



GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Gümüşhane University Journal of Science

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ YAYINI

PUBLISHED BY GÜMÜŞHANE UNIVERSITY

ISSN 2146 - 538X

CİLT/VOLUME: 12

SAYI/NUMBER : 3

YIL/YEAR : 2022

$$\text{Arf}(q) = \sum_{i=1}^n q^{(a_i) q(b_i)} \in \mathbb{Z}_2$$

$a_i, b_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$



EBSCO



ULAKBİM TR DİZİN



Gümüşhane University Journal of Science
Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Published by Gümüşhane University
Cilt/Volume: 12 Sayı/Issue: 3 Yıl/Year: 2022
Üç ayda bir yayımlanır/ *Published four times a year*
ISSN 2146-538X

Sahibi / Owner

Prof. Dr. Halil İbrahim ZEYBEK
Gümüşhane Üniversitesi Adına
On the behalf of Gümüşhane University

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Editor in Chief

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI

Baş Editör / Executive Editor

Doç. Dr. Serhat DAĞ

Editörler / Editors

<i>Prof. Dr. Ferkan SİPAHI</i>	<i>Doç. Dr. Mehmet Ali GÜCER</i>
<i>Prof. Dr. Mehmet MERDAN</i>	<i>Doç. Dr. Melih OKCU</i>
<i>Prof. Dr. Necati ÇELİK</i>	<i>Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU</i>
<i>Prof. Dr. Fatih DÖNER</i>	<i>Doç. Dr. İbrahim TURAN</i>
<i>Prof. Dr. Salim Serkan NAS</i>	<i>Dr. Öğr. Üyesi. Bülent AKAR</i>
<i>Prof. Dr. Bahri BAYRAM</i>	<i>Dr. Öğr. Üyesi Onur ARAZ</i>
<i>Prof. Dr. Hüseyin DEMİR</i>	<i>Dr. Öğr. Üyesi Lale CONA</i>
<i>Doç. Dr. Enver AKARYALI</i>	<i>Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇAKMAK</i>
<i>Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ</i>	<i>Öğr. Gör. Salih TÜRK</i>

Dergi Sekreteryası / Secretary

Arş. Gör. Dr. İlker ERKAN
Arş. Gör. Şener ALİYAZICIOĞLU

Yayın Türü / Publication Type

Yaygın süreli ve hakemli/ Common term and refereed

Yayın Tarihi / Publication Date

15 / 07 / 2022

Hakemli bir dergi olan Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi üç ayda bir çevrimiçi olarak yayımlanmaktadır. Akademik usullere uygun atıf yapmak suretiyle dergide yapılan çalışmalardan yararlanılabilir. Bu dergide yayımlanan çalışmaların bütün sorumluluğu yazarlara aittir.



Gümüşhane University Journal of Science
Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

Published by Gümüşhane University

Cilt/Volume: 12 Sayı/Issue: 3 Yıl/Year: 2022

Üç ayda bir yayımlanır/ Published four times a year

ISSN 2146-538X

Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

- Prof. Dr. Jose Francisco Gomez Aguilar-Cenidet
Prof. Dr. Vecihi AKSAKAL-Bayburt Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Gökhan APAYDIN- Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer ASLAN-Balıkesir Üniversitesi
Prof. Dr. Charyyar Ashryalyev-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Fetullah ARIK-Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet ARSLAN-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Abdon ATANGANA-Free State University
Prof. Dr. Hasan BALTAŞ-Recep Tayyip Erdoğan Üni.
Prof. Dr. Bilge BAHAR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Bahri BAYRAM-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Fikri BULUT-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Kamil COŞKUNÇELEBİ-Karadeniz Teknik Üni
Prof. Dr. Çetin CÖMERT- Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Günay ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Tufan ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Necati ÇELİK-Gümüşhane Üniversitesi-
Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN-Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Abdurrahman DOKUZ-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Çiğdem SAYDAM EKER-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Murat EKİNCİ-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Abdelhai ELAZZOUI-Sidi Mohamed Ben Abdellah U.
Prof. Dr. Saffet ERDOĞAN-Harran Üniversitesi
Prof. Dr. Yener EYÜBOĞLU-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Ertan GÖKALP-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Candan GÖKÇEÖĞLU-Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Levent GÜMÜŞEL-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK-Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Zakia HAMMOUCH-Moulay Ismail University
Prof. Dr. Cahit HELVACI-Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Muazzez ÇELİK KARAKAYA-Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Necati KARAKAYA-Selçuk Üni.
Prof. Dr. Hakan KARSLI-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Elif Çelenk KAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Abdullah KAYGUSUZ-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Cemal KÖSE-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Birgül KURAL-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Murat KÜÇÜK-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU -Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU-Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Nafiz MADEN-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Halim MUTLU-Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Salim Serkan NAS-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Kolade M. OWOLABI-Federal Uni. of Technology
Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Serkan ÖZTÜRK-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Sunil PROHIT- Rajasthan Technical University
Prof. Dr. Abedallah RABABAH-Jordan Uni. Sci. and Tech.
Prof. Dr. M. Burhan SADIKLAR-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. S. Beyza Ö. SARIKAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Müdahir ÖZGÜL-Atatürk Üniversitesi
Prof. Dr. İsmet SEZER-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Zehra ŞAHİN- Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Selim ŞEN-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet TUTUŞ-Kahramanmaraş Sütçü İmam Üni.
Prof. Dr. Coşkun ÜLSER-Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Mualla YALÇINKAYA-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Şükrü YETGİN-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Keewook YI-Korea Basic Science Institute
Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Yong WANG- University of Manchester
Prof. Dr. Emel ABDİOĞLU YAZAR-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Özcan YİĞİT-Çanakkale 18Mart Üniversitesi
Prof. Dr. Halil YOLCU-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Enver AKARYALI-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Hazan ALKAN AKINCI Artvin Çoruh Üni.
Doç. Dr. Cemalettin BALTACI-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Zafer ÇAKIR-Alaaddin Keykubat Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa ÇULLU-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Afşin Ahmet KAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Ayberk KAYA- Recep Tayyip Erdoğan Üni.
Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI- Karadeniz Teknik Üni.
Doç. Dr. Selami KESLER-Pamukkale Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa KUMRAL-İstanbul Teknik Üni
Doç. Dr. Emre ÖZKOP-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Uğur ŞİMŞEK-Iğdır Üniversitesi
Doç. Dr. Yener TOP-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Ayhan TOZLUOĞLU-Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Osman ÜÇÜNCÜ-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Alaaddin VURAL-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Hilal YILDIZ-Neveşehir Hacı Bektaş Veli Üni.
Doç. Dr. Sefa YALVAÇ-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Cem YÜCEL-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK-Atatürk Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AŞIK-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hacı Alim BARAN-Batman Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ÇAVUŞOĞLU-Gümüşhane Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Kemal ÇELİK-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DÜZGÜN-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet M. KAHRAMAN-İstanbul Teknik Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Selim KAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nurçin KÜÇÜK KENT-Gümüşhane Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Kemal KUVVET- Recep Tayyip Erdoğan Üni
Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman LERMİ-N. Ömer Halisdemir Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Yasin OĞUZ-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Zuhul OKCU-Atatürk Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Abdulveli SİRAT-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Birol ŞAHİN- Recep Tayyip Erdoğan Üni
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Nuri URAL-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. İlyas KHAN- Majmaah University
Dr. Rizwan Ul HAQ-Bahria University
Dr. Chokka RAVICHANDRAN-Bharathiar University

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Düzeltilme / Erratum

Fatih ŞENASLAN Ayhan ÇELİK Muharrem TAŞDEMİR	Production of high-transparent MgO films by radio-frequency sputtering method <i>Yüksek geçirgen MgO filmlerin radyo frekansı saçırma yöntemiyle üretimi</i>	724
--	--	------------

Arastırma Makalesi / Research Article

Sadık ATA Mehmet AKSOY Remzi ŞAHİN Ali KAHRAMAN	Jeotermal ısı kaynaklı Organik Rankine Çevriminde kuru ve izantropik akışkanların çevresel etkilerinin ve termodinamik performanslarının karşılaştırılması <i>Comparison of the environmental effects and thermodynamic performances of dry and isentropic fluids in a geothermal heat sourced Organic Rankine Cycle</i>	726
Nihal ZENGİN Ruşen YAMAÇLI	Çevresel ve ekolojik stratejilerle kapsayıcı mimari tasarım modeli <i>Inclusive architectural design model with environmental and ecological strategies</i>	744
Berkay BAHADUR	Farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansına etkisi <i>Impact of different troposphere models on the real-time multi-GNSS PPP performance</i>	756
Orhan DALKILIÇ Naime DEMİRTAŞ	Sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümeler ve karar verme üzerine bir uygulaması <i>Virtual intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft sets and their application in decision-making</i>	769
Vildan ÇETKİN	Gradation of continuity for mappings between L-soft topological spaces <i>L-esnek topolojik uzaylar arasındaki dönüşümler için sürekliliğin derecelendirilmesi</i>	781
Züleyha AKPINAR Merve KIZAKLI YILDIRIM Hakan KARAOĞLU	Ionic and covalent immobilization of glucose isomerase of thermophilic Anoxybacillus gonensis on DEAE-sepharose <i>Termofilik Anoxybacillus gonensis glukoz izomerazının DEAE-Sefaroz üzerine iyonik ve kovalent immobilizasyonu</i>	793
Betül METE Osman Tuğrul BAKİ Adem BAYRAM	Değirmendere, Yomra ve Galanima akarsu havzalarında (Trabzon) askıda katı madde taşımının incelenmesi ve değerlendirilmesi <i>Monitoring and assessing of total suspended solids transport in the Değirmendere, Yomra, and Galanima stream watersheds (Trabzon Province, NE Turkey)</i>	803
Mehmet AYBEKE	Ophrys mammosa subsp. mammosa Desf.'nin stolon anatomisi <i>Stolon anatomy on Ophrys mammosa subsp. mammosa Desf.</i>	818
Fikret POLAT	Sıkıştırma oranının dizel motorun emisyon ve performans karakteristiklerine etkisinin Diesel RK yazılımı kullanılarak incelenmesi <i>Investigation of the effect of compression ratio on the emission and performance characteristics of diesel engines with using Diesel RK software</i>	826
Ahmet Numan ÖZAKIN Abdüssamed KABAKUŞ	Düzlem yüzey ısı alıcılarda tekli ve çoklu hava jetinin ısı ve akış karakteristiklerine etkisinin sayısal analizi <i>Numerical analysis of the effect of single and cascade air jets on heat and flow characteristics in plane surface heat sinks</i>	839
Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI Merve SOĞANCIOĞLU KALEM	Betonda atık vermikülit kullanımının betonun mineralojik ve kimyasal yapısına olan etkisinin incelenmesi <i>Investigation of the effect of using waste vermiculite in concrete on the mineralogical and chemical structure of concrete</i>	848
Salih Hakan YETGİN Hüseyin ÜNAL	Talc/EPDM/Polipropilen polimer kompozit köpük üretimi ve üretim şartlarının optimize edilmesi <i>Production of Talc/EPDM/Polypropylene polymer composite foam and optimizing production conditions</i>	864

