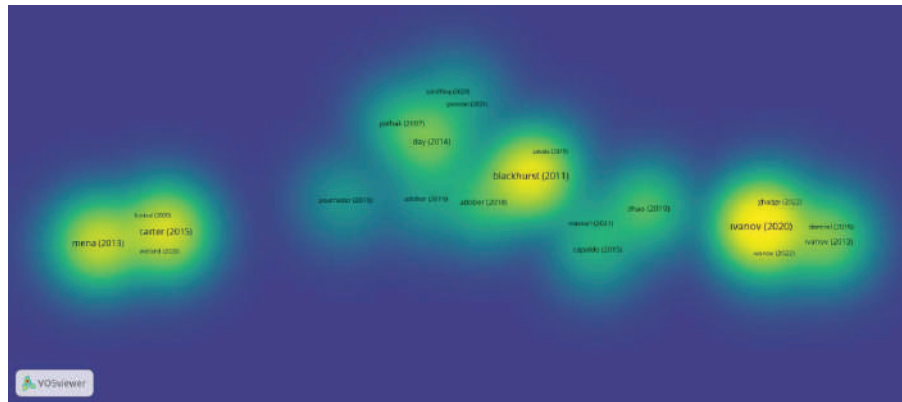
Araştırmacıların anahtar kelimeleri üzerinden tedarik zinciri – direnç - CAS ilişkilerini görselleştirebilmek amacıyla VOSviewer ver 1.6.19 kullanılmıştır. Yazılıma yüklenen 60 makalelik veri seti için anahtar kelimeler üzerinde kesirli sayım (fractional counting) ve iki tekrarlı eşikle ortak kelime analizi yapılmıştır. Tabakalama (overlay) sonucu Şekil 3'te verilmiştir. Noktaların büyüklüğü yoğunlaşmayı, bağlantıların kalınlığı ilişkinin gücünü ve ağ üzerindeki konumlama kavram yakınlığına dayalı olarak kümelerin formasyonunu temsil etmektedir. Maviden sarıya doğru renk geçişi yayın tarihi olarak 2017 senesinden 2023 se-

nesine doğru kronolojik akışı göstermektedir. Kavram merkezi direnç ve CAS ek-seni üzerindedir, tedarik zinciri yönetiminden direnç – karmaşıklık kavramlarına doğru geçişler fark edilmiştir.

Bu kavram içinde en etkili araştırmacı-araştırmaları belirlemek üzere, aynı veri setiyle 20 tekrarlı eşik kullanılarak atıf analizi (cititon) yapılmış ve yoğunluk (density) sonucu Şekil 4'te verilmiştir. Sarı renkler atıf yoğunluğuna işaret etmektedir. Ivanov, Blackhurst, Carter ve Mena yoğunluğu fark edilmiş ancak tabakalama analizine bakıldığında, Ivanov'un daha güncel olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Anahtar Kelimeye Ortak Kelime Tabakalama Sonucu (VOSviewer- yazar tarafından alınmıştır)



Şekil 4. Atıf Analizi Yoğunluk Sonucu (VOSviewer- yazar tarafından alınmıştır)

4.3 Adım-4: Tam Metin Analizi

Listelenen 60 makaleden, 6 adet ulaşılamayan, 6 adet ilgisiz bulunan, 23 adet az atıf aldığı için etkisiz kabul edilen makaleler çıkarılmış ve geriye dönük atıf analiziyle 29 makale eklenerek tam metin analizi için 54 makale belirlenmiştir. Bu makalelerde, 100 adetten fazla atıf alanlar için Tablo 2’de gösterilen kavram matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 2. 100 Adetten Fazla Atıf Alan Makalelerin Kavram Matrisi

Referanslar	Başlık	Atıf sayısı	Karmaşıklık T.	Direnç (resilience)	Simülasyon
(Ivanov ve Dolgui, 2020)	Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak	692	x	x	
(Ivanov, 2022)	Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives-lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic	471	x	x	
(Tukamuhabwa ve diğ., 2015)	Supply chain resilience: definition, review and theoretical foundations for further study	433	x	x	
(Blackhurst ve diğ., 2011)	An Empirically Derived Framework of Global Supply Resiliency	355	x	x	
(Treiblmaier, 2018)	The impact of the blockchain on the supply chain: a theory-based research framework and a call for action	311			
(Carter , Rogers , ve Choi, 2015)	Toward the theory of the supply chain	293			

Referanslar	Başlık	Atıf sayısı	Karmaşıklık T.	Direnç (resilience)	Simülasyon
(Mena ve diğ., 2013)	Toward a Theory of Multi-Tier Supply Chain Management	263			
(Ivanov ve Sokolov, 2013)	Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty	135			
(Day, 2014)	Fostering emergent resilience: the complex adaptive supply network of disaster relief	129	x	x	
(Ojha, Ghadge, Tiwari, ve Bitici, 2018)	Bayesian network modelling for supply chain risk propagation	127			
(Zhao ve diğ., 2019)	Modelling supply chain adaptation for disruptions: An empirically grounded complex adaptive systems approach	116	x	x	x
(Wieland ve Durach, 2021)	Two perspectives on supply chain resilience	110	x	x	
(van Weele ve van Raaij, 2014)	The future of purchasing and supply management research: About relevance and rigor	106			

İncelenen makalelerin atıf alma sayıları 0-9, 10-49, 50-99, 100-199 ve 200'den fazla şeklinde dört gruba ayrılmıştır. Tablo 3'te gruplardaki makale referansları, toplam atıf sayısı, toplam makale sayısı ve makale başına düşen atıf sayısı gösterilmiştir. Makale başlıklarına yer verilmemiş ancak makalelerin tamamı kaynakçada listelenmiştir. 0-9 grubundaki 23 makale inceleme dışında tutulmuştur. En çok atıf alan ilk 13 makale (%17) toplam atıfların %70'ini almıştır. Makalelerin

%29'u son iki sene ve %70'i son dört sene içinde yazılmıştır. Alan son derece yenidir, ilgi çekmektedir. Bu durum atıf sayılarına yansımıştır.

Tablo 3. Makalelerin Atıf Analizi

Atıf Sayısı Grubu	Referanslar	Atıf Sayısı	Makale Sayısı	Atıf/Makale Oranı	Makale yaşı (yıl)
0 - 9	(Agarwal, Mathiyazhagan, Malhotra, ve Pimpunchat, 2023; Akpınar ve Caylan, 2023; Barakat ve diğ., 2023; Chand, Kumar, Thakkar, ve Ghosh, 2022; Chen ve Wen, 2023; Choudhary, Ramkumar, Schoenherr, Rana, ve Dwivedi, 2022; Ciccullo, Pero, ve Patrucco, 2023; Colon ve Hochrainer-Stigler, 2023; Ebrahimi, Koh, Genovese, ve Kumar, 2018; Espinosa, Davis, Stock, ve Monahan, 2019; Inman ve Green Jr., 2023; Li, Alam, Bernardes, Giannoccaro, Skilton ve Rahman, 2021; Lusiantoro ve Pradiptyo, 2022; Naim ve Gosling, 2023; Ogulin, Guzman, ve Nuwangi, 2020; Pira-veenan, Senanayake, Matous, ve Todo, 2019; Sadeghi ve diğ., 2021; Swierczek, 2023a; Swierczek, 2023b; Wissuwa ve diğ., 2022; Yan ve diğ., 2022; Yaroson ve diğ., 2023; Zhang, Bhattacharyya, ve Li, 2010)	85	23	4	1,6

Atıf Sayısı Grubu	Referanslar	Atıf Sayısı	Makale Sayısı	Atıf/Makale Oranı	Makale yaşı (yıl)
10 - 49	(Adobor, 2018; Adobor, 2020; Almotairi ve Lumsden, 2009; Alexander, Blome, Schleper, ve Roscoe, 2022; Bansal, Gualandris, ve Kim, 2020; Brintrup ve Ledwoch, 2018; Choudhary ve diğ., 2021; Dittfeld, Scholten, ve Van Donk, 2018; Demirel ve diğ., 2019; Durach ve diğ., 2020; Ghadge ve diğ., 2022; Gligor, Feizabadi, Russo, Maloni, ve Goldsby, 2020; Guertler ve Spinier, 2015; Hosseini ve diğ., 2022; Kumar ve Arun, 2021; Lorentz, Kittipanya-Ngam, ve Srail, 2013; Long, 2014; Ma ve Xie, 2018; Marques, Yan, ve Matthews, 2020; Massari ve Giannoccaro, 2021; Matos, Schleper, Gold, ve Hall, 2020; Peralta ve Soltero, 2020; Pournader ve diğ., 2016; Schiffing, Hannibal, Tickle, ve Fan, 2020; Shi, Long, Li, Deng, Wei ve Liu, 2020; Son ve diğ., 2021; Touboulic, Mccarthy, ve Maithews, 2020; Wang ve Yao, 2023; Wieland, Bals, Mol, ve Handfield, 2020; Yaroson ve diğ., 2021; Zavala ve diğ., 2018)	769	31	25	3,9

Atıf Sayısı Grubu	Referanslar	Atıf Sayısı	Makale Sayısı	Atıf/Makale Oranı	Makale yaşı (yıl)
50 – 99	(Adobor ve McMullen, 2018; Alfalla-Luque, Machuca, ve Marin-Garcia, 2018; Azadegan ve Dooley, 2021; Capaldo ve Giannoccaro, 2015; Higgins, ve diğ., 2010; Koh ve diğ., 2017; Ledwoch ve diğ., 2018; Novak ve diğ., 2021; Pathak, Dills, ve Biswas, 2007; Pavlov, Ivanov, Dolgui, ve Sokolov, 2018)	647	10	65	6,7
100 - 199	(Day, 2014; Ivanov ve Sokolov, 2013; Ojha ve diğ., 2018; van Weele ve van Raaij, 2014; Wieland ve Durach, 2021; Zhao ve diğ., 2019)	723	6	121	6,5
200 +	(Blackhurst ve diğ., 2011; Carter ve diğ., 2015; Ivanov, 2022; Ivanaov ve Dolgui, 2020; Mena ve diğ., 2013; Treiblmaier, 2018; Tukamuhabwa ve diğ., 2015)	2.818	7	403	6,7
Toplam		5.042	77	65	

5. Tartışma

Tedarik zinciriyle ilgili akademik çalışmaların stratejik iş konularıyla her zaman örtüşmediği eleştirileri vardır: Akademik çalışmaların doğru işleri (effectiveness) yapmak yerine maliyet tasarrufu gibi konularla işlerin doğru yapılmasına (efficiency) odaklandığı, mevcut çalışmaların farklı bağlamlarda doğrulanması yerine yenilik uğruna tek seferlik deneysel çalışmaların çoğaldığı söylenmektedir. Ayrıca anket yönteminde yığılma olduğu, istatistik uygunluk testinin bağlamı açıklamakta yetersiz kalabildiği belirtilmektedir (van Weele ve van Raaij, 2014). Akademik çalışmaların ve programların içeriği hazırlanırken bu eleştirilerin dikkate alınmasında yarar vardır.

5.1 AS1: CAS Yaklaşımı Tedarik Zincirinde Direnç Kavramına Uygun mudur?

Tedarik zincirleri açık sistemlerdir ve çevreleriyle etkileşim halindedir. Gelen siparişler, aksayan tedarik konuları, vasıflı eleman bulma güçlüğü gibi geniş bir alanda yaşananlar sistem teorisinde sinyal (signal) olarak isimlendirilmektedir. Dirençli bir zincirin bu sinyallere göre S&OP sürecinde uyumlu tepki verebilmesi gerekir. Bu davranış kalıbı direnç kavramının hazırlık, tepki, toparlanma ve gelişme fazları boyunca CAS yapısının iletişim, esneklik, uyum ve öğrenme profiline uygundur (Adobor, 2018; Hosseini ve diğ., 2022; Rahman ve diğ., 2022; Tukamuhabwa ve diğ., 2015).