Hasan BAŞ	Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi <i>Investigation of the effects of surface roughness on friction behavior in hydrodynamic radial plain bearings</i>	877
Ruhi YEŞİLDAL	Farklı ısı işlemlerin takım çeliklerinin yorulma mukavemeti üzerine etkileri <i>The effects of different heat treatments on the fatigue strength of tool steels</i>	888
Kezban ALTAY Mücahit PEHLUVAN Rafet ASLANTAŞ	Aras Vadisi'nde yetişen yerel şeftali genotiplerinde (Prunus persicaL.) varyasyonun değerlendirilmesi <i>Evaluation of variation local peach (Prunus persica L.) genotypes grown in Aras Valley</i>	896
Nesrin DURSUN	Ardahan ili şebeke sularının bazı fiziksel kimyasal ve mikrobiyal parametrelerinin mevsimsel olarak incelenmesi <i>Seasonal examination of certain physical, chemical, and microbial parameters of Ardahan city tap waters</i>	904
Emek DEMİRCİ AKARSU Safiye ÖZTÜRK	The existence problem of difference sets <i>Fark kümelerinin varlık problemi</i>	917
Emine AYTAR	Atmosferik basınçta imidazolyum tuzları ile CO₂'nin halkalı karbonatlara dönüşümü <i>Conversion of CO₂ to cyclic carbonates by imidazolium salts at atmospheric pressure</i>	923
Özge ERDEM	Investigation of ball milling effect on superconducting properties of oleic acid added bulk MgB₂ superconductors produced by two different methods <i>İki farklı metot ile üretilen oleik asit katkılı külçe MgB₂ süperiletkenlerin süperiletkenlik özellikleri üzerine bilyeli öğütme etkisinin araştırılması</i>	936
Ümit AYATA Nevzat ÇAKICIER Levent GÜRLEYEN	UV kürlenmeli vernik uygulanmış karakavak odununda renk, parlaklık, salınımsal sertlik ve yüzeye yapışma direnci üzerine yapay yaşlandırmanın etkisi <i>The effect of artificial aging on color, glossiness, pendulum hardness and adhesion to the surface of black poplar wood treated with UV curable varnish</i>	951

Derleme Makalesi / Review Article

Süleyman İNAN	Stronsiyum gideriminde sentetik inorganik iyon değiştiricilerin kullanımı <i>Use of synthetic inorganic ion exchangers in strontium removal</i>	964
Süleyman İPEK Kasım MERMERDAŞ Alparslan ULUSOY Yusuf İŞIKER	Atık lastiklerin, beton üretiminde agrega olarak kullanımının betonun taze ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması <i>Investigating the effect of the use of waste tires as aggregate in concrete production on the fresh and mechanical properties of concrete</i>	982

Production of high-transparent MgO films by radio-frequency sputtering method

Yüksek geçirgen MgO filmlerin radyo frekansı saçıtırma yöntemiyle üretimi

Fatih ŞENASLAN^{*1,a}, Ayhan ÇELİK^{2,b}, Muharrem TAŞDEMİR^{1,c}

¹Gümüşhane University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Department of Mechanical Engineering, 29100, Gümüşhane

²Atatürk University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 25240, Erzurum

• Geliş tarihi / Received: 20.04.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 10.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 12.06.2022

Erratum

In the article with "Şenaslan, F., Çelik, A. & Taşdemir, M. (2022). Production of high-transparent MgO films by radio-frequency sputtering method. Gümüşhane University Journal of Science, 12(1), 320-326. DOI: 10.17714/gumusfenbil.1006430" citation information which was published in the first issue of the twelve volume of the Gümüşhane University Journal of Science, it was noticed that the "4. Conclusion (4. Sonuçlar)" section of the acceptance article Publisher was unintentionally removed by preparing for a publish, although authors given a "4. Conclusion (4. Sonuçlar)" section in the acceptance article. We apologize to the readers for the mistake. In this erratum, the unintentionally removed conclusion section is presented in the related article.

Düzeltilme

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'nin onikinci cildinin birinci sayısında yer alan "Şenaslan, F., Çelik, A. & Taşdemir, M. (2022). Production of high-transparent MgO films by radio-frequency sputtering method. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(1), 320-326. DOI: 10.17714/gumusfenbil.1006430" referanslı makalenin kabul metninde yazarlar tarafından "4. Conclusion (4. Sonuçlar)" bölümü verilmesine rağmen makale yayına hazırlanma aşamasındayken sehven çıkarıldığı fark edilmiştir. Yapılan bu hatadan dolayı okuyucularımızdan özür dileriz. Bu düzeltme yazısında ilgili makalenin metin içerisinde sehven çıkarılan "4. Conclusion (4. Sonuçlar)" bölümü sunulmuştur.

Orijinal Makalenin DOI numarası: 10.17714/gumusfenbil.1006430

^{*a} Fatih ŞENASLAN; fsenaslan@gumushane.edu.tr, Tel: (0456) 233 10 00, orcid.org/0000-0003-0498-6332

^b orcid.org/0000-0002-8096-0794

^c orcid.org/0000-0003-3291-108X

4. Conclusion

4. Sonuçlar

In this study, high-transparent MgO thin films were successfully produced by RF magnetron sputtering method. The produced films were annealed at 400 °C for 4h. The obtained results are given below. The deposition rate of MgO films decreased with the increasing working pressure. XRD data revealed that the annealing process considerably increased the crystallinity of the MgO film. The

crystallization rate of the films decreased while the crystal quality relatively increased with increasing working pressure. Uv–Vis spectroscopy showed that the working pressure was highly effective on the optical properties of MgO films. The optical transmittance of the films increased with increasing working pressure and reached approximately 97% at 600 nm wavelength for the 10 mTorr growth condition. The band gap energy expanded with the effect of increasing working pressure.

Jeotermal ısı kaynaklı Organik Rankine Çevriminde kuru ve izantropik akışkanların çevresel etkilerinin ve termodinamik performanslarının karşılaştırılması

Comparison of the environmental effects and thermodynamic performances of dry and isentropic fluids in a geothermal heat sourced Organic Rankine Cycle

Sadık ATA^{*1,a}, Mehmet AKSOY^{2,b}, Remzi ŞAHİN^{1,c}, Ali KAHRAMAN^{3,d}

¹KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42020, Konya

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı 42090, Konya

³Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya

• Geliş tarihi / Received: 05.12.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 31.03.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 14.04.2022

Öz

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), düşük sıcaklık aralığında su yerine organik akışkanın kullanıldığı bir elektrik üretim sistemidir. ORÇ, elektrik üretmek için atık ısıyı değerlendirmek amacıyla santrallerde kullanılmaktadır. Bu çalışmada kuru ve izantropik akışkanlar kullanılarak ORÇ modelinin çevresel ve termodinamik performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Jeotermal uygulamaları kapsamında ısı kaynağı sıcaklığı 110 °C olarak belirlenmiştir. Buharlaşma sıcaklığının 65-100 °C arasında değişmesinin sistem performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Performans parametreleri olarak pompa işi, türbin işi, giren ısı, tersinmezlik değerleri, ısı verim ve ekserji verimleri ORÇ için tespit edilmiştir. Termodinamik analizi Engineering Equation Solver (EES) kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda R601 akışkanıyla türbin işi ve ısı verim yönünden en yüksek değerlerin sırasıyla 54.72 kJ/kg ve %11.34 olduğu, R141b akışkanıyla ise 32.84 kJ/kg ve %11.91 olduğu görülmüştür. Kuru ve izantropik akışkanlardan en iyi performans gösteren bir akışkan ORÇ için önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Jeotermal ORÇ, Organik akışkan, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), Termodinamik performans

Abstract

Organic Rankine Cycle (ORC) is an electricity generation system in which organic fluid is used instead of water in the low temperature range. ORC is used in power plants to use waste heat to generate electricity. In this study, thermophysical, environmental and thermodynamic performance comparisons of the ORC model were made using dry and isentropic fluids. Within the scope of geothermal applications, the heat source temperature was determined as 110 °C. The effect of changing the evaporation temperature between 65-100 °C on system performance was determined. As performance parameters, pump work, turbine work, input heat, irreversibility values, thermal efficiency and exergy efficiency have been determined for ORC. Thermodynamic analysis was performed using Engineering Equation Solver (EES). As a result of this study, it was observed that the highest values in terms of turbine work and thermal efficiency with R601 fluid were 54.72 kJ/kg and 11.34%, respectively, and 32.84 kJ/kg and 11.91% with R141b fluid, respectively. A fluid that performs best from dry and isentropic fluids has been proposed for ORC.

Keywords: Geothermal ORC, Organic fluid, Organic Rankine Cycle (ORC), Thermodynamic performance

*a Sadık ATA; sadik.ata@karatay.edu.tr, Tel: (0507) 293 03 87, orcid.org/0000-0002-6791-593X

^b orcid.org/0000-0002-1777-1341

^c orcid.org/0000-0001-7656-7538

^d orcid.org/0000-0002-5598-5017

1. Giriş

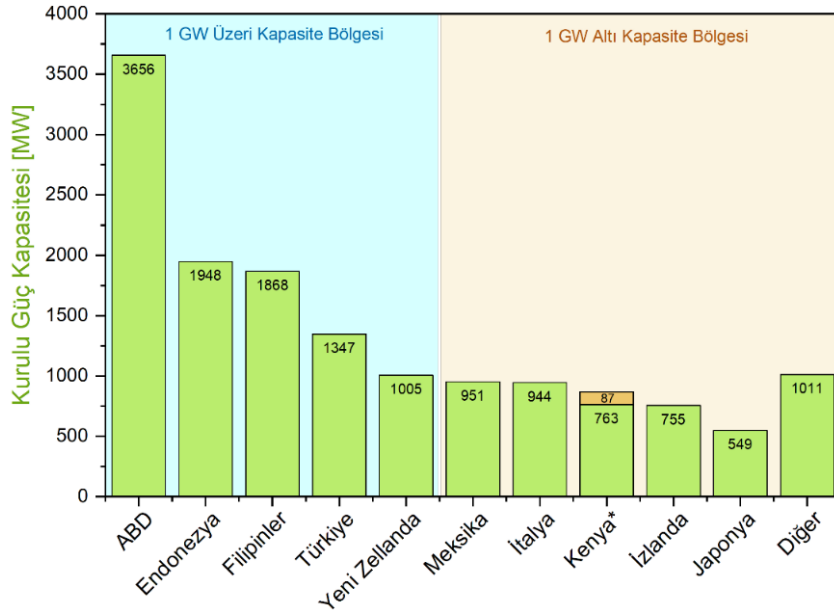
1. Introduction

Elektrik ihtiyacı, günümüzde karşılanması gereken en büyük taleplerden birisidir. Teknolojinin gelişmesi ve elektronik ekipmanların kullanımının artması da güç tüketimini günden güne artırmaktadır. Talebin karşılanması amacıyla elektrik üretimi için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar hidro, termik, nükleer ve yenilenebilir kaynaklı yöntemlerdir. Örneğin, termik santrallerde elektrik üretimi fosil yakıtların yakılması ile açığa çıkan enerjinin akışkanlara aktarılması ve ardından ortaya çıkan yüksek basınçlı buharın türbin kanatçıklarını döndürmesiyle gerçekleştirilir.

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) herhangi bir ısı kaynaktan alınan enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan bir teknolojidir. Bu ısı kaynakları; güneş, jeotermal, biyokütle veya atık ısılarından oluşabilir. Sistemin "Organik" olarak isimlendirilmesindeki ve onu klasik Rankine çevriminden ayıran en büyük farklılık çevrimde

buhar-su kullanımının yerine organik bir akışkanın tercih edilmesidir. ORÇ'nin ideal sıvısı genellikle sıfır veya pozitif eğimli "İzantropik" veya "Kuru Akışkan" olup aşırı ısınma gerektirmezler. Klasik Rankine çevrimi aşırı ısınma gerektirir, bu nedenle türbin giriş sıcaklığı ORÇ sisteminden daha yüksektir. Bu sebeplerle organik akışkan kullanımı türbin bıçaklarının imalatı için yüksek ısı dayanım gereksinimlerini düşürdüğü gibi maliyeti de alt seviyelere çekmektedir.

Türkiye son yıllarda artan enerji ihtiyacını karşılamaya yollarını ararken jeotermal güç santralleri konusunda da oldukça büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Halihazırda elektrik üretimi yapan 50'nin üzerinde jeotermal santral ve yapımı devam eden santraller bulunmaktadır. Özellikle Ege bölgesinde Aydın, Denizli ve Manisa illeri çevresinde yoğunlaşan bu santraller sayesinde Türkiye Şekil 1'de görüldüğü gibi dünyada jeotermal enerji santralleri kurulu güç kapasitesi sıralamasında 1347 MW'lık kurulu güç kapasitesi ile 1 GW ve üzeri kapasite grubunda yer almaktadır.



Şekil 1. Jeotermal enerji santralleri kurulu güç kapasitesinde ilk 10 ülke (Ahmadi vd., 2020).
Figure 1. Top 10 countries in installed power capacity of geothermal power plants.

Literatüre bakıldığında ORÇ analizi ve akışkan seçimi konusunda farklı çalışmalar olduğu görülmektedir. Farklı organik akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizi ve parametre optimizasyonu yapmışlardır. Araştırma sonuçları, sabit 277 °C ısı kaynağı sıcaklığı için R123 akışkanının en yüksek verime ulaştığını ve aynı zamanda en az tersinmezliğe sahip olduğunu göstermektedir (Roy vd., 2011). Uygun akışkan seçmek için genetik algoritma yöntemini kullanarak bir optimizasyon

çalışması yürütmüşlerdir. Araştırma sonucunda tersinmezlik performansı olarak Novec649 akışkanını ve ısı transfer alanı açısından benzen akışkanını önermişlerdir (Cataldo vd., 2014). Atık ısı ORÇ'de enerji ve ekserji analizini R245fa sıvısını kullanarak yapmıştır. Buharlaştırıcı basıncının enerji ve ekserji verimliliği üzerinde büyük bir etkisi olduğunu gözlemlemiştir (Kaşka, 2014). Karışım akışkanları ile tasarlanan ORÇ'de $\Delta T_{PP,e}$ ve $\Delta T_{PP,k}$ 'nin (evaporatör-kondenser pinch point sıcaklık farkı) belirlenmesi üzerine çalışma

yapmışlardır. Değerlendirme kriteri olarak ekserji-ekonomik performansı belirlemişlerdir. Karışım akışkanları için optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 3-6 °C arasında olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır (Wu vd., 2014). ORÇ'de organik akışkan ve çalışma koşullarını ΔT_{PP} 'ye bağlı olarak belirleyebilen bir yöntem üzerine çalışmışlardır. Isı kaynağının giriş sıcaklığı ile akışkanın kritik sıcaklığı arasında uygun bir fark olduğunda maksimum güce ulaşabileceğini ve akışkanın kritik bölgenin yakınında buharlaştığını belirlediler (Yu vd., 2015). Jeotermal enerji kaynağı ile elektrik üreten ORÇ'nin analizi üzerinde çalışma yapmıştır. R245fa çevrim akışkanı olarak kullanılmıştır. Hesaplanan veriler ile toplam türbin gücü 250 kW olan analiz için gerekli demo bir model oluşturulmuştur (Ağırkaya, 2015). Bir işletmenin biyokütleden elde edilen termal ısı verileri ile ORÇ'nin termodinamik analizini yapmıştır. Çalışma sonucunda 891.76 kW net elektrik üretimine göre sistem geri ödeme süresi 3.24 yıl olarak hesaplanmıştır. ORÇ'de birim ekserji maliyeti en yüksek ekipmanın kondenser olduğu tespit edilmiştir (Pelit, 2015).

ORÇ termodinamik analizini EES yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmasında, buharlaştırıcı girişindeki farklı fazda bulunan suyun sistem verimliliğine etkisi incelenmiştir. Buharlaştırıcı bileşenlerinin sistem performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını belirlemişlerdir (Tumen Ozdil vd., 2015). ORÇ'de HFE7100 ve FC72 akışkanlarını kullanarak sistemin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmada farklı sıcaklık aralıklarında ORÇ için uygun akışkan seçimi ile sistem verimliliğini maksimize etmeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda FC72 akışkanını belirlenen parametreler için en uygun seçim olduğu belirlenmiştir (Tumen Ozdil vd., 2016). Sistemde kullanılan organik akışkanlar karşılaştırılmıştır. Akışkan tipinin türbin giriş sıcaklığının ısı verimine etkisinin çok önemli olduğu belirlenmişlerdir. Araştırma sonuçları, izantropik sıvının etkinliğinin kuru akışkan ve ıslak akışkandan daha iyi olduğunu göstermiştir (Javanshir & Sarunac, 2017). R1234ze ile tasarladıkları kritik altı ORÇ ve transkritik ORÇ sisteminin performans analizini yapmışlardır. Bu çalışma aynı zamanda önceki araştırmalarda da kullanılan R245fa ve R600a akışkanlarının R1234ze akışkanı ile karşılaştırması yapılmıştır. Kaynak sıcaklığı 100 °C ile 167 °C olduğunda R1234ze'nin R245fa ve R600a'dan sırasıyla %31.4 ve %25.8 fazla net güç değerine sahip olduğu belirlenmiştir (Li vd., 2017). ORÇ sistemlerinde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) – Entropi

yöntemi kullanarak $\Delta T_{PP,e}$ optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Farklı akışkanlar kullanılan ORÇ'nin ekonomik ve ısı performansını değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda maksimum güç çıktısına R141b ile maksimum ısı verim ve ekserji verim değerlerine ise R11 ile ulaştıklarını belirtmişlerdir (Wang vd., 2017). ORÇ enerji ve ekserji analizi için farklı akışkanlar kullanmışlardır. Performans parametreleri olarak buharlaşma sıcaklığını ve ısı kaynağı sıcaklığını belirlenmiştir. Isıl verim, net güç, toplam tersinmezlik ve ekserji verimliliği göz önüne alındığında, R600a akışkanını en iyi performansı gösterdiğini belirlemişlerdir (Özdemir & Kılıç, 2017). ORÇ'nin bileşenlerinde oluşan tersinmezlik değerleri üzerine çalışma yapmışlardır. Buharlaşma basıncının 250 kPa'dan 400 kPa'ya artması sonucu yüksek basınç oranından dolayı türbin tersinmezliğinin %32 arttığını belirtilmiştir. 250 kPa ve 20 °C aşırı kızdırma sıcaklığı altında toplam tersinmezliğin %79,6'sının buharlaştırıcıda, %10,9'unun ise yoğunlaştırıcıda, %9,4'ünün ise türbinde meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Kahraman vd., 2018a). R134a ve R152a akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin enerji analizini yapmışlardır. Çalışma sonucunda R152a kullanılarak tasarlanan sistemin R134a'ya göre daha fazla ısı girdisine gerek duyduğu belirlenmiştir. Çalışmada maksimum ısı verim, R134a ve R152a akışkanları için sırasıyla %8.123 ve %9.351 olarak bulunmuştur (Kahraman vd., 2018b).

Kuru akışkan ile çalışan rejeneratif ORÇ sisteminin termodinamik analizini ve tasarımını Epsilon-Professional yazılımını kullanarak yapmışlardır. Farklı çalışma koşulları altında ideal akışkanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaptıkları çalışmada kuru akışkan olan sistemde minimum sıcaklığın sabit olması durumunda maksimum sıcaklığın artması ile ısı veriminin arttığı görülmüştür. Rejeneratif ORÇ sisteminde en iyi ve en kötü ısı verim değerlerinin sırasıyla R113 ve R227ea akışkanlarında olduğu tespit edilmiştir (Javanshir vd., 2017). ORÇ'nin atık ısı uygulaması kapsamında 160 °C'de baca gazının ısı kaynağı olarak kullanıldığı reküperatörlü ORÇ'nin termodinamik ve ekonomik analizini MATLAB programını kullanarak yapmışlardır. ORÇ'de daha uygun bir organik akışkan seçimi ve optimum aşırı kızdırma sıcaklığının belirlenmesi için optimizasyon tekniği olarak bulanık çok kriterli değerlendirme yönteminden yararlanılmışlardır. Uygulanan optimizasyon ile en iyi performansı bütan akışkanı optimum buharlaşma sıcaklığının 100 °C ve aşırı kızdırma sıcaklığının da 5 °C olduğu durumda göstermiştir (Han vd., 2017). Jeotermal

ORÇ uygulamaları kapsamında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin termodinamik performansına etkisini incelemişlerdir. $\Delta T_{PP,e}$ 'nin termodinamik ve ekonomik performans için önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Düşük $\Delta T_{PP,e}$ 'nin daha fazla türbin net gücünü sağlayacağı fakat ısı transfer alanını arttıracığı için ekonomik yönden olumsuz etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir (Sun vd., 2018). Çok amaçlı yaklaşım tekniğini kullanarak ORÇ sistemlerinde optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerini belirlemişlerdir. Ekonomi ve çevre olmak üzere iki amaç fonksiyonu üzerinde çalışmışlardır. Ekonomi fonksiyonunu toplam ısı transfer alanının net güce oranı; çevre fonksiyonunu ise toplam tersinmezliğin sıcak kaynaktaki ekserji düşüşüne oranı olarak tanımlamışlardır. Çalışmaları sonunda R245fa akışkanı kullanılarak optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 7-10 °C arasında olması gerektiğine ulaşmışlardır (Jankowski vd., 2019).

50-100 °C sıcaklık aralığında jeotermal kaynaklar için ORÇ sisteminin performansını dört farklı akışkan kullanarak araştırmıştır. Performans parametreleri birinci ve ikinci yasa verimleri, net iştir. Çalışma sonucunda R141b birinci ve ikinci yasa verimlerinde öne çıkarken net iş olarak R134'nın en iyi performansı gösterdiğini belirlemiştir (Akkurt, 2020). 2.7 MW kapasiteli Afyon Jeotermal Enerji Santrali'nin ORÇ tasarımını, santralin termoeconomik performans değerlendirilmesi ve optimizasyonu gerçek santral verilerini kullanarak yapmıştır. Çalışma sonucunda üretilen elektriğin ekserjetik maliyetini 0.0233 \$/kWh ve geri ödeme süresini 3.6 yıl olarak, optimize edilmiş ekserjetik maliyetini 0.0176 \$/kWh ve geri ödeme süresini 2.87 yıl olarak belirlemiştir (Yılmaz, 2020). İki fazlı flaş genişlemeli ORÇ ve Zeotropik akışkanları kullanarak tasarlanmış ORÇ konfigürasyonları üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında net güç maksimizasyonu amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. En yüksek ısı verimin görüldüğü noktada maksimum net güce ulaşılmadığı bundan dolayı da ısı verim maksimizasyondan daha önemli olarak net güç maksimizasyonunun incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda, düşük ısı kaynağı sıcaklıklarında ve yüksek kondenser fan gücünde zeotropik akışkanlı ORÇ'nin daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir (Woodland vd., 2020).