Zincirlerin gücü en zayıf halkanın gücü kadardır. Dolayısıyla zincir içindeki firmaların bireysel tepkilerinin, zincirin performansına etkisi vardır. CAS yapılı bir zincirde bağımsız etmenlerin her biri zincirdeki firmalardır. Bu firmalar zincirde kabul gören benzer kural setleriyle (schema) kendi önceliklerine uygun hareket edeceklerdir. Bu durumda CAS yapısının etkileşim boyutu sayesinde zincirdeki diğer firmalarda buna uyumlu (adaptive) tepkiler verecekleridir. Sonuçta CAS yapısının yörüngeye yakınsama (aggregation) boyutu nedeniyle zincirin tamamı değişen ortama uygun davranabilmektedir (Azadegan ve Dooley, 2021; Pournader ve diğ., 2016).

CAS nitelikleri arasında sayılan toparlanarak yörüngeye yakınsama (aggregation), doğrusal olmayış (non-linearity, schema), farklılık (diversity, adaptive) ve akışla (flow) elde edilen kapasite fazlalığı sayesinde esneklik ve direnç olumlu yönde etkilenmektedir (Hou ve diğ., 2018; Sadeghi ve diğ., 2021). Öğrenen CAS yapısı, zincirin değişen şartlara uyumunu kolaylaştırmaktadır. Mühendislik veya çevresel direnç kavramlarıyla uyumludur (Wieland ve Durach, 2021). Tek bir firmanın zincirin tamamını etkileme gücü sınırlıdır, ancak farklı firmaların kendi kurallarına (schema) göre hareketleri, zincirin performansına etki edebilmektedir (Adobor ve McMullen, 2018).

Dolayısıyla CAS yaklaşımı, tedarik zincirinde direnç kavramına uygundur.

5.2 AS2: CAS Yaklaşımı Tedarik Zinciri Modellemesine Uygun mudur?

Yön eylem modellerinin akademik derinliklerine rağmen pratik değerleri sorgulanmıştır (Koh ve diğ., 2017; Naim ve Gosling, 2023). Geleneksel mühendislik ve yön eylem modelleri tedarik zincirine teknik açıdan yaklaşırken zincirin yapısal ve ilişki tabanlı kurgusunu dikkate almamaktadır (Alexander ve diğ., 2022). Bu açığı tamamlamak üzere önce ağ (network) teorisi önerilmiştir (Bellamy ve Basole, 2013; Higgins, ve diğ., 2010; Zhao ve diğ., 2019). Ancak bu teori zincirin çevresiyle ve kendi içindeki etkileşimi, değişen şartlara uyumlanması gibi dinamik faktörler nedeniyle yetersiz kalınca CAS yaklaşımı gündeme gelmiştir (Bellamy ve Basole, 2013; Higgins, ve diğ., 2010; Hosseini ve diğ., 2022; Yan ve diğ., 2022).

Tedarik zincirlerini statik yapılar olarak gören ve değişen durumlar için tekrar optimum arayan yaklaşımlar problemlere yol açabilmektedir (Higgins, ve diğ., 2010). Tedarik zincirlerinin dinamik, çok firmalı, çok seviyeli (tier), ağ formundaki ilişkileri (Adobor, 2018), malzeme ve bilgi akışından kaynaklanan sinyallere farklı seviyelerde verebildikleri farklı şiddetteki tepkiler CAS yapısına uygundur (Adobor ve McMullen, 2018; Choudhary ve diğ., 2022; Massari ve Giannoccaro, 2021; Tukamuhabwa ve diğ., 2015).

Tedarik zincirlerinde geleneksel yaklaşımların dijital işbirliğiyle iyi sonuç verebilmesi için güvenilir ve tam veri paylaşımı gerekmektedir. Ancak zincirdeki firmaların farklı dijital veya yönetim olgunluk seviyesinde olmaları, güven sıkıntıları nedeniyle bu kalitede veriyi toplamak zordur. Bu veriyi toplamak için kurulan sistemler genellikle karmaşıklığı artırmaktadır (Duong ve Chong, 2020; Noroozi ve Wikner, 2017; Peralta ve Soltero, 2020; Tuomikangas ve Kaipia, 2014). Oysa CAS sistemlerde sinyallere verilen tepkiler söz konusudur, yoğun veri paylaşımı gerekmemektedir (Sheth ve Kusiak, 2022).

S&OP'nin iyi işletilebilmesi için "kullanım kılavuzu" gereklidir, veri ihtiyacı çok yükündür (Tuomikangas ve Kaipia, 2014). Ayrıca S&OP modelleri insan unsuru içermekte, kimi zaman planlanandan farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Bunlara ek olarak S&OP modelleri üretilen ürün ve üretim yöntemine göre özellikler arz edebilmektedir. Bu sakıncaların giderilmesinde CAS yaklaşımı önerilmiştir (Kristensen ve Jonsson, 2018).

Dolayısıyla CAS yaklaşımı, tedarik zinciri modellemesine uygundur.

5.3 AS3: Tedarik Zincirinde Direnç Konulu Literatürdeki Boşluklar Nelerdir?

Entegre planlama, darboğazlı çizelgeleme, optimizasyon ve simülasyon içeren; orta vadede tek bir firma yerine zinciri dikkate alan; rolleri ve işleyişi açıklayan tümleşik S&OP modellemesi konusu araştırmaya açıktır (Kristensen ve Jonsson, 2018; Pereria ve diğ., 2020; Rahman ve diğ., 2022). Bu konu belirsizlik altında incelenmelidir (Noroozi ve Wikner, 2017). Bu konuya finansal entegrasyon ve S&OP'nin firma performansına etkisini gösteren uygun ölçüm metrikleri araştırmaları da eklenebilir (Hosseini ve diğ., 2022; Shi, ve diğ., 2020; Thome ve diğ., 2012; Tuomikangas ve Kaipia, 2014). Bir diğer çalışmada S&OP yerine, tümleşik lojistik model araştırılması önerilmiştir (Naim ve Gosling, 2023).

Tedarik zincirindeki firmaların davranış kurallarını gözетerek çevresiyle etkileşimi olan, çok ürünlü ve bütüncül bir zincir için etmen tabanlıya (agent based) ek olarak, ayrık olay (discrete event) veya sistem dinamikleri (system dynamics) yaklaşımlarını içeren simülasyonlu modelleme araştırmaları beklenmektedir (Ledwoch ve diğ., 2018; Massari ve Giannoccaro, 2021; Naim ve Gosling, 2023; Novak ve diğ., 2021; Rahman ve diğ., 2022; Tuomikangas ve Kaipia, 2014). Teda-

rik zincirinin zaman içinde çevresine uyum sağlayarak, “öğrenmesini” dikkate alan çalışmalara ihtiyaç vardır (Adobor, 2020).

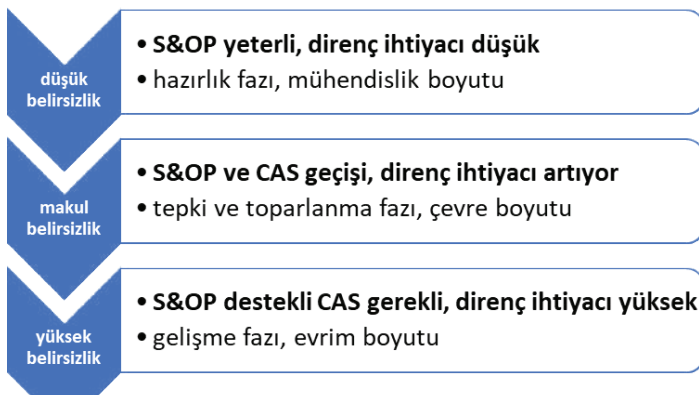
Tahmine dayalı planlama yerine, tahmin ve işbirliğine dayalı tamamlama planlaması üzerinde çalışılması önerilmektedir. Değişen şartlara göre şekillenen uygulama, sabit veya sık güncellenen planlamadan daha etkindir (Noroozi ve Wikner, 2017; Tang, 2006; Thome ve diğ., 2012;).

Önerilen araştırma konuları arasında direnç ile sürdürülebilirlik ilişkisinin incelenmesi ve direnç ile verim arasındaki çatışmanın çözümü için modeller geliştirilmesi sayılmıştır (Adobor, 2020; Higgins, ve diğ., 2010; Novak ve diğ., 2021). Bu konu direncin nasıl sağlanacağı ve kaos bölgesindeki doğru yönetim modeli konularını içerecek şekilde genişletilebilir (Naim ve Gosling, 2023). Bu kavramın CAS yaklaşımıyla incelenmesi beklenmektedir (Adobor ve McMullen, 2018).

Araştırma konusu olarak tedarik zincirlerinde saha çalışmasıyla vaka analizi yapılarak CAS yaklaşımıyla yorumlanması önerilmiştir (Kumar ve Arun, 2021). Benzer şekilde tedarik zincirlerindeki ilişkilerin, öğrenme becerisinin, hayat döngüsünün (product life cycle) ve daha uzun vadeli görünürlük sağlamanın zincir performansına etkisi incelenebilir (Carter, ve diğ., 2015).

Dirençle ilişkili stratejilerde esneklik (flexibility), bolluk (redundancy), işbirliği (collaboration) ve çeviklik (agility) dışında seçenekler; direnç (resiliency) ve sağlamlık (robustness) ilişkisi; yapısal ve operasyonel risklerin etkileri araştırılmaktadır. Benzer araştırmaların gelişmekte olan ülkelerde, KOBİ (Küçük ve Orta Boy İşletmeler) seviyesinde yapılması önerilmiştir (Tukamuhabwa ve diğ., 2015).

Şekil 5’te direnç, S&OP ve CAS kavramlarının etkileşimi gösterilmiştir. Belirsizlik artarken CAS ve direnç kavramlarına olan ihtiyaç artmaktadır.



Şekil 5. Artan Belirsizlik ve S&OP – CAS – Direnç İlişkisi

6. Sonuç ve Öneriler

Küreselleşmeyle birlikte karmaşıklaşan ürün ve üretim yapıları tedarik zinciri algısını değiştirmektedir. Tedarik Zinciri önce doğrusaldan ağ formuna evrilmiş, sonra çevresiyle etkileşimi nedeniyle direnç kavramını içermiş, en sonunda zamanla çevreye uyum gösterdiği dikkate alınarak adaptif hale gelmiştir. Bu yapıyla tedarik zincirlerinin alışılmış doğrusal yöntemlerle açıklanması güçleşmiştir. Kökeni geçmişe ve büyük ölçüde biyoloji-çevre bilimlerine dayanan sistem teorisi-CAS yaklaşımı yakın zamanda tedarik zinciri konusuna uyarlanmaya başlamıştır (Holland, 2012).

2018 sonrasında bu konuya akademik ilgi hızla artmıştır. Yapının karmaşıklığı ve insan faktörünün etkisi nedeniyle, analitik yöntem olarak etmen tabanlı ve sistem dinamikleri içeren simülasyon modelleri önerilmiştir. Bilinen simülasyon yazılımları genellikle tek tip (ayrık olay, etmen tabanlı veya sistem dinamikleri) simülasyona uygun olmakla birlikte, tüm tipleri destekleyen yazılımlar görülme-ye başlamıştır (örnek: AnyLogic).

Değişen çevrenin etkilerini sadece “tedarik zinciri kırılmaları” olarak görmek yerine, aynı zamanda bir fırsat içerdiğini düşünmek daha yapıcı bir görüştür. Literatürde riskten kaçınmak üzere sağlamlık (robustness) ve risk gerçekleştiğinde uygun tepkiyi verebilmek üzere direnç (resiliency) arasında bir ödünleşme (trade-off) görülmektedir. Dolayısıyla firmalar, kendi iş ortamlarına uygun yaklaşımları geliştirmelidir.