Literatür kapsamında ele alınan çalışmalarda kullanılan yöntemlere bakıldığında termodinamik analiz için Engineering Equation Solver (EES) yazılımından yararlanıldığı, termodinamik

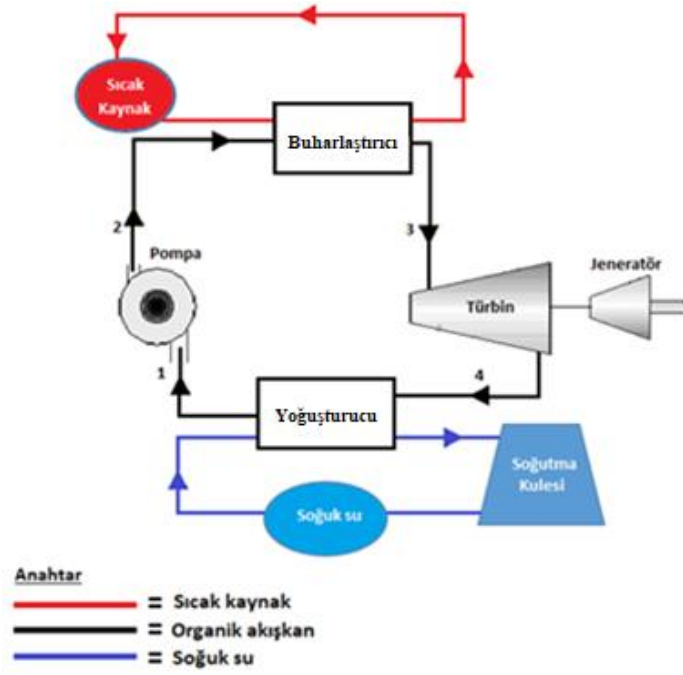
optimizasyon için ise daha çok genetik algoritma yöntemine başvurulduğu görülmektedir. Bazı çalışmalarda tek bir organik akışkan üzerinden ORÇ performansı incelenirken, bazı çalışmalarda da çoklu organik akışkanın farklı parametrelere bağlı olarak performans karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmalarda farklı performans parametreleri belirlendiğinden çalışmalar sonucunda önerilen akışkanların farklı olduğu görülmektedir.

Özetle, literatür incelendiğinde organik akışkanların performansları ile ilgili çok fazla çalışma olduğu görülmektedir. Çoğu çalışmada tek veya iki parametre altında incelenen akışkanlardan iyi performans gösteren akışkanın tavsiye edildiği görülmektedir. Fakat, türbin işi bakımından iyi sonuç veren bir akışkanın her zaman ısı verim performansının da iyi olmadığı görülmektedir. Bazı akışkanlarda gereken ısı girdisi ihtiyacının fazla olmasından dolayı ısı verim değeri beklenenden düşük olabilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada akışkanların farklı çıktılar altında (gereken pompa işi, ısı girdisi, türbin işi, ısı verim, tersinmezlik ve ekserji verimi) sergiledikleri performans durumları incelenmiştir. Bu çıktılar altında performansların değişken olduğu tespit edilmiştir. Bunun için literatürde çok fazla kullanılan 12 organik akışkanın (6 kuru-6 izantropik) performansı farklı parametreler bakımından karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile ORÇ üzerine çalışan kişilerin amaç fonksiyonuna (türbin gücü maksimizasyonu, ısı verim maksimizasyonu, tersinmezlik minimizasyonu gibi) bağlı olarak akışkan performansını belirleyebilmesi amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve metot

2.1. Material and method

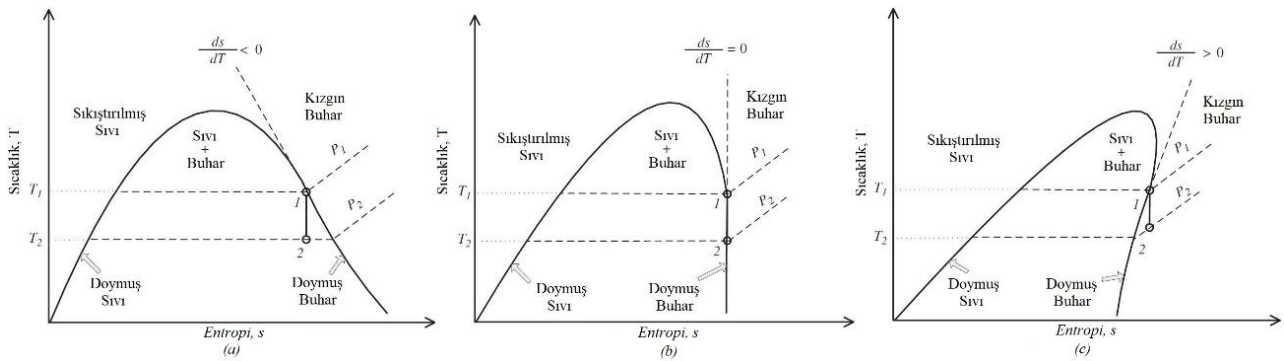
Bu çalışmada kuru ve izantropik akışkanlar kullanılarak tasarlanmış ORÇ'nin termodinamik performansı Engineering Equation Solver (EES) ile belirlenmiştir. EES yazılımının kullanılmasının nedeni, kütüphanesinde bulunan zengin içerikli farklı organik akışkan özellikleridir. Termodinamik analiz için gerekli denklemler sisteme girilerek, aynı anda birçok parametrede meydana gelen değişikliklere yanıt olarak istenen sonuçlar elde edilebilir. Farklı akışkanlar kullanmanın sistem performansı üzerindeki etkisini görmek EES sayesinde oldukça kolaydır. EES yazılımının kütüphane ve denklem çözme özelliklerinden faydalanılarak termodinamik modeller oluşturulabilir.



Şekil 2. İdeal Rankine çevrimi çalışma prensibi.
Figure 2. Working principle of ideal Rankine cycle

ORÇ’de kuru ve izantropik olarak farklı tiplerde akışkanların sistem performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Şekil 2’de ORÇ çalışma prensibi gösterilmiştir. Organik akışkan ilk olarak pompada basınçlandırıldıktan sonra buharlaştırıcıdan geçerken sıcak kaynak üzerinden ısı transferi gerçekleşip sıcaklığı artırılmaktadır. Buharlaşan akışkan yüksek basınç ve sıcaklıkta türbin kanatçıklarına çarparak döndürür, şafttan türbine bağlı olan jeneratör vasıtasıyla elektrik üretilir. Türbinden çıkan akışkan yoğuşturucudan geçirilerek yoğuşturulur ve döngü tamamlanır.

Bu çalışmada ORÇ’de farklı akışkan gruplarının etkisi belirlenmiştir. Akışkanlar doymuş buhar eğrisinin eğimine göre Şekil 3’te gösterildiği gibi kuru, izantropik ve ıslak olmak üzere üç grupta incelenir. Akışkan tipini önemli kılan en önemli etken türbinde akışkanın genişlemesinden sonra kuruluk oranının akışkanın tipine göre değişmesidir. Akışkanların T-s diyagramlarındaki doyma eğrilerinin eğimi pozitif olduğunda akışkan kuru, negatif olduğunda ıslak ve sonsuz olduğunda ise izantropik olarak isimlendirilir (Bao & Zhao, 2013).



Şekil 3. Organik akışkanların t-s diyagramında gösterimi a) Kuru, b) İzantropik, c) Islak.
Figure 3. Representation of organic fluids in t-s diagram a) Dry, b) Isentropic, c) Wet.

Yapılan çalışmalar, kuru ve izantropik akışkanların ORÇ sistemleri için daha uygun olduğunu göstermiştir. Türbinde genişleme sonunda akışkanın ıslak buhar fazına geçmesi türbine zarar verir. Bu durumu engellemek amacıyla ıslak

akışkanlar kullanılan sistemlerde aşırı kızdırma işlemi yapılmalıdır. Fakat kuru veya izantropik akışkanlarda türbinde genişleme esnasında ıslak buhar fazına geçme durumu oluşmamaktadır. Kuru akışkanlarda genişleme sonrasında akışkan fazının

kızgın buhar olması, ıslak buhar içermemesi sistem bileşenlerinin en önemlilerinden biri olan ve su moleküllerinden dolayı hasar görebilen türbin kanatçıklarının aşınmasını önüne geçer (Günaydın, 2016).

Organik akışkanlar kuru, izantropik olmak üzere iki farklı kategori altında sınıflandırılarak performansı karşılaştırılmıştır. Her bir akışkan türünden 6 akışkan olmak üzere toplam 12 akışkanın performansı aynı tasarım parametreleri altında belirlenmiştir. Bu akışkanlar aşağıda belirtilmiştir.

- **Kuru akışkanlar:** RC318, R114, R600, R600a, R601, R601a
- **İzantropik akışkanlar:** R141b, R123, R245fa, R142b, R124, R227ea

ORÇ'nin jeotermal ısı kaynaklı uygulamaları kapsamında ısı kaynağı sıcaklığı 110 °C olarak sabit belirlenmiştir. Soğutma suyu sıcaklığı ise 25 °C, türbin ve pompa izantropik verimleri de %75 olarak ele alınmıştır. Ölü nokta basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 100 kPa ve 25 °C olarak kabul edilmiştir. Bu bölümde yapılan diğer kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Bütün prosesler kararlı şartlardadır.
- Buharlaştırıcı ve yoğuşturucudaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.
- Analizde kullanılan tüm bileşenler adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzey ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Sistem için genel tanımlar ve denklemler aşağıda verilmiştir (Çengel & Boles, 2007; Safarian ve Aramoun, 2015).

Kütle dengesi (Toplam Kütle Girişi = Toplam Kütle Çıkışı);

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

Enerji dengesi (Toplam Enerji Girişi = Toplam Enerji Çıkışı);

$$\sum E_g = \sum E_ç \quad (2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * (h_ç - h_g) \quad (3)$$

Ekserji dengesi (Toplam Ekserji girişi = Son Ekserji + Ekserji Tüketimi + Ekserji Yıkımı);

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_s + \dot{E}x_t + \dot{E}x_y \quad (4)$$

Sistemdeki bileşenlerin enerji analizinde pompa işi (5), buharlaştırıcı ısı girdisi (6), türbin işi (7), yoğuşturucudan atılan ısı miktarı (8), için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$W_p = (h_2 - h_1) = (h_{2s} - h_1)/\eta_p \quad (5)$$

$$Q_b = (h_3 - h_2) \quad (6)$$

$$W_t = (h_3 - h_4) = (h_3 - h_{4s})\eta_t \quad (7)$$

$$Q_y = (h_4 - h_1) \quad (8)$$

Sistemdeki net iş (9) ve ısı verim (10) için kullanılan denklemler aşağıdaki verilmiştir.

$$W_{net} = W_t - W_p \quad (9)$$

$$\eta_{Isul} = W_{net}/Q_b \quad (10)$$

Sistemdeki bileşenlerin ekserji analizinde pompa (11), buharlaştırıcı (12), türbin (13) ve yoğuşturucu (14) için kullanılan tersinmezlik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$i_p = T_0(s_2 - s_1) \quad (11)$$

$$i_b = T_0[(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_h] \quad (12)$$

$$i_t = T_0(s_4 - s_3) \quad (13)$$

$$i_y = T_0[(s_1 - s_4) + (h_4 - h_1)/T_c] \quad (14)$$

Sistemdeki toplam tersinmezlik (15), harcanan ekserji (16) ve ekserji verimi (17) için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$i_{Toplam} = i_p + i_b + i_t + i_y \quad (15)$$

$$e_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]Q_b + W_p \quad (16)$$

$$\eta_{II} = 1 - i_{Toplam}/e_{harcanan} \quad (17)$$

Ortalama ısı kaynağı ve soğutma suyu sıcaklıkları da denklem 18 ve 19'da belirtilmiştir.

$$T_h = (T_{h,i} - T_{h,o})/\ln(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (18)$$

$$T_c = (T_{c,i} - T_{c,o})/\ln(T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (19)$$

Tablo 1’de ORÇ tasarımında kullanılan kuru ve izantropik akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Seçilen kuru akışkanlardan kaynama noktası sıcaklığı en düşük olan akışkan R600a, izantropik akışkanlarda ise R227ea olarak

belirlenmiştir. Kritik sıcaklık değeri kuru akışkanlar arasından en yüksek olan akışkan R601, izantropik akışkanlar arasında ise R141b olduğu belirtilmiştir.