Tedarik zinciri yönetimi alanında güncel bilimsel eğilimleri metodik tarzda derleyen bu çalışmanın, konuyla ilgilenen araştırmacılara yardımcı olması ve karmaşıklık, direnç ve simülasyon konularının ilgili fakültelerin programlarında müfredata eklenmesi beklenmektedir.

Çıkar Çatışması:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Yazarların Katkısı:

Yazarlar araştırmanın ve raporlamanın tüm aşamalarında “araştırma ve yayın etiğine uygun olarak” birlikte çalışmıştır.

Kaynakça

Adobor, H. (2018). Supply chain resilience: a multi-level framework. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 22 (6), pp. 533-556. <https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1551483>

Adobor, H. (2020). Supply chain resilience: an adaptive cycle approach. *The Inter-*

- national Journal of Logistics Management*, 31(3), pp. 443-463. <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2020-0019>
- Adobor, H., & McMullen, R. (2018). Supply chain resilience: a dynamic and multi-dimensional approach. *The International Journal of Logistics Management*, 29 (4), s. 1451-1471. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2017-0093>
- Agarwal, V., Mathiyazhagan, K., Malhotra, S., & Pimpunchat, B. (2023). Building resilience for sustainability of MSMEs post COVID-19 outbreak: An Indian handicraft industry outlook. *Socio-Economic Planning Sciences*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101443>
- Akpınar, H., & Caylan, D. (2023). Modeling organizational resilience in maritime business: an ISM and MICMAC approach. *Business Process Management Journal*, 29 (3), pp. 597-629. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-05-2022-0224>
- Alexander, A., Blome, C., Schleper, M., & Roscoe, S. (2022). "Managing the "new normal": the future of operations and supply chain management in unprecedented times". *International Journal of Operations & Production Management*, 42 (8), pp. 1061-1076. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-06-2022-0367>
- Alfalla-Luque, R., Machuca, J., & Marin-Garcia, J. (2018). Triple-A and competitive advantage in supply chains: Empirical research in developed countries. *International Journal of Production Economics*, 203, pp. 48-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.05.020>
- Almotairi, B., & Lumsden, K. (2009). Port logistics platform integration in supply chain management. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 1 (2), pp. 194-210. <https://doi.org/10.1504/IJSTL.2009.024495>
- Azadegan, A., & Dooley, K. (2021). A Typology of Supply Network Resilience Strategies: Complex Collaborations in a Complex World. *Journal of Supply Chain Management*, 57 (1), pp. 17-26. <https://doi.org/10.1111/jscm.12256>
- Bansal, P., Gualandris, J., & Kim, N. (2020). Theorizing Supply Chains with Qualitative Big Data and Topic Modeling. *Journal of Supply Chain Management*, 56 (2), pp. 7-18. <https://doi.org/10.1111/jscm.12224>
- Barakat, M., Tipi, N., & Wu, J. (2023). Sustainable supply chain clusters: an integrated framework. *Management Decision*, 61 (3), pp. 786-814. <https://doi.org/10.1108/MD-03-2021-0400>
- Bellamy, M. A., & Basole, R. C. (2013). Network Analysis of Supply Chain Systems: A Systematic Review and Future Research. *Systems Engineering*, 16 (2), pp. 235-249.
- Blackhurst, J., Dunn, K., & Craighead, C. (2011). An Empirically Derived Framework of Global Supply Resiliency. *Journal of Business Logistics*, 32 (4), pp. 374-391.

- Brintrup, A., & Ledwoch, A. (2018). Supply network science: Emergence of a new perspective on a classical field. *CHAOS*, 28 (3). <https://doi.org/10.1063/1.5010766>
- Capaldo, A., & Giannoccaro, I. (2015). How does trust affect performance in the supply chain? The moderating role of interdependence. *International Journal of Production Economics*, 166, pp. 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.04.008>
- Carter, C., Rogers, D., & Choi, T. (2015). Toward the theory of the supply chain. *Journal of Supply Chain Management*, 51 (2), pp. 89-97. <https://doi.org/10.1111/jscm.12073>
- Chand, P., Kumar, A., Thakkar, J., & Ghosh, K. (2022). Direct and mediation effect of supply chain complexity drivers on supply chain performance: an empirical evidence of organizational complexity theory. *International Journal of Operations & Production Management*, 42 (6), pp. 797-825. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-11-2021-0681>
- Chen, J., & Wen, H. (2023). The application of complex network theory for resilience improvement of knowledge-intensive supply chains. *Operations Management Research*. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00365-0>
- Choudhary, N., Kim, S., & Ramkumar, M. (2022). Effects of supply chain disruptions due to COVID-19 on shareholder value. *International Journal of Operations & Production Management*, 42 (13), pp. 482-505. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2022-0173>
- Choudhary, N., Ramkumar, M., Schoenherr, T., & Rana, N. (2021). Assessing Supply Chain Resilience During the Pandemic Using Network Analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3124027>
- Choudhary, N., Ramkumar, M., Schoenherr, T., Rana, N. P., & Dwivedi, Y. K. (2022). Does Reshoring Affect the Resilience and Sustainability of Supply Chain Networks- The Cases of Apple and Jaguar Land Rover. *British Journal of Management*, 0, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.12614>
- Ciccullo, F., Pero, M., & Patrucco, A. (2023). Designing circular supply chains in start-up companies: evidence from Italian fashion and construction start-ups. *International Journal of Logistics Management*, 34 (3), pp. 553-581. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2022-0158>
- Colon, C., & Hochrainer-Stigler, S. (2023). Systemic risks in supply chains: a need for system-level governance. *Supply Chain Management: An International Journal*, 28 (4), pp. 682-694. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2022-0101>

- Cooper, H. (1988). Organizing knowledge syntheses: a taxonomy of literature reviews. *Knowledge in Society*, 1(1), pp. 104-126.
- Day, J. (2014). Fostering emergent resilience: the complex adaptive supply network of disaster relief. *International Journal of Production Research*, 52 (7), pp. 1970-1988. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.787496>
- Demirel, G., MacCarthy, B., Ritterskamp, D., & Champneys, A. (2019). Identifying dynamical instabilities in supply networks using generalized modeling. *Journal of Operations Management*, 65 (2), pp. 136-159. <https://doi.org/10.1002/joom.1005>
- Dittfeld, H., Scholten, K., & Van Donk, D. (2018). Burden or blessing in disguise: interactions in supply chain complexity. *International Journal of Operations & Production Management*, 38 (2), pp. 314-332. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2017-0158>
- Duong, L. N., & Chong, J. (2020). Supply chain collaboration in the presence of disruptions: a literature review. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1712491>
- Durach, C., Wiengarten, F., & Choi, T. (2020). Supplier-supplier coopetition and supply chain disruption: first-tier supplier resilience in the tetradic context. *International Journal of Operations & Production Management*, 40 (7/8), pp. 1041-1065. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2019-0224>
- Ebrahimi, S., Koh, S., Genovese, A., & Kumar, N. (2018). Structure-integration relationships in oil and gas supply chains. *International Journal of Operations & Production Management*, 38 (2), pp. 424-445. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2016-0089>
- Espinosa, J., Davis, D., Stock, J., & Monahan, L. (2019). Exploring the processing of product returns from a complex adaptive system perspective. *International Journal of Logistics Management*, 30 (3), pp. 699-722. <https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2018-0216>
- Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D., & Chaudhuri, A. (2022). Visualisation of ripple effect in supply chains under long-term, simultaneous disruptions- a system dynamics approach. *International Journal of Production Research*, 60 (20), pp. 6173-6186. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987547>
- Gligor, D., Feizabadi, J., Russo, I., Maloni, M., & Goldsby, T. (2020). The triple-a supply chain and strategic resources: developing competitive advantage. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 50 (2), pp. 159-190. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-08-2019-0258>
- Guertler, B., & Spinier, S. (2015). When does operational risk cause supply chain

- enterprises to tip? A simulation of intra-organizational dynamics. *OMEGA-International Journal of Management Science*, 57, pp. 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.03.005>
- Higgins, A., Miller, C., Archer, A., Ton, T., Fletcher, C., & McAllister, R. (2010). Challenges of operations research practice in agricultural value chains. *Journal of the Operational Research Society*, 61 (6), pp. 964-973. <https://doi.org/10.1057/jors.2009.57>
- Holland, J. H. (2012). *Signals & Boundaries: Building Blocks For Complex Adaptive Systems*. Londra: The MIT Press.
- Hosseini, S., Ivanov, D., & Blackhurst, J. (2022). Conceptualization and Measurement of Supply Chain Resilience in an Open-System Context. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69 (6), pp. 3111-3126. <https://doi.org/10.1109/TEM.2020.3026465>
- Hou, Y., Wang, X., Wu, Y., & He, P. (2018). How does the trust affect the topology of supply chain network and its resilience? An agent-based approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116, pp. 229-241. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.07.001>
- Inman, R., & Green Jr, K. (2023). Supply Chain Complexity and Traceability in Adverse Events Revisited: A COVID-19 Perspective. *IEEE Transactions on Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3274039>
- Ivanaov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research*, 58 (10), pp. 2904-2915. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727>
- Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives - lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 319 (2022), pp. 1411-1431. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-6>
- Ivanov, D., & Sokolov, B. (2013). Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 224 (2013), pp. 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.021>
- Koh, S., Gunasekaran, A., Morris, J., Obayi, R., & Ebrahimi, S. (2017). Conceptualizing a circular framework of supply chain resource sustainability. *International Journal of Operations & Production Management*, 37 (10), pp. 1520-1540. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2016-0078>
- Kristensen, J., & Jonsson, P. (2018). Context-based sales and operations planning

- (S&OP) research A literature review and future agenda. *Industrial Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48 (1), pp. 19-46. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM.11.2017.0352>
- Kumar, B., & Arun, S. (2021). Managing the supply chain during disruptions: Developing a framework for decision-making. *Industrial Marketing Management*, 97 (2021), pp. 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.07.007>
- Ledwoch, A., Yaşarcan, H., & Brintrup, A. (2018). The moderating impact of supply network topology on the effectiveness of risk management. *International Journal of Production Economics*, 197 (2018), pp. 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.12.013>
- Li, M., Alam, Z., Bernardes, E., Giannoccaro, I., Skilton, P., & Rahman, M. (2021). Out of Sight, out of Mind? Modeling the Impacts of Financial Squeeze on Extended Supply Chain Networks. *Journal of Business Logistics*, 42 (2), pp. 233-263. <https://doi.org/10.1111/jbl.12265>
- Long, Q. (2014). Distributed supply chain network modelling and simulation: integration of agent-based distributed simulation and improved SCOR model. *International Journal of Production Research*, 52 (23), pp. 6899-6917. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.910623>
- Lorentz, H., Kittipanya-Ngam, P., & Srai, J. S. (2013). Emerging market characteristics and supply network adjustments in internationalising food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 145 (1), pp. 220-232. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.038>
- Lusiantoro, L., & Pradipto, R. (2022). Rebuilding disrupted supply chains: How can a self-organised social group facilitate supply chain resilience? *International Journal of Operations & Production Management*, 42 (10), pp. 1544-1575. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2021-0555>
- Ma, J., & Xie, L. (2018). The impact of loss sensitivity on a mobile phone supply chain system stability based on the chaos theory. *Communications In Non-linear Science and Numerical Simulation*, 55, pp. 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.06.030>
- Marques, L., Yan, T., & Matthews, L. (2020). Knowledge Diffusion in a Global Supply Network: A Network of Practice View. *Journal of Supply Chain Management*, 56 (1), pp. 33-53. <https://doi.org/10.1111/jscm.12214>
- Massari, G., & Giannoccaro, I. (2021). Investigating the effect of horizontal competition on supply chain resilience in complex and turbulent environments. *International Journal of Production Economics*, 237 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108150>