Tablo 1. Kuru ve İzantropik akışkanların termofiziksel özellikleri (Calm & Hourahan, 2007)

Table 1. Thermophysical properties of dry and isentropic fluids

Akışkanlar	Akış Türü (dT/ds)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Kaynama Noktası (°C)	Kritik Sıcaklık Değeri (°C)	Kritik Basınç Değeri (MPa)
RC318	dT/ds > 0	200.03	-6.00	115.20	2.78
R114	dT/ds > 0	170.92	3.60	145.70	3.26
R600	dT/ds > 0	58.12	-0.50	152.00	3.80
R600a	dT/ds > 0	58.12	-11.70	134.70	3.63
R601	dT/ds > 0	72.15	36.01	196.60	3.37
R601a	dT/ds > 0	72.15	27.80	187.20	3.38
R141b	dT/ds = 0	116.95	32.0	204.40	4.21
R123	dT/ds = 0	152.93	27.80	183.70	3.66
R245fa	dT/ds = 0	134.05	15.10	154.00	3.65
R142b	dT/ds = 0	100.50	-9.10	137.10	4.06
R124	dT/ds = 0	136.48	-12.00	122.30	3.62
R227ea	dT/ds = 0	170.03	-16.40	102.80	3.00

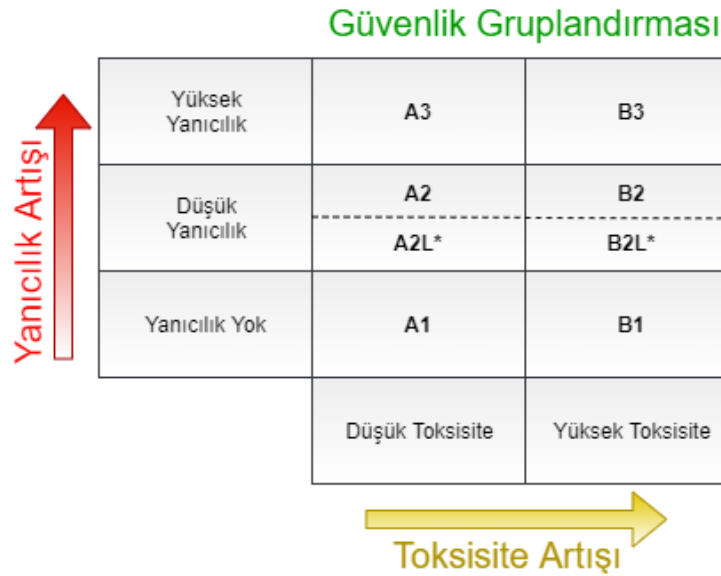
Tablo 2. Kuru ve İzantropik akışkanların çevresel özellikleri (Calm & Hourahan, 2007)

Table 2. Environmental properties of dry and isentropic fluids

Akışkanlar	ASHRAE Standartları Güvenlik Sınıfı	ODP	GWP
RC318	A1	0	10250
R114	A1	1.0	10040
R600	A3	0	20
R600a	A3	0	20
R601	A3	0	20
R601a	A3	0	20
R141b	n.a	0.12	725
R123	B1	0	77
R245fa	B1	0	1030
R142b	A2	0.070	2310
R124	A1	0.020	609
R227ea	A1	0	3220

Tablo 2’de ORÇ tasarımında kullanılan kuru ve izantropik akışkanların çevresel özellikleri karşılaştırılmıştır. ODP (Ozon Delme Potansiyeli-Ozone Depletion Potential) 8 akışkan için 0 olduğu ve GWP (Küresel Isınma Potansiyeli-Global Warming Potential) değerinin en yüksek RC318 akışkanında olduğu görülmektedir.

Bu bölümde ORÇ tasarımında kullanılan akışkanların çevresel özellikleri kapsamında GWP ve ASHRAQ güvenlik sınıfı belirtilmiştir. ASHRAE güvenlik sınıfına dair gruplandırma da Şekil 4’te verilmiştir.



*Şekil 4'te A2L ve B2L düşük yanıcılık değeri olan ve maksimum yanma hızı 10 cm/s olan akışkanları ifade etmektedir.

Şekil 4. Akışkanların çevresel özelliklerini belirleyen güvenlik gruplandırması.

Figure 4. Safety grouping that determines the environmental characteristics of fluids.

3. Model doğrulaması

3. Model validation

EES ile oluşturulan termodinamik modelin doğruluğunu tespit etmek için kaynak araştırması kapsamında belirlenen bir çalışmadan

yararlanılmıştır. Tablo 3'te aynı tasarım parametreleri altında üç farklı organik akışkan kullanılarak belirlenen ısı verim ve ekserji verim değerleri karşılaştırılmıştır. Tablo 3 incelendiğinde EES ile hazırlanan termodinamik modelin başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

Tablo 3. EES ile hazırlanan modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması

Table 3. Comparison of the model prepared with EES with another study using the same design parameters

Tasarım Parametreleri	Buharlaştırma Sıcaklığı: 75 °C; Yoğuşma Sıcaklığı: 35 °C; Türbin ve pompa izantropik verimi: %70 ve %80			
	R600		R141b	
Organik Akışkanlar Performans Parametreleri	Mevcut Çalışma	Tchanche (2010)	Mevcut Çalışma	Tchanche (2010)
Isıl Verim (%)	4.18	4.236	4.54	4.526
Ekserji Verimi (%)	24.1	24.81	26.7	26.51

4. Bulgular

4. Results

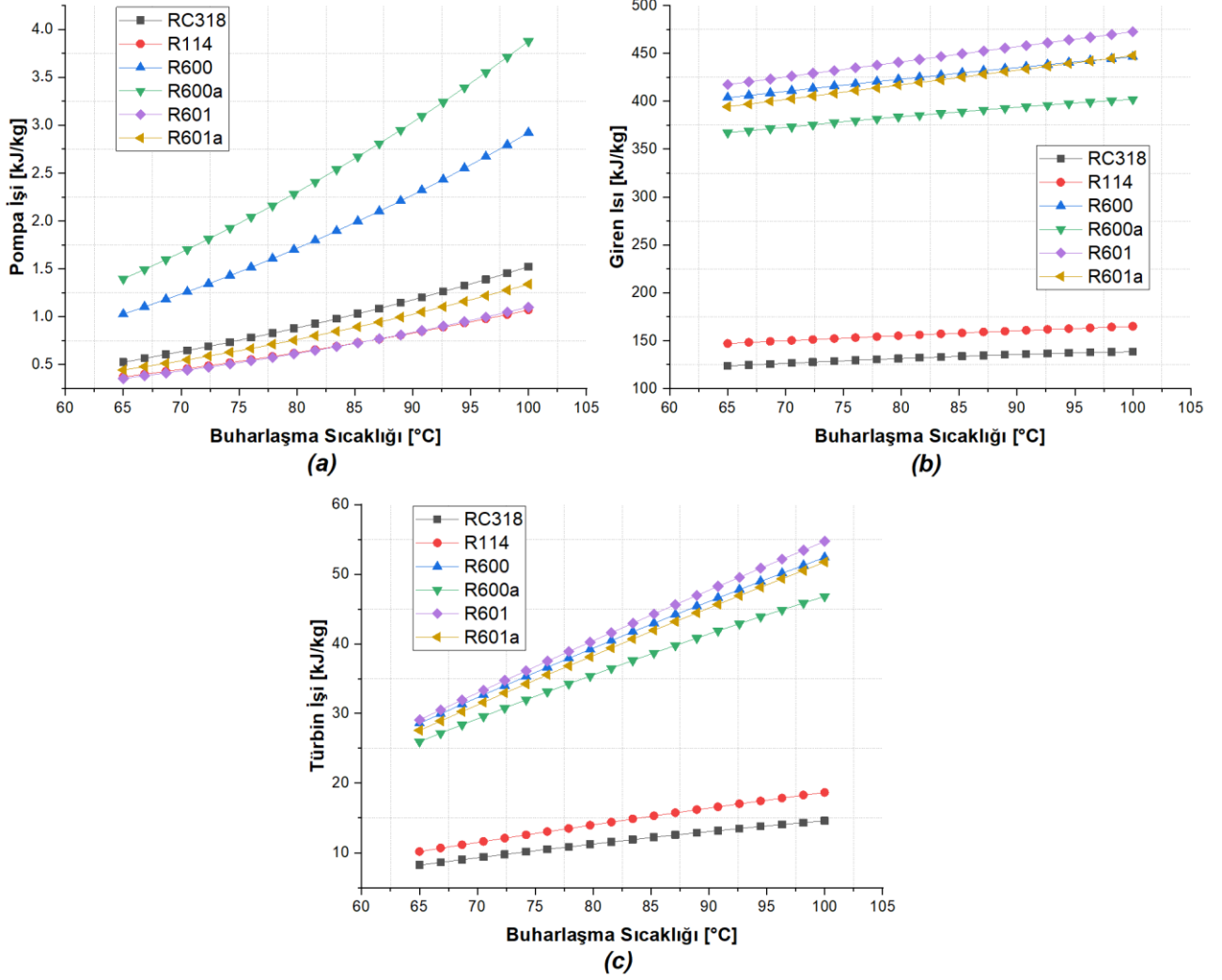
4.1. Organik akışkanların termodinamik performanslarının belirlenmesi

4.1. Determination of thermodynamic performances of organic fluids

Bu bölümde kuru ve izantropik akışkanların ORÇ performansına etkisi belirlenmiştir. Performans parametreleri pompa işi (kJ/kg), türbin işi (kJ/kg), ısı girdisi (kJ/kg), bileşenlerin tersinmezlik değerleri (kJ/kg), toplam tersinmezlik değeri (kJ/kg), ısı verim ve ekserji verimi olarak belirlenmiştir. Isı kaynağı sıcaklığı jeotermal

uygulamaları kapsamında 110 °C olarak belirlenmiştir. Buharlaştırma sıcaklığının 65-100 °C arasında değişmesinin sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Şekil 5'te kuru akışkanların termodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Pompa işi incelendiğinde en yüksek R600a'da, en düşük ise R601 ve R114'te olduğu görülmüştür. Giren ısı değerlerinde ise R601 en yüksek değere sahip iken RC318'in en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Türbin işi incelendiğinde R601 akışkanının en iyi değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