- Matos, S., Schleper, M., Gold, S., & Hall, J. (2020). The hidden side of sustainable operations and supply chain management: unanticipated outcomes, trade-offs and tensions. *International Journal of Operations & Production Management*, 40 (12), pp. 1749-1770. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-12-2020-833>
- Mena, C., Humphries, A., & Choi, T. (2013). Toward a Theory of Multi-Tier Supply Chain Management. *Journal of Supply Chain Management*, 49 (2), pp. 58-77. <https://doi.org/10.1111/jscm.12003>
- Naim, M., & Gosling, J. (2023). Revisiting the whole systems approach: designing supply chains in a turbulent world. *The International Journal of Logistics Management*, 34 (1), pp. 5-33. <https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2021-0121>
- Noroozi, S., & Wikner, J. (2017). Sales and operations planning in the process industry: A literature review. *International Journal of Production Economics*, 188 (2017), pp. 139-155. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.006>
- Novak, D., Wu, Z., & Dooley, K. (2021). Whose resilience matters? Addressing issues of scale in supply chain resilience. *Journal of Business Logistics*, 42 (3), pp. 323-335. <https://doi.org/10.1111/jbl.12270>
- Ogulin, R., Guzman, G., & Nuwangi, S. (2020). Knowledge capabilities in supply chain networks: a taxonomy. *Journal of Knowledge Management*, 24 (3), pp. 655-674. <https://doi.org/10.1108/JKM-06-2019-0266>
- Ojha, R., Ghadge, A., Tiwari, M., & Bitici, Ü. (2018). Bayesian network modelling for supply chain risk propagation. *International Journal of Production Research*, 56 (17), pp. 5795-5819. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1467059>
- Pathak, S., Dills, D., & Biswas, G. (2007). On the evolutionary dynamics of supply network topologies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54 (4), pp. 662-672. <https://doi.org/10.1109/TEM.2007.906856>
- Pavlov, A., Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2018). Hybrid fuzzy-probabilistic approach to supply chain resilience assessment. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 65 (2), pp. 303-315. <https://doi.org/10.1109/TEM.2017.2773574>
- Peralta, M., & Soltero, V. (2020). Analysis of fractal manufacturing systems framework towards industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 57, pp. 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.004>
- Pereria, D., Oliveir, J., & Carravilla, M. (2020). Tactical sales and operations planning: A holistic framework and a literature review of decision -making mo-

- dels. *International Journal of Production Economics*, 228 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107695>
- Piraveenan, M., Senanayake, U., Matous, P., & Todo, Y. (2019). Assortativity and mixing patterns in international supply chain networks. *CHAOS*, 29 (2). <https://doi.org/10.1063/1.5082015>
- Pournader, M., Rotaru, A., Kach, A., & Razavi Hajiagha, S. (2016). An analytical model for system-wide and tier-specific assessment of resilience to supply chain risks. *Supply Chain Management*, 21 (5), pp. 589-609. <https://doi.org/10.1108/SCM-11-2015-0430>
- Rahman, T., Paul, S. K., Shukla, N., & Agarwal, R. (2022). Supply chain resilience initiatives and strategies: A systematic review. *Computers & Industrial Engineering*, 170 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108317>
- Sadeghi, J., Struckell, E., Ojha, D., & Nowicki, D. (2021). Absorptive capacity and disaster immunity: the mediating role of information quality and change management capability. *Journal of Knowledge Management*, 25 (4), pp. 714-742. <https://doi.org/10.1108/JKM-06-2020-0404>
- Schiffing, S., Hannibal, C., Tickle, M., & Fan, Y. (2020). The implications of complexity for humanitarian logistics: a complex adaptive systems perspective. *Annals of Operations Research*. doi:10.1007/s10479-020-03658-w
- Sheth, A., & Kusiak, A. (2022). Resiliency of Smart Manufacturing Enterprises via Information Integration. *Journal of Industrial Information Integration*, 28 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100370>
- Shi, X.-q., Long, W., Li, Y.-y., Deng, D.-s., Wei, Y.-l., & Liu, H.-g. (2020). Research on supply network resilience considering random and targeted disruptions simultaneously. *International Journal of Production Research*, 58 (21), pp. 6670-6688. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1685697>
- Son, B.-G., Chae, S., & Kocabaşoğlu-Hillmer, C. (2021). Catastrophic supply chain disruptions and supply network changes: a study of the 2011 Japanese earthquake. *International Journal of Operations & Production Management*, 41 (6), pp. 781-804. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-09-2020-0614>
- Swierczek, A. (2023a). Decentralization of information and supply chain self-organization: the resulting effect on network performance in the transitive service triads. *Supply Chain Management- An International Journal*, 28 (3), pp. 425-449. <https://doi.org/10.1108/SCM-05-2021-0266>
- Swierczek, A. (2023b). The effects of industry 4.0 technologies on relational performance: the mediating role of supply chain emergence in the transitive logistics service triads. *Supply Chain Management-An International Journal*, 28 (2), pp. 363-384. <https://doi.org/10.1108/SCM-07-2021-0347>

- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103 (2006), pp. 451-488. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>
- Thomé, A. M., Scavarda, L. F., & Scavarda, A. J. (2016). Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>
- Thome, A. M., Scavarda, L. F., Fernandez, N. S., & Scavarda, A. J. (2012). Sales and operations planning: A research synthesis. *International Journal of Production Economics*, 138 (2012), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.11.027>
- Touboulic, A., Mccarthy, L., & Maithews, L. (2020). Re-imagining supply chain challenges through critical engaged research. *Journal of Supply Chain Management*, 56 (2), pp. 36-51. <https://doi.org/10.1111/jscm.12226>
- Treiblmaier, H. (2018). The impact of the blockchain on the supply chain: a theory-based research framework and a call for action. *Supply Chain Management-An International Journal*, 23 (6), pp. 545-559. <https://doi.org/10.1108/SCM-01-2018-0029>
- Tukamuhabwa, B., Stevenson, M., Busby, J., & Zorzini, M. (2015). Supply chain resilience: definition, review and theoretical foundations for further study. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1037934>
- Tuomikangas, N., & Kaipia, R. (2014). A coordination framework for sales and operations planning (S&OP): Synthesis from the literature. *International Journal of Production Economics*, 154 (2014), s. 243-262. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.04.026>
- van Weele, A., & van Raaij, E. (2014). The Future of Purchasing and Supply Management Research: About Relevance and Rigor. *Journal of Supply Chain Management*, 50 (1), pp. 56-72. <https://doi.org/10.1111/jscm.12042>
- vom Brocke, J., Simons, A., Björn, N., Riemer, K., Plattfaut, R., & Cleven, A. (2009). Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process. Retrieved from <http://www.alexandria.unisg.ch/Publikationen/67910>
- Wang, M., & Yao, J. (2023). Intertwined supply network design under facility and transportation disruption from the viability perspective. *International Journal of Production Research*, 61 (8), pp. 2513-2543. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1930237>
- Webster, J., & Watson, R. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. *MIS Quarterly*, 26 (2), pp. 13-23.

- Wieland, A., & Durach, C. (2021). Two perspectives on supply chain resilience. *Journal of Business Logistics*, 42 (3), pp. 315-322. <https://doi.org/10.1111/jbl.12271>
- Wieland, A., Bals, L., Mol, M., & Handfield, R. (2020). Overcoming blind spots in global sourcing research: Exploiting the cross-sections between supply chain management and international business. *Journal of International Management*, 26 (1). <https://doi.org/10.1016/j.intman.2019.100709>
- Wissuwa, F., Durach, C., & Choi, T. (2022). Selecting resilient suppliers: Supplier complexity and buyer disruption. *International Journal of Production Economics*, 253 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108601>
- Yan, F., Yin, S., Chen, L., & Jia, F. (2022). Complexity in a platform-based servitization: a complex adaptability theory perspective. *International Journal of Logistics Research and Applications*. <https://doi.org/10.1080/13675567.2022.2112159>
- Yarosan, E., Breen, L., Hou, J., & Sowter, J. (2023). The role of power-based behaviours on pharmaceutical supply chain resilience. *Supply Chain Management*, 28 (4), pp. 738-759. <https://doi.org/10.1108/SCM-08-2021-0369>
- Yarosan, E., Breen, L., Hou, J., & Sowter, J. (2021). Advancing the understanding of pharmaceutical supply chain resilience using complex adaptive system (CAS) theory. *Supply Chain Management*, 26 (3), pp. 323-340. <https://doi.org/10.1108/SCM-05-2019-0184>
- Zavala, A., Nowicki, D., & Ramirez-Marquez, J. (2018). Quantitative metrics to analyze supply chain resilience and associated costs. *Institution of Mechanical Engineers*, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1177/1748006X18766738>
- Zhang, Y., Bhattacharyya, S., & Li, X. (2010). From choice of procurement strategy to supply network configuration: An evolutionary approach. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 9 (1), pp. 145-173. <https://doi.org/10.1142/S0219622010003671>
- Zhao, K., Zuo, Z., & Blackhurst, J. (2019). Modelling supply chain adaptation for disruptions: An empirically grounded complex adaptive systems approach. *Journal of Operations Management*, 65 (2), pp. 190-212. <https://doi.org/10.1002/joom.1009>



PLOUGHSHARES MATERIAL SELECTION: SHANNON'S ENTROPY BASED FUZZY TOPSIS APPLICATION

Ahmet Bilal ŞENGÜL^{1*}

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Çanakkale

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1939-0550>

Keywords

Fuzzy TOPSIS,
ploughshares material,
material selection

Abstract

Material selection in the engineering design process is a challenging process because there are many materials and many contradictory features that must be together. The plough is the most important and basic tool of tillage. Large abrasions, cracks, and even sudden breaks can occur in the plough that cultivates the soil. For this reason, the material chosen to produce the ploughshares is extremely important. In this study, first of all, the criteria that are important in the selection of ploughshares iron were determined, and the criteria were weighted with the Interval Shannon Entropy method. Material preference ranking was made using "the Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution" (FTOPSIS) technique. According to the study results, the order of the ploughshare's material selection criteria is, respectively, hardness, wear percentage, toughness, tensile stress, thermal conductivity, and cost. As a result of the selection made using the FTOPSIS method; It has been determined that 33MnCrB5(1.7185) should be preferred in the first place among the candidate materials, and then the order of preference should be 51CrV4(1.8159), 60SiMn5(SAE9262), 41CrMo4 (1.7225QT-4140), respectively. To measure the sensitivity of the results, sensitivity analysis was conducted at $\alpha=0.1, 0.5, \text{ and } 0.9$ levels.

* absengul@yahoo.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1346068

PULLUK UÇ DEMİRİ MALZEME SEÇİMİ: SHANNON ENTROPİ TEMELLİ BULANIK TOPSIS UYGULAMASI

Anahtar kelimeler

Öz

Bulanık TOPSIS, pulluk ucu malzemesi, malzeme seçimi

Mühendislik tasarım sürecinde malzeme seçimi, çok sayıda malzeme olması ve birbirine zıt bir çok özelliğin bir arada olmasının gerekliliğinden zorlayıcı bir süreçtir. Pulluk, toprak işleminin en önemli ve temel aracıdır. Toprağı işleyen pullukta büyük aşınmalar çatlaklar ve hatta ani kırılmalar oluşabilmektedir. Bu nedenle pulluk uç demiri üretimi için seçilen malzeme son derecede önemlidir. Bu çalışma da, öncelikle pulluk uç demiri seçiminde önemli olan kriterler belirlenmiş, kriterler Interval Shannon Entropi yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Bulanık İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıra Tercih (FTOPSIS) tekniği kullanılarak malzeme tercih sıralaması yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, uç demiri malzeme seçim kriterleri sıralaması, sırasıyla; sertlik, aşınma dayanımı, tokluk, çeki gerilmesi, termal iletkenlik ve maliyet olarak tespit edilmiştir. FTOPSIS yöntemi kullanılarak yapılan seçim neticesinde; aday malzemelerden ilk sırada 33MnCrB5(1.7185)'nin tercih edilmesi gerektiği, ve daha sonrasında tercih sırasının, sırasıyla 51CrV4(1.8159), 60SiMn5(SAE9262), 41CrMo4 (1.7225QT-4140) olması gerektiği tespit edilmiştir. Sonuçların duyarlılığını ölçmek için, $\alpha=0.1,0.5$ ve 0.9 düzeylerinde duyarlılık analizi yapılmıştır.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 19.08.2023

Submission Date : 19.08.2023

Kabul Tarihi : 22.01.2024

Accepted Date : 22.01.2024

1. Introduction

Material plays an important role in engineering designs. When designing any product, it is necessary to select materials with specific properties that meet all current constraints and can guarantee optimum system performance (Sarfaraz Khabbaz, Dehghan Manshadi, Abedian, & Mahmudi, 2009). Material selection can be defined as the selection of the most suitable material among the materials to be used for the product while designing the product (Mamoon, Alhaji, & Abdullahi, 2021). It is not easy to choose materials suitable for product design. Ashby reported that there are over 160,000 materials of choice for engineers (Ashby, 2010). Materials can be selected, and many criteria affect the selection. Some of the criteria one may encounter in the material selection are hardness, high-temperature strength, low-temperature strength, stiffness, density, tensile strength, electrical conductivity, thermal conductivity, formability, weldability, cost, appearance, etc. (Hatamura, 1999). When the methods developed for material selection are examined, it is seen that they are grouped under two headings. The developed methods are elimination methods and selection methods. In the sieving methods, the unsuitable materials are eliminated step by step and the appropriate material is selected. Some of these methods are chart method (Ashby), survey method, and unit cost method. In the selection methods, the most suitable material is selected by listing the suitable materials under certain criteria (Balci, 2004; Mamoon et al., 2021). The methods suitable for these methods are TOPSIS, MORPA, PROMETHEE, etc., which are under multi-criteria decision-making methods, are methods.

Some of the studies carried out by using the elimination and selection methods in material selection are as follows; Emovon and Oghenenyero (2020), by scanning the literature for the period 1994-2019, examined 55 articles using Multi-Criteria Decision methods in material selection. As a result of the study, they stated that the cost criterion is the most frequently used criterion to decide on material selection and that MCDM methods offer a suitable methodology for solving material selection problems (Emovon and Oghenenyero, 2020). Patnaik, Swain, Mishra, Puroit, & Biswas (2020) in their study, used MCDM methods for selecting the best alternative polymer composite material for engineering applications (Patnaik et al., 2020). Mamoon et al. (2021), compared the methods used in the literature to solve material selection problems and summarized the studies in the literature by classifying their methods as screening and ranking (Mamoon et al., 2021). Das and Sarkar (2021), developed a new multi-criteria decision-making model based on value constraints for the selection and ranking of materials. They tested the proposed method on four samples: material selection for the hip joint, fuel cell, high-temperature product, and a sailboat mast (Das and Sarkar, 2021). Chatterjee and Chakraborty (2021) used MCDM methods for

the gear material selection problem (Chatterjee and Chakraborty, 2021). Zoghi, Rostami, Khoshand, & Motaleb (2022) used MCDM methods to design select materials that enable recyclability and reusability of building components (Zoghi et al., 2022). Aires and Ferreira (2022) proposed a new MCDM method for sustainable material selection problems (Aires and Ferreira, 2022). Ordu and Der (2023) used MCDM methods to evaluate suitable polymeric materials for the fabrication of flexible vibrating heat pipes (Ordu and Der, 2023). Zakeri, Chatterjee, Konstantas, & Ecer (2023) proposed a new decision making method called Simple Ranking Process (SRP) to solve the material selection problem and stated that it is a suitable methodology for solving challenging MCDM problems (Zakeri et al., 2023). Remadi and Frikha (2023) used MCDM methods for green material selection under uncertainty (Remadi and Frikha, 2023). Martínez-Gómez and Eduardo (2023) used multi-criteria selection procedures for the selection of an alternative composite material for the high voltage circuit of gasoline internal combustion engines (Martínez-Gómez and Eduardo, 2023). Gaalice and Abdelrhman (2024) used the FAHP-FTOPSIS technique to select appropriate bearing ring materials for pharmaceutical applications. They compared 5 candidate materials under thirteen criteria (Gaalice and Abdelrhman, 2024). Raju, Palli, Prasad, Menda, & Ramakrishna (2024) used MCDM for the selection of natural fiber composites instead of synthetic fiber composites used as materials in the fields of aviation, transportation, architecture, and sports. They compared 7 composite materials under the criteria of density, hardness, tensile strength, and toughness, as well as water absorption and specific heat capacity (Raju et al., 2024).

When the literature review is examined, it is seen that MCDM methods are widely used in material selection problems. In this study, the material selection was made for the ploughshares. The plough is the most important and basic tool of tillage. Large abrasions, cracks (Gürsel and Köftcioğlu, 2006), and even sudden breaks can occur in the plough that cultivates the soil. For this reason, the material chosen for plough production is extremely important. The ploughshares are the plough element that takes the first abrasive effect and impacts the plough. Some of the studies on the selection of ploughshares material are as follows.

Bayhan (1996), in his study, investigated the wear behavior of soil tillage tools. He found significant correlations between the amount of wear and hardness in the ploughshares and established regression models for them. In addition, it has been determined that the carbon and manganese content of the material affects the wear behavior (Bayhan, 1996). Er (2003) investigated the wear behavior by coating boron on ploughshares made of six different materials (Er, 2003). Çakır (2019) investigated the wear behavior of four different materials by applying various heat treatment and surface treatments to be used in the production of ploughshares iron (Çakır, 2019). Kalácska, De Baets, Fauconnier, Schramm, Frerichs, & Sukumaran (2020) performed wear experiments on the wear of cultivator ti-

nes made of 27MnB5 steel to investigate the change in mass, size, hardness, and microstructure. They developed a model by conducting field studies (Kalácska et al., 2020). Singh, Chatha, & Sidhu (2020) used hard facing to increase the wear percentage of the ploughshare. They determined that the wear percentage is effective in the hardness of the material, as well as in its microstructure and chemical composition (Singh et al., 2020). Singh, Chatha, & Sidhu (2021), ploughshares material; They investigated the wear behavior by coating two different Fe-based claddings on the base material made of EN-42 steel to be tested at two different soil moisture levels (Singh et al., 2021). Boydaş (2023) investigated the effect of different ploughshares geometries on the pulling force of the machine in defining the soil-machine relationship using computer simulation (Boydaş, 2023).

As can be seen from the literature review, many types of materials are used, and different surface treatments are applied in the production of the ploughshares. Determining the right material and surface treatment is an exceedingly difficult decision problem. It is of significant importance to know which criteria should be considered and the relative importance of the criteria while choosing the ploughshares material. In the literature, there is no study on which criteria should be considered in the material selection for the ploughshares. In addition, there was no study using MCDM methods in the selection of ploughshares material. In this study, first, the criteria that are important in the selection of the ploughshare's material were determined by considering the expert opinion and the literature, and the order of importance of the criteria was determined by the Interval Shannon Entropy method. Then, 33MnCrB5(1.7185), 60SiMn5(SAE9262), 51CrV4(1.8159), 41CrMo4 (1.7225QT-4140) steels, which can be used as ploughshares material, were taken as material alternatives and a preference order was made. Since expert opinion was taken while evaluating the criteria and most of the alternatives contain interval data, fuzzy numbers were used to solve the problem. "The Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution" (FTOPSIS) technique was used to determine the order of preference of ploughshares materials. Sensitivity analyses were performed at $\alpha = 0.1, 0.5$ and 0.9 levels.

Determining the correct material and surface treatment is a difficult decision problem. No study has been found that evaluates more than one material together in terms of multiple material properties and mechanical behaviors. In the study, it was investigated which criterion was how important among the criteria, taking into account the cost criteria, as well as other criteria, in the selection of plow tip material. In addition, evaluating many materials at the same time and selecting the most suitable plow tip material is the contribution of this study to the literature. Multi-criteria decision-making methods have been successfully applied to material selection problems in the literature. To measure the sensitivity of the results obtained, calculations were made at three alpha cut-off levels,

$\alpha = 0.1, 0.5, \text{ and } 0.9.$

In the next parts of the study, the criteria, and alternatives for the selection of ploughshares material are defined, then the steps of the methods used for material selection are explained and the analysis results are discussed, and the conclusion part is concluded.

2. Determination of Criteria and Alternatives For Material Selection of The Ploughshares

Tillage is the process of physically improving the soil to make it suitable for growing plants (Singh et al., 2020). Parts that contact the soil during processing are subject to strong abrasive wear (Kalácska et al., 2020). Wear tillage tools is a very important problem for farmers all over the world. At this point, the end iron comes to the forefront as the element that meets these effects in the first degree. The ploughshares, which are subject to severe wear, are also at risk of breakage. If the ploughshares are short life, it will waste precious time in the crop season, as well as the cost of replacing the ploughshares. To extend the service life of the ploughshares as much as possible, the factors affecting the ploughshare's damage should be taken into account in the selection of the ploughshare's material. It takes place in a wide range such as "These factors are material properties (hardness, toughness, and microstructure), soil type (particle hardness, size, angularity, and compaction) with also the operational (velocity, working depth) and environmental (moisture, temperature) conditions" (Kalácska et al., 2020). Within the scope of the study, the criteria given in Table 1 were determined for the selection of ploughshares material based on the literature studies and the expert opinion of the plough-producing company. The solution was made by accepting the variables as constant except for the criteria discussed.

Table 1. Ploughshares material selection criteria

	Criteria	Definition
C ₁	Hardness (HB)	"Hardness is the ability to withstand surface indentation (localized plastic deformation) and scratching" ¹
C ₂	Toughness (Notch impact strength) (J)	"Toughness is the ability of a material to absorb energy and plastically deform without fracturing" ²
C ₃	Wear percentage (loss at %)	"Wear is mechanically induced surface damage that results in the progressive removal of material due to relative motion between that surface and a contacting substance or substances" ³

C ₄	Tensile strength (Mpa)	“Strength of a material is its ability to withstand this applied load without failure or plastic deformation” ⁴
C ₅	Thermal conductivity (W/m-K)	“The heat transfer characteristics of a solid material are measured by a property called the thermal conductivity” ⁵
C ₆	Cost of material (\$/tonne)	Material cost

¹ <https://material-properties.org/what-is-hardness-of-low-alloy-steel-41xx-steel-chromoly-steel-definition/>

² <https://material-properties.org/what-is-toughness-definition/>

³ <https://material-properties.org/what-is-wear-types-classification-and-differences-definition/>

⁴ <https://material-properties.org/strength-of-materials-tensile-yield/>

⁵ <https://www.thermal-engineering.org/what-is-thermal-conductivity-definition/>

Higher hardness, higher toughness, higher tensile stress, higher abrasion resistance (Singh et al., 2020), and higher thermal conductivity (in order not to increase the local temperature excessively in harsh conditions), are important criteria that the ploughshares are exposed to.

Ploughshares are exposed to impact loads that can reach extremely high values from time to time, as well as abrasion during operation. Although extremely hard materials show high resistance to abrasion, they may not be sufficiently resistant to impacts. While high-hardness material is needed against abrasion, high toughness is required against impacts (Gürsel and Köftecioglu, 2006). This inverse relationship between the hardness and impact strength of the ploughshares complicates the selection of the ploughshares material. 1991 date DIN 11100 standard leaves the choice of material to the manufacturer (Gürsel and Köftecioglu, 2006).

To meet the forces and keep the shear stress and wear as small as possible, the ploughshares are manufactured from a special material (Gürsel and Köftecioglu, 2006). Hardness, toughness, abrasion resistance, tensile stress, etc. of the material features are strongly related to each other. In this study, four strong candidate materials, which are widely used, were selected from a wide material universe that can be used in soil cultivation. The chemical properties of four selected candidate steels are given in Table 2.