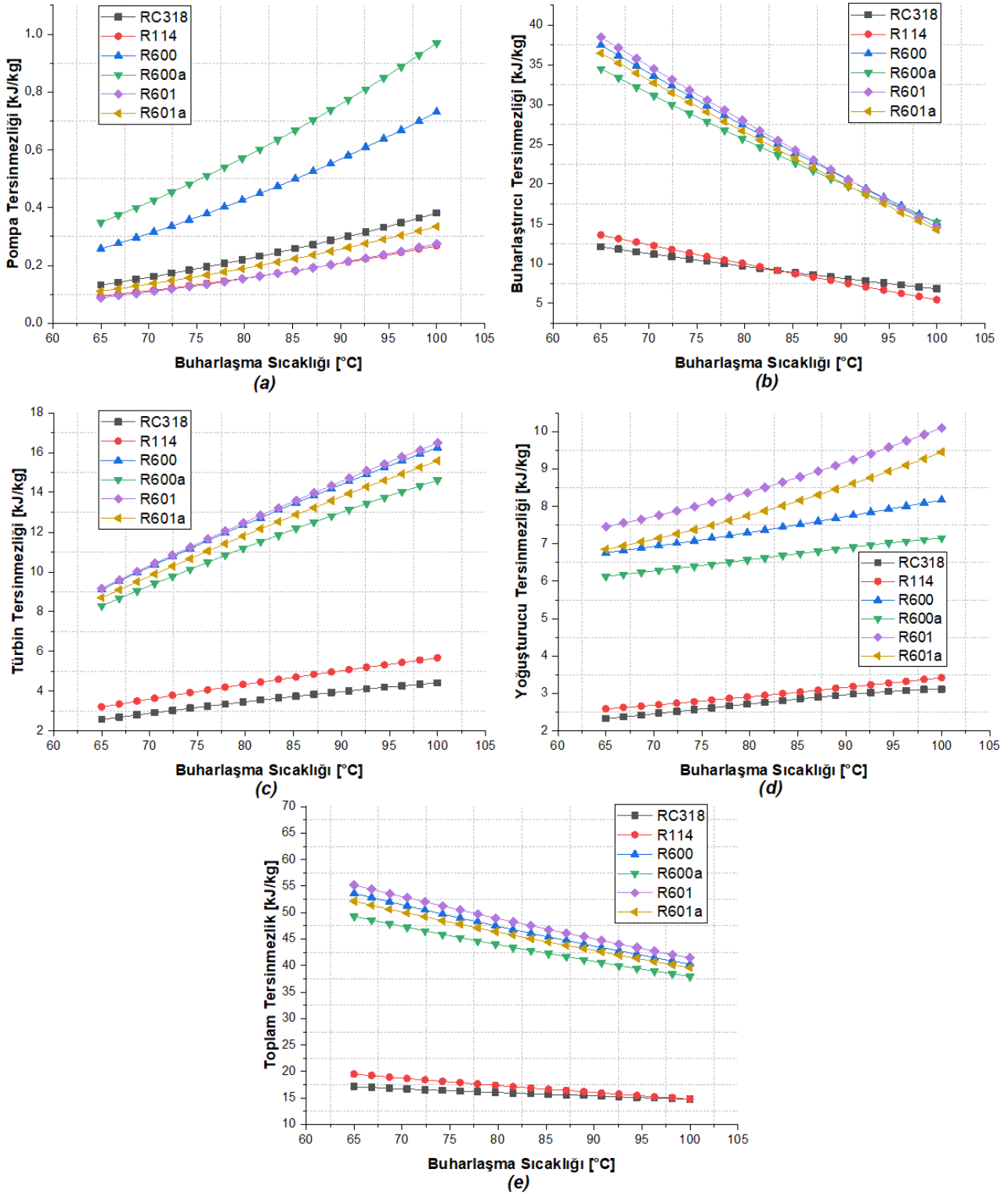


Şekil 5. Kuru akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Pompa İş, (b) Giren Isı (c) Türbin İş.

Figure 5. Comparison of thermodynamic performances of dry fluids (a) Pump Work, (b) Heat Input (c) Turbine Work

Kuru akışkanlar için bileşen bazlı tersinmezlik değerleri ve toplam tersinmezlik değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Pompa için en düşük tersinmezlik değerlerine R114 ve R601 sahipken, türbinde ise RC318'in sahip olduğu görülmüştür. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda ise RC318 ve

R114 akışkanlarında en düşük tersinmezlik değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Toplam tersinmezlik değerlerine bakıldığında ise yine RC318 ve R114 akışkanlarının diğerlerinden daha iyi performans gösterdikleri görülmektedir.

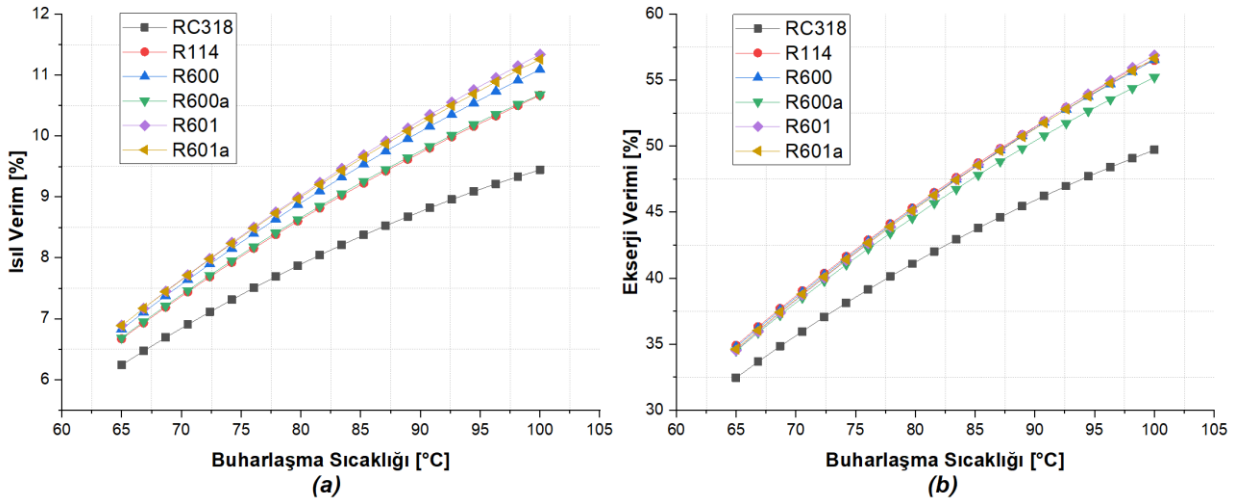


Şekil 6. Kuru akışkanların bileşen ve toplam tersinmezlik değerleri karşılaştırılması (a) Pompa, (b) Buharlaştırıcı, (c) Türbin, (d) Yoğuşturucu, (e) Toplam Tersinmezlik.

Figure 6. Comparison of component and total irreversibility values of dry fluids (a) Pump, (b) Evaporator, (c) Turbine, (d) Condenser, (e) Total irreversibility.

Şekil 7’de verilen kuru akışkanların ısı verim ve ekserji verimleri incelendiğinde, ısı verim yönünden en iyi performansı gösteren akışkanın

R601 olduğu gözlemlenmiştir. Ekserji veriminde ise yine aynı akışkanın öne çıktığı açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Kuru akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Isıl Verim, (b) Ekserji Verimi.
Figure 7. Comparison of thermodynamic performances of dry fluids (a) Thermal Efficiency, (b) Exergy Efficiency

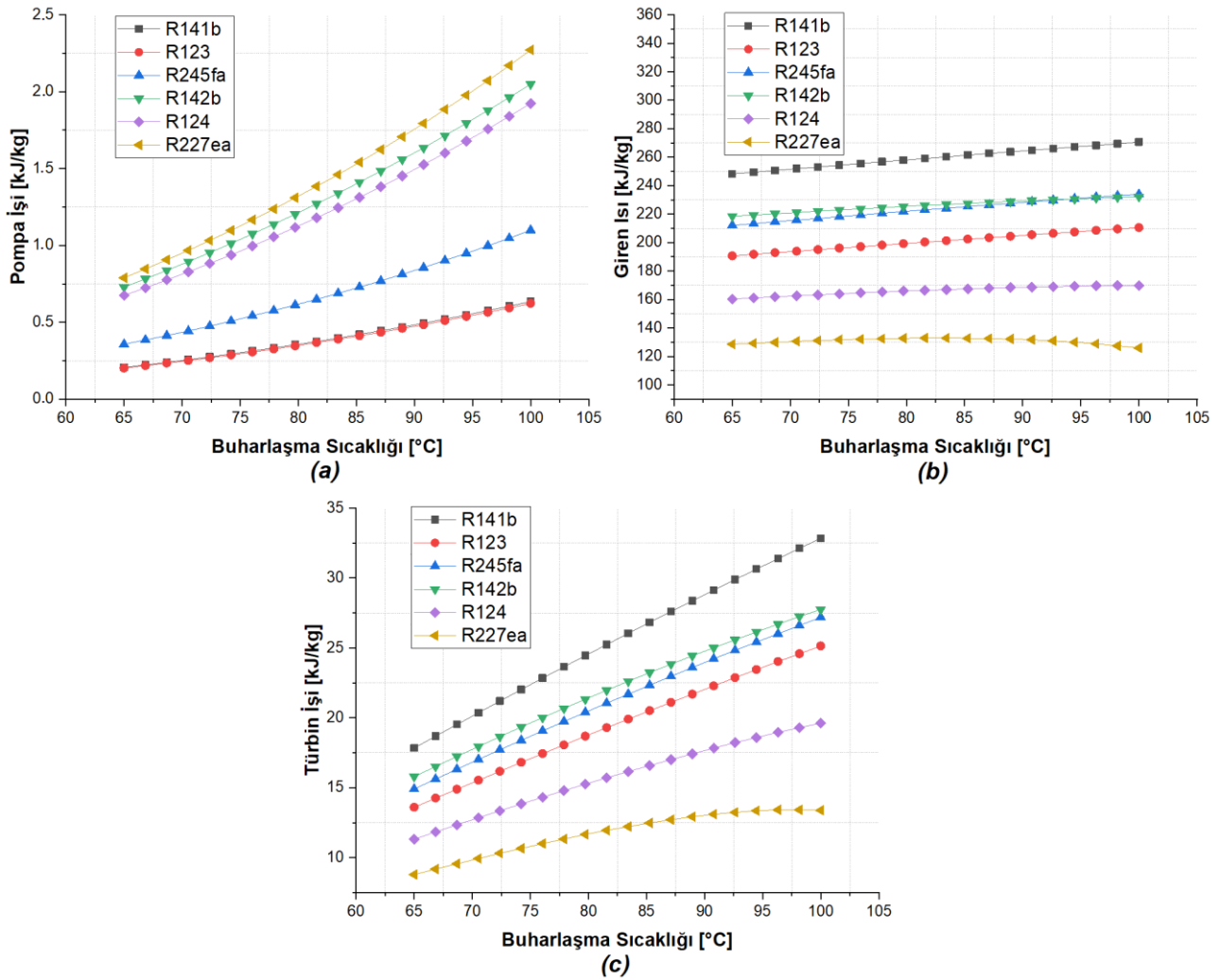
Şekil 5-7 incelendiğinde;

- Türbin işi elde edilmesinde performans sıralaması R601>R600>R601a iken ısı verim değerlerinde ise R601>R601a>R600 olduğu görülmektedir.
- En yüksek ısı girdisi ihtiyacının da R601 akışkanlı tasarımda olduğu belirlenmiştir.
- R600a ve R600 akışkanlarının diğer kuru akışkanlardan daha yüksek bir pompa işi değerine sahip olduğu belirtilmiştir.
- Isıl verim ve ekserji verim performansında ise R114'ün RC318'e göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.
- En yüksek tersinmezlik değerlerine buharlaştırıcıda görüldüğü tespit edilmiştir.

Buharlaşma sıcaklığının artmasıyla ısı kaynağı sıcaklığına yaklaşılmaya yaklaşılmaya tüm akışkanlarda buharlaştırıcı tersinmezliği azalmıştır.

- Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde R601 akışkanının diğerlerinden daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

Şekil 8'de izantropik akışkanların termodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Pompa işi incelendiğinde en düşük değerlerin R141b ve R123'te olduğu görülmüştür. Giren ısı değerleri karşılaştırıldığında ise R141b akışkanı en yüksek değere sahip iken R227ea'nın en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Türbin işinde R141b'nin diğer akışkanlardan daha iyi değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

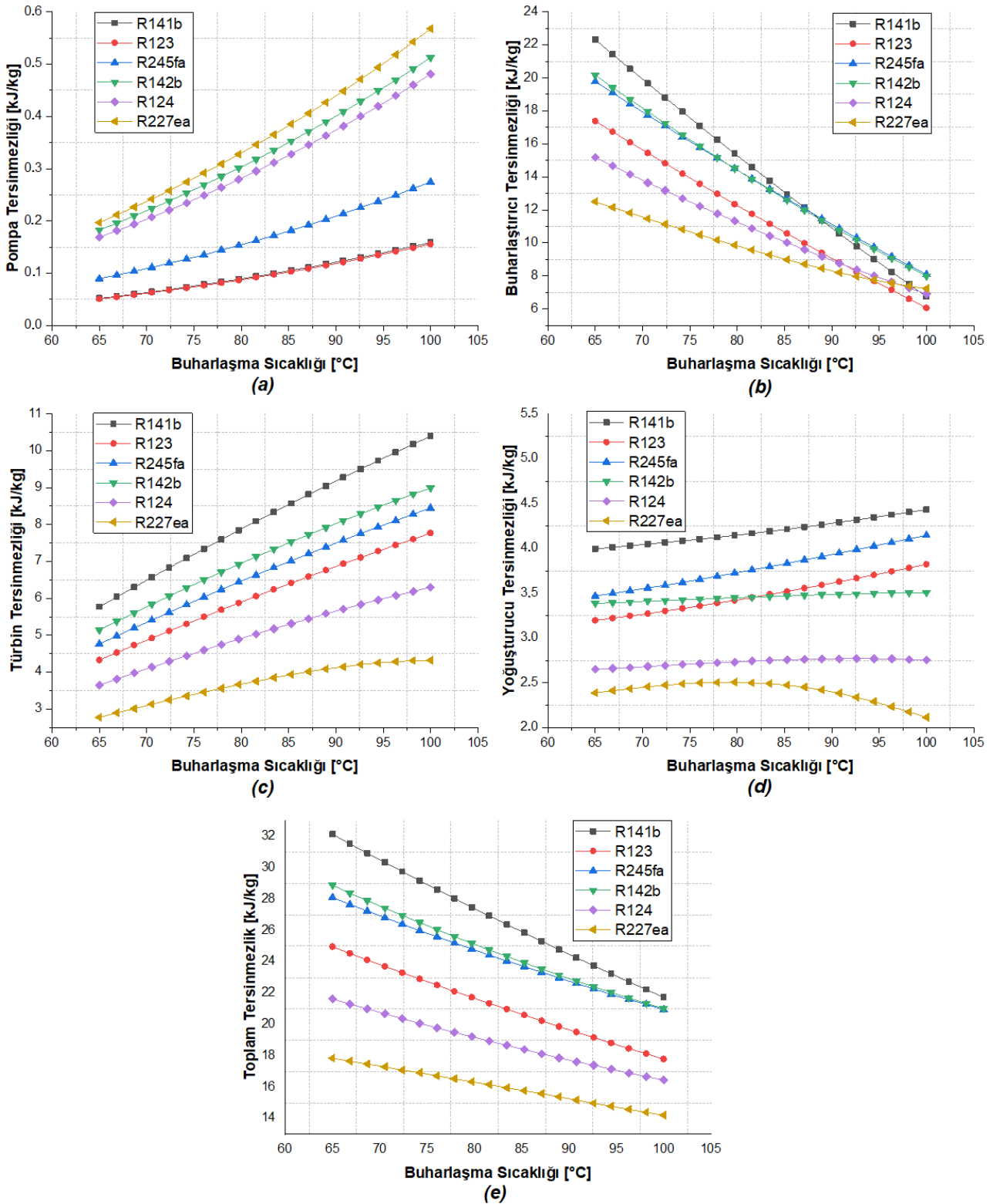


Şekil 8. İzantropik akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Pompa İş, (b) Giren Isı (c) Türbin İş.

Figure 8. Comparison of thermodynamic performances of isentropic fluids (a) Pump Work, (b) Heat Input (c) Turbine Work.

İzantropik akışkanlar için bileşenlerde oluşan tersinmezlik değerleri ve toplam tersinmezlikler Şekil 9'da verilmiştir. Pompa için en düşük tersinmezlik değerlerine R141b ve R123 sahip olurken türbin için R227ea sahip olmuştur. Buharlaştırıcı için 100 °C'de akışkanlar yakın

değerleri gösterirken daha düşük sıcaklıklarda R227ea akışkanının öne çıktığı görülmüştür. Toplam tersinmezlik değerlerinde ise R227ea akışkanının en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir.

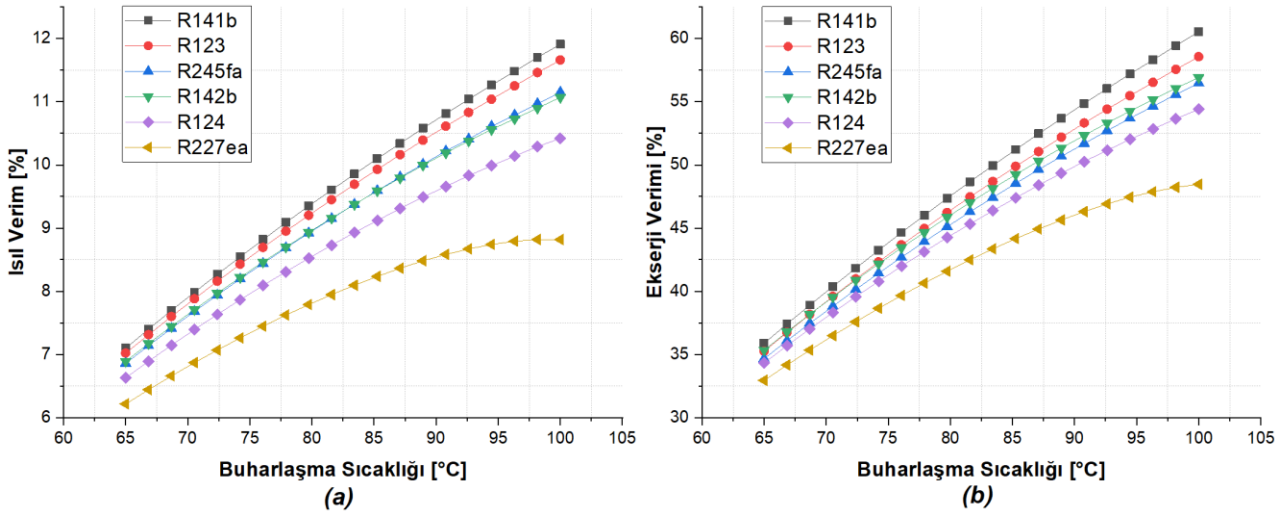


Şekil 9. İzantropik akışkanların bileşen ve toplam tersinmezlik değerleri karşılaştırılması (a) Pompa, (b) Buharlaştırıcı, (c) Türbin, (d) Yoğuşturucu, (e) Toplam Tersinmezlik.

Figure 9. Comparison of component and total irreversibility values of isentropic fluids (a) Pump, (b) Evaporator, (c) Turbine, (d) Condenser, (e) Total irreversibility.

Şekil 10'da verilen grafiklerde izantropik akışkanlar için ısı verim ve ekserji verimleri karşılaştırılmıştır. Her iki grafikte de görüldüğü

gibi R141b akışkanı en iyi performans gösteren akışkan olmuştur.



Şekil 10. İzantropik akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Isıl Verim, (b) Ekserji Verimi.

Figure 10. Comparison of thermodynamic performances of isentropic fluids (a) Thermal Efficiency, (b) Exergy Efficiency.

Şekil 8-10 incelendiğinde;

- Türbin işi elde edilmesinde performans sıralaması R141b>R142b>R245fa iken ısı verim değerlerinde ise R141b>R123>R245fa olduğu görülmektedir.
- R142b akışkanının türbin işi elde edilmesinde iyi bir performans göstermesine rağmen yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verim sıralamasında ilk üç akışkan içerisinde yer alamamıştır.
- En yüksek ısı girdisi ihtiyacının da R141b akışkanlı tasarımda olduğu belirlenmiştir.
- Pompa işi gereksinimin de en düşük değerlere R141b ve R123'te ulaşılmıştır.
- En yüksek tersinmezlik değerlerine buharlaştırıcıda görüldüğü tespit edilmiştir. Buharlaşma sıcaklığının artmasıyla ısı kaynağı sıcaklığına yaklaşımla tüm akışkanlarda buharlaştırıcı tersinmezliği azalmış olup R141b'deki azalma diğerlerine göre daha fazla gerçekleşmiştir.
- Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde R141b akışkanının diğerlerinden daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

5. Sonuç

5. Conclusion

Bu çalışmada, organik akışkan seçimi çevresel ve termodinamik performans kriterleri bakımından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede kuru ve izantropik akışkanlar kullanılmıştır. Kuru akışkanlardan; RC318, R114, R600, R600a, R601, R601a akışkanları, izantropik akışkanlardan ise;

R141b, R123, R245fa, R142b, R124, R227ea akışkanları pompa işi, türbin işi, giren ısı, tersinmezlik değerleri, ısı verim ve ekserji verimlerine göre karşılaştırılmıştır. 12 farklı akışkan için EES yazılımı üzerinden termodinamik model oluşturulmuş ve performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Kuru akışkanlar içerisinde türbin işi yönünden R601>R600>R601a iken ısı verim bakımından R601>R601a>R600 şeklinde performans sıralaması olduğu tespit edilmiştir. Çevresel özellik bakımından da GWP ve ODP değerleri yakın olan bu üç akışkan içerisinde R601 akışkanın diğerlerinden önde olduğu görülmektedir. R601 akışkanlı ORÇ tasarımında %11.34 ısı verim değerine ve 54.72 kJ/kg türbin işi değerine ulaşılmıştır. RC318 ve R114 akışkanlarının bütan ve pentan akışkan gruplarına göre daha düşük ısı girdisi ihtiyacının olduğu fakat türbin işi elde edilmesinde de düşük bir performansa sahip olduğu görülmektedir.

İzantropik akışkanlar içerisinde türbin işi yönünden R141b>R142b>R245fa iken ısı verim bakımından R141b>R123>R245fa şeklinde performans sıralaması olduğu tespit edilmiştir. Çevresel özellikler incelendiğinde R123'ün R141b'ye göre çok daha düşük GWP değerine sahip olduğu görülmektedir. R123'lü akışkan tasarımında yüksek bir türbin işi elde edilmemesine rağmen düşük ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verim performansının iyi olduğu dikkat çekmektedir. R141b akışkanlı ORÇ tasarımında %11.91 ısı verim değerine ve 32.84 kJ/kg türbin işi değerine ulaşılmıştır.

Kuru ve izantropik akışkanlarda en iyi performans gösteren akışkanlar birlikte değerlendirildiğinde ısı verim değerlerinin yakın olduğu fakat birim kütle başına elde edilen türbin işi değerlerinde kuru akışkanlarda daha iyi değerler elde edildiği görülmektedir. R601 akışkanlı tasarımda 54.72 kJ/kg türbin işi elde edilmesine rağmen R141b'li akışkanda türbin işi 32.84 kJ/kg olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; Tablo 4'te kuru ve izantropik akışkanlarda en iyi performans sergileyen R601 ve

R141b akışkanlı ORÇ tasarım sonuçları verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde;

- Düşük ısı girdisi, pompa işi gereksinimi ve toplam tersinmezlik bakımından **R141b**;
- Yüksek ısı verim ve ekserji verim bakımından **R141b**;
- Yüksek türbin işi elde edilmesi bakımından **R601**;
- Çevresel özellik bakımından **R601** akışkanın daha iyi durumda olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Kuru ve izantropik akışkanlarda en iyi performans sergileyen akışkanların analiz sonuçları
Table 4. Analysis results of fluids with the best performance in dry and isentropic fluids

Performans Parametresi/Akışkan	R601	R141b
Isıl Verim (%)	11.34	11.91
Türbin İş (kJ/kg)	54.72	32.84
Isı Girdisi (kJ/kg)	472.7	270.6
Pompa İş (kJ/kg)	1.1	0.6347
Ekserji Verimi (%)	56.9	60.52
Toplam Tersinmezlik (kJ/kg)	41.44	21.73
ODP	0	0.12
GWP	20	725

Bu çalışma ile organik akışkan performanslarının tek bir parametre üzerinden belirlenmemesi gerektiği ve çıktı fonksiyonlarına bağlı olarak akışkanların performanslarının değişken olduğu

tespit edilmiştir. Küresel ısınma faktöründen dolayı akışkan seçiminde termodinamik performans kadar çevresel özelliklerinin de dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Semboller ve kısaltmalar