In Table 3, the mechanical properties and cost per ton values of 33MnCrB5(1.7185), 60SiMn5(SAE9262), 51CrV4(1.8159), 41CrMo4 (1.7225QT-4140) steels, which were taken into consideration as the selection criteria, are given as candidate ma-

Table 2. Chemical contents of candidate ploughshares steel (%)

Material	Carbon (C)	Chromium, (Cr)	Manganese, Mn	Phosphorus, P	Silicon, Si	Sulfur, S	Others
33MnCrB5 (1.7185) ¹	0.3-0.36	0.3-0.6	1.2-1.5	≤0.025	≤0.4	≤0.035	Bor (B) 0.0008-0.005
60SiMn5 (SAE9262) ²	≤0.55-0.65	0.25-0.4	≤0.75-1	≤0.04	≤1.8-2.2	≤0.04	-
51CrV4 (1.8159) ³	0.47-0.5	0.90-1.2	0.7-1.1	max 0.025	max 0.40	Max 0.025	Vanadyum (V) 0.1-0.25 Molybdenum, (Mo), 0.15-0.25
41CrMo4 (1.7225QT-4140) ⁴	0.38-0.43	0.8-1.1	0.75-1.0	≤0.035	0.15-0.30	≤0.040	Iron,(Fe), 96.785-97.77

- ¹ 33MnCrB5-2, 1.7185, 27MnCrB5-2, 1.7182 – boron steel (virgamet.com)
- ² SAE 9262 steel plate, SAE 9262 sheet, SAE 9262 coil - Carbon steel - (steelss.com)
- ³ 33MnCrB5-2, 1.7185, 27MnCrB5-2, 1.7182 – boron steel (virgamet.com)
- ⁴ AISI 4140 Steel, oil quenched, 25 mm (1 in.) round [845°C (1550°F) quench, 540°C (1000°F) temper] (matweb.com)

Table 3. Decision matrix of the ploughshare’s materials in terms of criteria

	Hardness (HB)	Toughness (J)	Abrasion percentage (loss in %)	Tensile strength (Mpa)	Thermal conductivity (W/m-K)	Material cost (\$/tonne)
33MnCrB5 (1.7185)	450-560 ¹	50 ¹	0.969 ²	1050-1300 ³	40-45 ⁴	580 ⁵
60SiMn5 (SAE9262)	300-400 ⁶	26 ⁷	0.883 ²	1158 ⁷	32.3-44.2 ⁸	850 ⁹
51CrV4 (1.8159)	360-490 ¹⁰	30 ¹¹	0.985 ²	1200-1800 ¹⁰	40-45 ¹²	800 ¹³
41CrMo4 (1.7225QT-4140)	311 ¹⁴	42 ²	0.905 ²	1075 ¹⁴	33-42.6 ¹⁴	800-900 ¹⁵

- ¹ "33MnCrB5-2, 1.7185, 27MnCrB5-2, 1.7182 – boron steel (virgamet.com)" (Acar, 2019)
- ² 33MnCrB5-2 / 1.7185 - SteelNumber - Chemical composition, equivalent, properties
- ³ Ovako 33MnCrB5-2 (EN10083-3:2006) Steel (matweb.com)
- ⁴ Sup9 60si2mn 51crv4 28mnb5 33mncrb5 Yassı Çubuklar Levha Çelik - 60 SiMn5 Çelik Özellikleri, 10.908 Çelik Özellikleri | Uslular (uslularhadde.com)
- ⁵ SAE 9262 steel plate, SAE 9262 sheet, SAE 9262 coil - Carbon steel - (steelss.com)
- ⁶ SAE 9262 Steel, Datasheet, Properties, Cross-Reference Table, Suppliers (steel-grades.com)
- ⁷ 60simn5 Bahar Çelik Alaşımli Çelik Soğuk Haddelenmiş Çelik - Buy Strip Steel Steel Coil Steel Sheet Spring Steel Alloy Steel,60simn5,High Carbon Steel Tool Steel Cold Rolled Alloy Steel Product on Alibaba.com
- ⁸ 51CrV4 1.8159 Alloy Spring Steel Strip (fushunsteel.com)
- ⁹ Material (basedosteel.com)
- ¹⁰ Ovako 51CrV4 SB9292 Steel, Tempering (matweb.com)
- ¹¹ https://www.alibaba.com/product-detail/42CrMo4-EN-1-7225-42CrMo-Hot_1600753090106.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.46c97006mFenQ0&s=p
- ¹² AISI 4140 Steel, oil quenched, 25 mm (1 in.) round [845°C (1550°F) quench, 540°C (1000°F) temper] (matweb.com)
- ¹³ 42CrMo4/4140/1.7225 – qilusteelstock.com (qilu-steelstock.com)
- ¹⁴
- ¹⁵

materials for the manufacture of ploughshares. This table also generates the values of the decision matrix for the FTOPSIS method.

3. Methodology

Decision-making is the determination of the option or options that can give the most appropriate result by evaluating all aspects of one or a series of problems that need to be finalized at each management level (Toksarı and Toksarı, 2011). It is a difficult problem to solve because it requires the evaluation of more than one alternative under more than one criterion. In decision problems, it is important to assign and weight the criteria correctly. In criterion weighting, the relative importance of the criteria is determined by matching the criteria with a value. In a decision problem, the weight vector $w=[w_1, w_2, \dots, w_n]$

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1, \quad w_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

shows as (Roszkowska, 2013). On the other hand, since linguistic expressions are generally used in the evaluation of criteria and alternatives, its solution becomes difficult. Many real-life problems involve imprecise data, which are sometimes inaccurate, sometimes intermittent, and sometimes fuzzy data (Lotfi and Fallahnejad, 2010). The differences in perception in the way people think, their subjective behaviors, and uncertainties in their goals can be explained by the concept of blur. Fuzzy logic is a type of logic used when the membership degrees of the object classes encountered in real life cannot be fully defined and the binary logic system is insufficient to explain these thoughts (Zadeh, 1965). A fuzzy set is characterized by a membership function, with each element denoted by membership degrees from 0 to 1. The sign denoting blur is indicated by the symbol “~”(Yalçın Seçme and Özdemir, 2010). In a fuzzy set, the fuzzy set is expressed as follows to show the first element member and the second element membership degree (Zimmermann, 2001),

$$\tilde{A} = \mu_{\tilde{A}}(x_1)/x_1 + \mu_{\tilde{A}}(x_2)/x_2 + \dots + \mu_{\tilde{A}}(x_i)/x_i \tag{2}$$

Fuzzy sets are defined by membership functions, so there are as many types of fuzzy numbers as there are membership functions. (Baykal and Beyan, 2004). In this study, the triangular membership function was used. Generally, the triangular fuzzy number \tilde{A} is the number with the starting point l , the ending point u , and the vertex m and is shown as $[l, m, u]$ (Zadeh, 1965);

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \text{ or } x < l \end{cases} \tag{3}$$

The fuzzy number values given in Table 4 were considered to determine the criterion weights.

Table 4. Linguistic expressions and triangle fuzzy number value (Ayağ & Özdemir, 2006)

Intensity of Importance	Fuzzy number	Definition	Triangular fuzzy scale	Fuzzy number	Triangular fuzzy scale
1	$\tilde{1}$	Equally important/preferred	(1,1,2)	$\tilde{1}^{-1}$	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1})$
3	$\tilde{3}$	Moderately more important/preferred	(2,3,4)	$\tilde{3}^{-1}$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$
5	$\tilde{5}$	Strongly more important/preferred	(4,5,6)	$\tilde{5}^{-1}$	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4})$
7	$\tilde{7}$	Very strongly more important/preferred	(6,7,8)	$\tilde{7}^{-1}$	$(\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6})$
9	$\tilde{9}$	Extremely more important/preferred	(8,9,10)	$\tilde{9}^{-1}$	$(\frac{1}{10}, \frac{1}{9}, \frac{1}{8})$

Interval Shannon's entropy based on a-level sets was used to determine the criterion weights. Shannon's entropy method was developed by Lotfi and Fallahnejad (2010) and allowed to perform operations by converting triangular fuzzy numbers to interval data. The solution algorithm of Shannon's fuzzy entropy based on α -level sets is given below (Lotfi and Fallahnejad, 2010).

3.1 Interval Shannon Entropy Method

Step 1: The pairwise comparison matrix (\tilde{D}) of the criteria consisting of triangular fuzzy numbers is transformed into the matrix A with the interval given, using equations 5 and 6 according to the α cut levels (usually taken as $\alpha=0.1;0.5;0.9$).

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{12} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$(\tilde{x}_{ij})_{\alpha}^L = l + \alpha * (m - l), (\tilde{x}_{ij})_{\alpha}^R = u + \alpha * (m - u) \tag{5}$$

$$[(\tilde{x}_{ij})_{\alpha}^L, (\tilde{x}_{ij})_{\alpha}^R] = \left[\min_{x_{ij}} \{x_{ij} \in R \mid \mu_{\tilde{x}_{ij}}(x_{ij}) \geq \alpha\}, \max_{x_{ij}} \{x_{ij} \in R \mid \mu_{\tilde{x}_{ij}}(x_{ij}) \geq \alpha\} \right] \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{6}$$

$$A = \begin{bmatrix} [x_{11}^L, x_{11}^R] & [x_{12}^L, x_{12}^R] & \dots & [x_{1n}^L, x_{1n}^R] \\ [x_{21}^L, x_{21}^R] & [x_{22}^L, x_{22}^R] & \dots & [x_{2n}^L, x_{2n}^R] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [x_{m1}^L, x_{m1}^R] & [x_{m2}^L, x_{m2}^R] & \dots & [x_{mn}^L, x_{mn}^R] \end{bmatrix} \quad (7)$$

Step 2: The obtained values are normalized with equations 8 and 9.

$$p_{ij}^L = \frac{x_{ij}^L}{\sum_{j=1}^m x_{ij}^L} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{and} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$p_{ij}^R = \frac{x_{ij}^R}{\sum_{j=1}^m x_{ij}^R} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{and} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Step 3: The entropy values of the lower and upper bound range are calculated with equations 10 and 11.

$$e_i^L = \min \left\{ -e_0 \sum_{i=1}^m p_{ij}^L \ln p_{ij}^L, -e_0 \sum_{i=1}^m p_{ij}^R \ln p_{ij}^R \right\} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$e_i^R = \max \left\{ -e_0 \sum_{i=1}^m p_{ij}^L \ln p_{ij}^L, -e_0 \sum_{i=1}^m p_{ij}^R \ln p_{ij}^R \right\} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

In these equations,

$$e_0 = (\ln m)^{-1}, \text{ and } p_{ij}^L \ln p_{ij}^L \text{ or } p_{ij}^R \ln p_{ij}^R \text{ is defined as } 0 \text{ if } p_{ij}^L = 0 \text{ or } p_{ij}^R = 0.$$

Step 4: Set the lower and the upper bound of the interval of diversification is calculated by equations 12 and 13.

$$d_i^L = 1 - e_i^R \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$(13)$$

$$d_i^R = 1 - e_i^L \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Step 5: The lower bound and upper bound of interval weight is calculated by equations 14 and 15. The result is obtained by taking the arithmetic average of these values.

$$w_i^L = \frac{d_i^L}{\sum_{s=1}^n d_s^L} \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{14}$$

$$w_i^R = \frac{d_i^R}{\sum_{s=1}^n d_s^R} \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{15}$$

After the criteria were weighed, the FTOPSIS method was used to weight the alternatives. The steps of this method are given below,

3.2. The FTOPSIS method

TOPSIS is one of the most commonly used methods in multi-objective decision problems (Wang and Elhag, 2006). FTOPSIS steps can be followed as (Rathod and Kanzaria, 2011; Chen-Tung Chen, 2000);

Step 1: First, criterion weights (\tilde{w}_j) are determined (determined by the Interval Shannon’s Entropy method).

Step 2: The decision matrix \tilde{C} , which consists of all alternatives and criteria, is expressed as:

$$\tilde{C} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \left[\begin{matrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{matrix} \right] \end{matrix} \tag{16}$$

$$W = [\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_j, \dots, \tilde{w}_n] \tag{17}$$

Here, $A_i, i=1, 2, \dots, m$ shows the alternatives to be selected and $C_j, j=1, 2, \dots, n$ shows the criteria. Triangle fuzzy numbers are denoted as $\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ and $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$

Step 3: The fuzzy decision matrix \tilde{C} , is normalized. The normalized decision matrix is denoted by \tilde{R} and is expressed as:

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \tag{18}$$

Elements B and C, are benefit and cost criteria,

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{c_j^*}, \frac{m_{ij}}{c_j^*}, \frac{u_{ij}}{c_j^*} \right), \quad j \in B; \tag{19}$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{u_{ij}}, \frac{a_j^-}{m_{ij}}, \frac{a_j^-}{l_{ij}} \right), \quad j \in C; \tag{20}$$

$$j \in B \text{ ise } c_j^* = \max_i u_{ij} \tag{21}$$

$$j \in C \text{ ise } a_j^- = \min_i a_{ij} \tag{22}$$

Step 4: Equations 23 and 24 are used to construct the weighted normalized fuzzy decision matrix.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{23}$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \otimes \tilde{w}_j \tag{24}$$

Step 5: "Determine positive ideal (V^+) and negative ideal solutions (V^-). The fuzzy ideal (best) and fuzzy negative ideal (worst) solutions can be expressed as":

$$V^+ = \{(\sum_i^{max} \tilde{v}_{ij}/j \in J), (\sum_i^{min} \tilde{v}_{ij}/j \in J')/i = 1, 2, \dots, m\} = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \tilde{v}_3^+, \dots, \tilde{v}_n^+\} \tag{25}$$

$$V^- = \{(\sum_i^{min} \tilde{v}_{ij}/j \in J), (\sum_i^{max} \tilde{v}_{ij}/j \in J')/i = 1, 2, \dots, m\} = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \tilde{v}_3^-, \dots, \tilde{v}_n^-\} \tag{26}$$

Step 6: "Calculate separation measures. The separation (distance) of each alternative from V^+ and V^- can be currently calculated as"

$$s_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{27}$$

$$s_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{28}$$

Step 7: "Calculate the relative closeness to the ideal solution as described before",

$$R_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{29}$$

Step 8: Rank reference order. Choose an alternative with maximum R_i or rank alternatives according to R_i in descending order.

4. Results and Discussion

In the study, four candidate materials, which were determined to be used in the production of ploughshares, were selected under six criteria. To determine the criterion weights, the opinions of 6 expert engineers, each with ten to thirty years of design and manufacturing experience, were taken in a large enterprise class agricultural machinery manufacturing enterprise operating in the agricultural machinery manufacturing sector. In Table 5, the pairwise comparison matrix of the expert opinions on the criteria is given.

Table 5. Pairwise comparison matrix of end iron material selection criteria according to expert opinions

	C ₁	C ₂	C ₃	...	C ₆
C ₁	[1.000,1.000,1.000]	[1.333, 1.667, 2.667]	[0.122, 0.141, 0.167]	...	[3.333, 4.333, 5.333]
C ₂	[0.417,0.778,0.833]	[1.000, 1.000, 1.000]	[1.431,1.781,2.139]	...	[5.333, 6.333, 7.333]
C ₃	[6.667,7.667,8.667]	[3.389, 4.067, 4.750]	[1.000,1.000,1.000]	...	[5.333, 6.333, 7.333]
C ₄	[0.256,0.437,0.792]	[0.256, 0.437, 0.458]	[0.122,0.141,0.167]	...	[3.417, 4.111, 4.833]
C ₅	[0.778,1.133,1.500]	[1.084, 1.400, 1.750]	[0.306,0.511,0.538]	...	[4.000, 5.000, 6.000]
C ₆	[0.195,0.244,0.333]	[0.139, 0.162, 0.195]	[0.139,0.162,0.195]	...	[1.000,1.000,1.000]

The data in Table 5 was converted to interval data using equations 5 and 6. Then, using equations 7, 8, 9, 10, 11, 12, and 13, the values in Table 6 were obtained for $\alpha = 0.1$, $\alpha = 0.5$ and $\alpha = 0.9$ levels.

Table 6. The values $[e_i^L, e_i^R]$, $[d_i^L, d_i^R]$

	$\alpha = 0.1$		$\alpha = 0.5$		$\alpha = 0.9$	
	$[e_i^L, e_i^R]$	$[d_i^L, d_i^R]$	$[e_i^L, e_i^R]$	$[d_i^L, d_i^R]$	$[e_i^L, e_i^R]$	$[d_i^L, d_i^R]$
C ₁	[0.544, 0.643]	[0.357, 0.456]	[0.579, 0.632]	[0.368, 0.421]	[0.609, 0.619]	[0.381, 0.391]
C ₂	[0.692, 0.798]	[0.202, 0.308]	[0.744, 0.801]	[0.199, 0.256]	[0.791, 0.802]	[0.198, 0.209]
C ₃	[0.692, 0.798]	[0.244, 0.314]	[0.723, 0.758]	[0.242, 0.277]	[0.753, 0.759]	[0.241, 0.247]
C ₄	[0.782, 0.881]	[0.119, 0.218]	[0.827, 0.881]	[0.119, 0.173]	[0.870, 0.881]	[0.119, 0.130]
C ₅	[0.759, 0.889]	[0.111, 0.241]	[0.820, 0.891]	[0.109, 0.180]	[0.880, 0.894]	[0.106, 0.120]
C ₆	[0.820, 0.941]	[0.059, 0.180]	[0.877, 0.942]	[0.058, 0.123]	[0.931, 0.944]	[0.056, 0.069]

By using Equations 14 and 15, interval values were found, and criteria weights were determined for all three alpha levels by taking the arithmetic average. The results are given in Table 7.

Table 7. The interval and crisp weight of the criteria

	$\alpha = 0.1$		$\alpha = 0.5$		$\alpha = 0.9$	
	$[w_i^L, w_i^R]$	w_i	$[w_i^L, w_i^R]$	w_i	$[w_i^L, w_i^R]$	w_i
Hardness (HB)	[0.327, 0.266]	0.296 [1]	[0.336, 0.294]	0.315 [1]	[0.346, 0.336]	0,341 [1]
Toughness (J)	[0.185, 0.179]	0.182 [3]	[0.182, 0.179]	0.181 [3]	[0.180, 0.179]	0,179 [3]
Wear percentage (loss at %)	[0.223, 0.183]	0.203 [2]	[0.221, 0.194]	0.208 [2]	[0.219, 0.212]	0,215 [2]
Tensile strength (Mpa)	[0.109, 0.127]	0.118 [5]	[0.109, 0.121]	0.115 [4]	[0.108, 0.111]	0,110 [4]
Thermal conductivity (W/m-K)	[0.102, 0.141]	0.121 [4]	[0.099, 0.126]	0.112 [5]	[0.096, 0.103]	0,100 [5]
Material cost(\$/tonne)	[0.054, 0.105]	0.079 [6]	[0.053, 0.086]	0.069 [6]	[0.051, 0.059]	0,055 [6]

Bracket [.] denotes the ranking order.

When Table 7 was evaluated, the ranking of the ploughshares material selection criteria was similar for all alpha levels. Accordingly, the first-degree important criterion in the selection of ploughshares material is the hardness of the material. Following this, in order of importance, wear percentage, toughness, tensile stress, thermal conductivity, and material cost took place. It is known that the wear percentage of the ploughshares is primarily dependent on the hardness of the ploughshare’s material. As the hardness increases in the martensite region, the wear shows a linear decrease (Gürsel and Köftecioğlu, 2006). The important thing in terms of ploughshares production is to choose an economically priced material that can achieve as high a wear percentage as possible without breaking. There is a strong relationship between Hardness Toughness, Abrasion percentage, and tensile strength. As can be seen in Table 7, material hardness has emerged as the first-degree important criterion. This is an expected result. Abrasion percentage is the second most important criterion. Abrasion damage in tillage is perhaps the most exposed damage mechanism. However, while this is achieved, it is necessary not to fracture the material. In this context, it is a reasonable result to take place the toughness criterion following the abrasion percentage. Subsequently, tensile stress, thermal conductivity, and material cost take place. Tensile strength is an important selection criterion that interacts with the previous three criteria. Although thermal conductivity is important in terms of ensuring that the local heat generated because of friction is removed from the material and cooled, it is seen that it is less important than the other four criteria. Finally, the cost of materials takes place, which shows that there is not much difference between material prices and that functionality is important before cost.

After the criterion weights were determined, the FTOPSIS method was used to select the most suitable material among the options for the ploughshares. Interval values in Table 3 were converted into triangular fuzzy numbers and included in the analysis. The middle value of the triangular fuzzy number was obtained by

taking the arithmetic average of the upper and lower values of the interval values. The decision matrix values used for the FTOPSIS analysis are given in Table 8.

Table 8. Ploughshares selection criteria and decision matrix for materials

	Hardness	Toughness	Wear percentage	Tensile strength	Thermal Cond.	Mat. Cost
33MnCrB5	[450, 505, 560]	[501, 501, 501]	[0.969, 0.969, 0.969]	[1050, 1175, 1300]	[40, 42.5, 45]	[580, 580, 580]
60SiMn5	[300, 350, 400]	[26, 26, 26]	[0.883, 0.883, 0.883]	[1158, 1158, 1158]	[32.3, 38.25, 44.2]	[850, 850, 850]
51CrV4	[360, 425, 490]	[30, 30, 30]	[0.985, 0.985, 0.985]	[1200, 1500, 1800]	[40, 42.5, 45]	[800, 800, 800]
41CrMo4	[311, 311, 311]	[42, 42, 42]	[0.905, 0.905, 0.905]	[1075, 1075, 1075]	[33, 37.8, 42.6]	[800, 850, 900]

The values in Table 9 were obtained by using the equations 19,20,21,22,23,24,25 and 26 in the FTOPSIS steps. While the criteria are included in the solution; hardness, toughness, tensile strength, and thermal conductivity were evaluated as the highest best, and the wear percentage and material cost were evaluated as the lowest best.

Table 9. The comparison results for ploughshares materials

	$\alpha=0.1$				$\alpha=0.5$				$\alpha=0.9$			
	s_i^+	s_i^-	R_i	Rank	s_i^+	s_i^-	R_i	Rank	s_i^+	s_i^-	R_i	Rank
33MnCrB5	0,066	1,141	0,945	1	0,061	1,147	0,950	1	0,053	1,155	0,956	1
60SiMn5	0,323	0,118	0,267	3	0,325	0,115	0,261	3	0,329	0,110	0,251	3
51CrV4	0,224	0,218	0,494	2	0,223	0,217	0,493	2	0,224	0,216	0,490	2
41CrMo4	0,340	0,122	0,264	4	0,344	0,118	0,255	4	0,349	0,111	0,242	4

At $\alpha =0.1$, $\alpha =0.5$, and $\alpha =0.9$ levels, the material order for the ploughshares was the same. The order of preference of candidate materials to be used in the ploughshares was determined as 33MnCrB5(1.7185), 51CrV4(1.8159), 60SiMn5(SAE9262), 41CrMo4 (1.7225QT-4140), respectively. Among these materials, 33MnCrB5 is the type of material that is widely preferred in soil cultivation with its high manganese content and alternatives such as 27MnCrB5, 30MnCrB5, and 38MnCrB5, 33MnCrB5 steel stands out in soil cultivation with its high hardness and toughness value and low cost per ton. 51CrV4 steel, which draws attention with its vanadium content, is used as spring steel and is a preferred spring steel in soil cultivation. With its high manganese and silicon con-

tent, 60SiMn5 steel is widely used in the manufacture of machine parts such as springs, circlips, and bolts, and is also used in the field of soil cultivation equipment. 41CrMo4 is a material that gives a good surface appearance with its high chromium content, finds a wide application area in the machinery manufacturing sector, and responds well to heat treatment with high availability. Although it is not common, it also finds use in soil cultivation.

5. Conclusion

The selection of ploughshares material, which is exposed to abrasion and working under impact loads in soil cultivation, was made using MCDM methods. First, criteria were determined according to the literature and expert opinion. Then, the data obtained from the expert opinion were converted into fuzzy numbers and the order of importance of the criteria was determined with the Interval Shannons' Entropy method. According to this, the order of the ploughshare's material selection criteria, respectively; hardness, wear percentage, toughness, tensile strength, thermal conductivity, and material cost. 33MnCrB5(1.7185), 60SiMn5(SAE9262), 51CrV4(1.8159), 41CrMo4 (1.7225QT-4140) steels are considered as ploughshares material options. Analysis was performed with the FTOPSIS method. It has been determined that 33MnCrB5(1.7185) should be preferred as the ploughshare's material first, and then 51CrV4(1.8159), 60SiMn5(SAE9262), 41CrMo4 (1.7225QT-4140) should be preferred, respectively. In future studies, a similar methodology can be used for material selection.

In the study, the material selection problem was created to select the plow tip iron. Multi-Criteria Decision Making Methods are successfully applied in material selection problems in the literature, so the most appropriate material selection was made using this method for plow tip iron selection. Since there is no study in the literature on plow tip material selection using the Fuzzy MCDM method, this study attempted to contribute to the literature. One of the limitations of this study is that not all the criteria and alternatives required for material selection can be obtained. Additionally, material selection with the MCDM method can be used as an introductory study in terms of investment planning.

As a result of the sensitivity analysis, the material selection order was the same. In future studies, studies can be conducted by consulting experts in different fields, using different criteria and materials, and using different FMCDM methods. In addition, in experimental studies, studies can be carried out starting from MCDM methods to determine which feature is more important in finding the most suitable material in material selection.

References

- Aires, R. F. and Ferreira, L. (2022). "A New multi-criteria approach for sustainable material selection problem". *Sustainability*, 14(18), 11191, <http://dx.doi.org/10.3390/su141811191>
- Ashby, M. F. (2010). *Materials selection in mechanical design*. Woburn, UK: Butterworth Heinemann.
- Ayağ, Z. and Özdemir, R. G. (2006). "A fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(2), 179–190. <https://doi.org/10.1007/s10845-005-6635-1>
- Balçı, A. (2004). *Basınçlı Kaplarda Malzeme Seçimi için Karar Destek Sistemi Geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bayhan, Y. (1996). *Trakya bölgesinde imal edilen bazı toprak işleme aletlerinin uç demirlerindeki aşınma ve aşınmaya etki eden bazı etkenlerin saptanması üzerine bir araştırma*. (Doktora Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Baykal, N. ve Beyan, T. (2004). *Bulanık mantık ilke ve temelleri*. Ankara, Türkiye: Bıçaklar Kitapevi.
- Boydaş, M. (2023). "Farklı ağız yapısına sahip kültivatör uç demirlerinin çeki kuvveti üzerine etkisinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmesi". *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(2), 306–317. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1087131>
- Chatterjee, S. and Chakraborty, S. (2021). "Material selection of a mechanical component based on criteria relationship evaluation and MCDM approach". *Materials Today: Proceedings*, 44, 1621–1626. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.817>
- Chen-Tung Chen. (2000). "A note on Extension of fuzzy TOPSIS method based on interval-valued fuzzy sets". *Fuzzy Sets and Systems*, 114, 1–9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165011497003771>
- Çakır, F. G. (2019). *Pulluk uç demirlerine uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma davranışına etkilerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Manis Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Das, M. C. and Sarkar, B. (2021). "Fusion between full consistency method and ideal solutions with constraint on values for material selection: A Consilient conspectus approach". *Journal of The Institution of Engineers (India): Series*

- C, 102(5), 1211–1230. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00739-y>
- Emovon, I. and Oghenenyerovwho, O. S. (2020). "Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review". *Results in Materials*, 7 (June), 100115. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100115>
- Er, Ü. (2003). *Bor Yayınıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş Çeliklerin Aşınmaya Karşı Dayanımlarının ve Pulluk Uç Demirlerinde Uygulama Olanaklarının Araştırılması*. Doktora tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Gaalice, N. and Abdelrhman, A.M. (2024). "A Fuzzy logic approach for selecting bearing ring materials in pharmaceutical applications". *Results in Materials*, 21, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100513>
- Gürsel, K. T. and Köftecioglu, E. Y. (2006). "Structural analysis of elements of two-bottom mouldboard plough". *Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma*, 0232, 46–55. <https://www.ytusigmadergisi.com/pdfs/229.pdf>
- Hatamura, Y. (1999). *The Practice of Machine Design*. London: UK: Clarendon Press.
- Kalácska, Á., De Baets, P., Fauconnier, D., Schramm, F., Frerichs, L. and Sukumaran, J. (2020). "Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines". *Wear*, 442–443. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203107>
- Lotfi, F. H. and Fallahnejad, R. (2010). "Imprecise shannon's entropy and multi attribute decision making". *Entropy*, 12(1), 53–62. <https://doi.org/10.3390/e12010053>
- Mamoon, A., Alhaji, A. U. and Abdullahi, I. (2021). "Application of neural network for material selection: A Review". *International Journal of Material Science and Engineering*, 7(2), 1–6. <https://doi.org/10.14445/23948884/ijmse-v7i2p101>
- Martínez-Gómez, J. and Eduardo, P. J. (2023). "Coil high voltage spark plug boots insulators material selection using MCDM, simulation, and experimental validation". *Processes*, 11(1291), 2–23. <https://doi.org/10.3390/pr11041292>
- Ordu, M. and Der, O. (2023). "Polymeric Materials selection for flexible pulsating heat pipe manufacturing using a comparative hybrid MCDM approach", *Polymers*, 15(13), 1–20. <https://doi.org/10.3390/polym15132933>
- Patnaik, P. K., Swain, P. T. R., Mishra, S. K., Purohit, A. and Biswas, S. (2020). "Composite material selection for structural applications based on AHP-MOORA

- approach". *Materials Today: Proceedings*, 33, 5659–5663. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.063>
- Raju, S., Palli, S., Prasad, P. D., Menda, V. R. and Ramakrishna, B. (2024). "A hybrid AHP-TOPSIS, MOORA technique for multi-objective optimization of thermal, mechanical, and water absorption behavior of epoxy/hemp, pine apple, and palm fiber composites". *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 47(1), 23-36. <https://doi.org/10.1080/02533839.2023.2274092>
- Rathod, M. K. and Kanzaria, H. V. (2011). "A methodological concept for phase change material selection based on multiple criteria decision analysis with and without fuzzy environment". *Materials and Design*, 32(6), 3578–3585. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.040>
- Remadi, F. D. and Frikha, H. M. (2023). "The triangular intuitionistic fuzzy numbers CODAS method for solving green material selection problem". *International Journal of Operational Research*, 46 (3), 398–415. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2023.129409>
- Roszkowska, E. (2013). "Rank ordering criteria weighting methods – A Comparative overview", *Optimum. Studia Ekonomiczne*, 5 (65), 14–33. <https://doi.org/10.15290/ose.2013.05.65.02>
- Sarfraz Khabbaz, R., Dehghan Manshadi, B., Abedian, A. and Mahmudi, R. (2009). "A simplified fuzzy logic approach for materials selection in mechanical engineering design". *Materials and Design*, 30(3), 687–697. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.026>
- Yalçın Seçme, N and Özdemir, A. İ. (2010). "Bulanık analitik hiyerarşi yöntemi ile çok kriterli stratejik tedarikçi seçimi: Türkiye örneği". *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 175–190.
- Singh, J., Chatha, S. S. and Sidhu, B. S. (2020). "Effect of surface alloying on wear behaviour of EN-47 steel". *Materials Today: Proceedings*, 21,1340–1349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.172>
- Singh, J., Chatha, S. S. and Sidhu, B. S. (2021). "Abrasive wear characteristics and microstructure of Fe-based overlaid ploughshares in different field conditions". *Soil and Tillage Research*, 205(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104771>
- Toksarı, M. and Toksarı, D. M. (2011). "Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesine (AHP) yaklaşımı kullanılarak hedef pazarın belirlenmesi". *ODTÜ Gelişme Dergisi*, 38 (Nisan), 51–70.

- Wang, Y. M. and Elhag, T. M. S. (2006). "Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment". *Expert Systems with Applications*, 31(2), 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.09.040>
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets". *Information and Control*, 8, 338–353.
- Zakeri, S., Chatterjee, P., Konstantas, D. and Ecer, F. (2023). "A decision analysis model for material selection using simple ranking process". In *Scientific Reports* 13 (1). Nature Publishing Group UK. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35405-z>
- Zimmermann, H. J. (2001). "Fuzzy set theory and its applications". In *Fuzzy Set Theory-and Its Applications* (4th Edition). *Springer Science+Business Media*, LLC. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0>
- Zoghi, M., Rostami, G., Khoshand, A and Motalleb, F. (2022). "Material selection in design for deconstruction using Kano model, fuzzy-AHP and TOPSIS methodology". *Waste Management and Research*, 40(4), 410–419. <https://doi.org/10.1177/0734242X211013904>

ARAşTIRMA MAKALELERİ

Research Articles

- Ticari Bir Soğutucuda Ürün Sıcaklık Sınıflarının Enerji Tüketimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi** 27-48
Experimental Investigation of the Effect of Product Temperature Classes on Energy Consumption in A Closed Display Refrigerator
F. Mertkan ARSLAN, Hüseyin GÜNERHAN, Hakan TAVUKCU, Binnur SOYSAL, Sertan AKSOY, Bora DEVRİM
- Comparison of Machinability of Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC For Multi-Layer Coated Insert: Validated Fem and Statistical Approaches** 49-77
Al-4.5%Cu/TiB₂/3p MMC'nin Çok Katmanlı Kaplamalı Kesici Takımlarla İşlenebilirliğinin Karşılaştırılması: Doğrulanmış Fem ve İstatistiksel Yaklaşımlar
Erkan ÖZTÜRK
- Tel Örgü Katmanlarının Faz Değiştiren Malzeme Üzerindeki Isıl Performansı Etkisinin Deneysel İncelenmesi** 78-100
Experimental Investigation of the Thermal Performance Effect of Wire Mesh Layers on Phase Change Material
Mustafa Yasin GÖKASLAN
- Evaluation of the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Designed in Different Sizes** 101-120
Farklı Ebatlarda Tasarlanan Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi Performanslarının Değerlendirilmesi
Adem YILMAZ, Sinan ÜNVAR, Bünyamin AYGÜN
- LPG Yakıtlı Buji Ateşlemeli Motorlarda Strok/Çap Oranı Etkilerinin Ekserji Analiziyle İncelenmesi** 121-145
Investigation of Stroke/Bore Ratio Effects in LPG Fuelled Spark Ignition Engines Via Exergy Analysis
İsmet SEZER
- Ploughshares Material Selection: Shannon's Entropy Based Fuzzy Topsis Application** 177-197
Pulluk Uç Demiri Malzeme Seçimi: Shannon Entropi Temelli Bulanık Topsis Uygulaması
Ahmet Bilal ŞENGÜL

DERLEME MAKALELERİ

Review Articles

- Geleceğin Enerji Depolama Teknolojileri, Sürdürülebilirlik ve Enerji Dönüşümü** 1-26
Future Energy Storage Technologies, Sustainability and Energy Conversion
Edip TAŞKESEN, Hamza ALAHMAD, Elif Nur BİLEN
- Tedarik Zincirinde Direnç Konulu Literatürün Bibliyometrik Analizi** 146-176
Bibliometric Review of Resilience in Supply Chain Literature
Batuhan KOCAOĞLU, Utkan ULUÇAY