Symbols and abbreviations

e_{harcanan}	: Harcanan ekserji (kJ/kg)
h	: Entalpi (kJ/kg)
i_p	: Pompa Tersinmezliği (kJ/kg)
i_b	: Buharlaştırıcı tersinmezliği (kJ/kg)
i_t	: Türbin tersinmezliği (kJ/kg)
i_y	: Yoğuşturucu tersinmezliği (kJ/kg)
i_{toplaml}	: Toplam tersinmezlik (kJ/kg)
J	: Joule
kg	: Kilogram
\dot{m}	: Kütleli Debi (kg/s)
$\eta_{\text{Isıl}}$: Isıl Verim
η_{II}	: Ekserji Verimi
η_p	: Pompa izantropik verimi
η_t	: Türbin izantropik verimi
$^{\circ}C$: Santigrat derece
P	: Basınç (kPa)
s	: Entropi (kJ/kg $^{\circ}C$)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_c	: Ortalama Soğutma Suyu Sıcaklığı ($^{\circ}C$)

Semboller ve kısaltmalar (devamı)*Symbols and abbreviations (continuing)*

T_h	: Ortalama Isı Kaynağı Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{c,i}$: Soğutma suyu giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{c,o}$: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{h,i}$: Isı kaynağı giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{h,o}$: Isı kaynağı çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
Q_b	: Buharlaştırıcı Isı Girdisi (kJ/kg)
Q_y	: Yoğuşturucudan Atılan Isı (kJ/kg)
W_p	: Pompa İşi (kJ/kg)
W_t	: Türbin İşi (kJ/kg)
W_{net}	: Net İş (kJ/kg)
W_t	: Türbin İşi (kJ/kg)
$\Delta T_{pp,e}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
$\Delta T_{pp,k}$: Kondenser pinch noktası sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
EES	: Engineering Equation Solver
ODP	: Ozon Delme Potansiyeli (Ozone Depletion Potential)
ORÇ	: Organik Rankine Çevrimi
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)

Yazar katkısı*Author contribution*

Araştırmacılardan Ata; makalenin düzenlenmesi, literatür kısmı, verilerin elde edilmesi ve ilerleyişinin denetlenmesi, Aksoy; ilgili tabloların/şekillerin hazırlanması ve yorumlanmasında katkı sunmuştur. Araştırmacılardan Şahin ve Kahraman ise bulgular ve sonuç kısmının şekillendirilmesine yönelik katkı sunmuştur.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

Ağırkaya, O. (2015). Jeotermal enerji kaynaklı Organik Rankine Çevriminin modellenmesi ve analizi. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Bilim ve Teknoloji Programı].

Ahmadi, A., El Haj Assad, M., Jamali, D. H., Kumar, R., Li, Z. X., Salameh, T., Al-Shabi, M., & Ehyaei, M. A. (2020). Applications of geothermal Organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122950>

Akkurt, F. (2020). Düşük sıcaklıkta jeotermal enerji kaynaklı Organik Rankine Çevrimi sisteminin enerji ve ekserji analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 729–742. <https://doi.org/10.17482/uumfd.624475>

Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for Organic Rankine Cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 325–342. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>

Calm, J. M., & Hourahan, G. C. (2007). Refrigerant data update, HPAC Heating, Piping, AirConditioning Engineering, 79(1), 50–64.

Cengel, Y., & Boles, M. (2007). *Thermodynamics an engineering approach*. McGraw- Hill.

Cataldo, F., Mastrullo, R., Mauro, A. W., & Vanoli, G. P. (2014). Fluid selection of Organic Rankine Cycle for low-temperature waste heat recovery based on thermal optimization. *Energy*, 72, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.019>

Günaydın, İ. (2016). 1,5 kW gücünde Organik Rankine Çevriminin parametrik tasarımı termodinamik analizi prototip imalatı ve testi. [Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Jankowski, M., Borsukiewicz, A., Szopik-Depczyńska, K., & Ioppolo, G. (2019). Determination of an optimal pinch point temperature difference interval in ORC power plant using multi-objective approach, *Journal of Cleaner Production*, 217, 798-807. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.250>
- Javanshir, A., & Sarunac, N. (2017). Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle, *Energy*, 118, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.019>
- Javanshir, A., Sarunac, N., & Razzaghpahanah, Z. (2017). Thermodynamic analysis of a regenerative organic Rankine cycle using dry fluids, *Applied Thermal Engineering*, 123, 852-864. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.158>
- Han, Z., Li, P., Han, X., Mei, Z., & Wang, Z. (2017). Thermo-Economic Performance Analysis of a Regenerative Superheating Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery, *Energies*, 10, 1593, 1-23. <https://doi.org/10.3390/en10101593>
- Kahraman, A., Sahin, R., & Ata, S. (2018a). Analysis of exergy destruction rates in the components of the orc system using n-pentane fluid. *International Conference on Engineering Technologies ICENTE'18*, 513-518, Konya.
- Kahraman, A., Sahin, R., & Ata, S. (2018b). Çevresel özellik yönünden farklı özelliklere sahip R134a ve R152a akışkanı kullanılarak tasarlanan Organik Rankine Çevriminin performanslarının karşılaştırılması. VI. KOP Uluslararası Bölgesel Kalkınma Sempozyumu, 554-562, Konya.
- Kaşka, Ö. (2014). Energy and exergy analysis of an Organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. *Energy Conversion and Management*, 77, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.026>
- Li, J., Liu, Q., Ge, Z., Duan, Y., & Yang, Z. (2017). Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical Organic Rankine Cycles using R1234ze(E) for 100-200 °C heat sources. *Energy Conversion and Management*, 149, 140-154. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.060>
- Özdemir, E. & Kılıç, M. (2017). Energy and exergy analysis of an Organic Rankine Cycle using different working fluids from waste heat recovery. *Uluslararası Çevresel Eğilimler Dergisi*, 1(1), 32-45. <https://dergipark.org.tr/ijent/issue/32841/368720>
- Pelit, M. (2015). Biyokütle kaynaklı Organik Rankine Çevrimli güç ünitesinin termoeconomik analizi. [Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Roy, J. P., Mishra, M. K., & Misra, A. (2011). Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions. *Applied Energy*, 88(9), 2995-3004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.042>
- Safarian, S., & Aramoun, F. (2015). Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy Rep.* 1, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2014.10.003>
- Sun, J., Liu, Q., & Duan, Y. (2018). Effects of evaporator pinch point temperature difference on thermoeconomic performance of geothermal organic Rankine cycle systems, *Geothermics*, 75, 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.06.001>
- Tchanche, B.F. (2010). Low-Grade Heat Conversion into Power Using Small Scale Organic Rankine Cycles, [Doctoral Thesis, Agricultural University Of Athens].
- Tumen Ozdil, N. F., Segmen, M. R., & Tantekin, A. (2015). Thermodynamic analysis of an Organic Rankine Cycle (ORC) based on industrial data. *Applied Thermal Engineering*, 91, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.079>
- Tumen Ozdil, N. F., Segmen, M. R., & Tantekin, A. (2016). Investigation of different working fluid effects on exergy analysis for Organic Rankine Cycle (ORC). *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 31(June), 441-449.
- Wang, J., Diao, M., & Yue, K. (2017). Optimization on pinch point temperature difference of ORC system based on AHP-Entropy method. *Energy*, 141, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.052>
- Woodland B.J., Ziviani, D., E. Braun, J., & A. Groll, E. (2020). Considerations on alternative Organic Rankine Cycle configurations for low-grade waste heat recovery, *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116810>
- Wu, Y. T., Lei, B., Ma, C. F., Zhao, L., Wang, J. F., Guo, H., & Lu, Y. W. (2014). Study on the characteristics of expander power output used for offsetting pumping work consumption in Organic Rankine Cycles. *Energies*, 7(8), 4957-4971. <https://doi.org/10.3390/en7084957>
- Yilmaz, C. (2020). Improving performance and thermoeconomic optimization of an existing binary geothermal power plant: A case study. *Journal of Thermal Science and Technology*, 40(1), 37-51.

Yu, H., Feng, X., & Wang, Y. (2015). A new pinch based method for simultaneous selection of working fluid and operating conditions in an ORC (Organic Rankine Cycle) recovering waste

heat. *Energy*, 90, 36–46.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.059>

Çevresel ve ekolojik stratejilerle kapsayıcı mimari tasarım modeli

Inclusive architectural design model with environmental and ecological strategies

Nihal ZENGİN^{*1,a}, Ruşen YAMAÇLI^{2,b}

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Zile Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 60400, Tokat

² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 26555, Eskişehir

• Geliş tarihi / Received: 27.12.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 08.03.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.04.2022

Öz

Son yıllarda tasarım ortamlarında, tasarım sürecinde insan yeteneklerinin ve koşullarının çeşitliliğini hesaba katmayı amaçlayan çeşitli tasarım yaklaşımları öne çıkmaktadır. Bu yaklaşımlardan biri de kapsayıcı mimari tasarımdır. Bu araştırma makalesinde, mimari tasarımda mevcut şartlar ve gelecekte değişme ihtimalleri göz önünde bulundurularak tasarım yapılmasının, tasarıma mümkün olduğu kadar daha çok insanın dahil edilmesinin önemini ortaya konması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi süreç içerisinde ortaya çıkan sorunlarla mücadele kapsamında ve değişen çevresel ve ekolojik stratejiler ışığında mimari tasarımın sürdürülebilir olması adına kapsayıcı mimari tasarım önerilmektedir. Kapsayıcı mimari tasarımın nasıl olması gerektiği, gereksinimlere cevap olarak verdiği tasarım pratikleri, insan ve doğa uyumunun sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için nelerin gerekli olduğu sorgulanmaktadır. Kapsayıcı mimari tasarım örnekleri Türkiye’de mimari araştırmalara henüz dahil edilmemiştir. Bu nedenle, bu makalede kapsayıcı mimari tasarım kararları araştırılarak ülkemiz için bir model önerisi geliştirilmiştir. Sonuç olarak, kapsayıcı tasarımın, çeşitli mekânsal nitelikler ve kullanım fırsatları sunarak belirli sertifikasyon sistemleri ile birlikte, çeşitlilik gösteren ve yaşlanan toplumumuzun zorluklarını sürdürülebilir bir şekilde ele almaya yardımcı olma potansiyeline sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Çevre, İklim değişikliği, Kapsayıcı mimari tasarım, Küresel ısınma, Yeşil bina sertifikaları

Abstract

In recent years, various design approaches have come to the fore in design environments that aim to take into account the diversity of human abilities and conditions in the design process. One of these approaches is inclusive architectural design. In this research article, it is aimed to reveal the importance of designing by considering the current conditions and the possibility of change in the future in architectural design, and to include as many people as possible in the design. In this context, inclusive architectural design is suggested for the sustainability of architectural design in the light of changing environmental and ecological strategies, and within the scope of combating problems that arise in the process such as global warming and climate change. It is questioned how inclusive architectural design should be, the design practices that it responds to needs, what is necessary to ensure the sustainability of human and nature harmony. Inclusive architectural design examples have not yet been included in architectural research in Turkey. Therefore, in this article, a model proposal has been developed for our country by researching inclusive architectural design decisions. In conclusion, inclusive design has the potential to help address the challenges of our diverse and aging society in a sustainable way, by offering a variety of spatial attributes and opportunities for use, along with specific certification systems.

Keywords: Environment, Climate change, Inclusive architectural design, Global warming, Green building certificates

^{*a} Nihal ZENGİN; nihalzengin60@gmail.com, Tel: (0356) 317 50 78, orcid.org/0000-0003-2640-0304

^b orcid.org/0000-0001-9659-9246

1. Giriş

1. Introduction

Çeşitli tasarım yaklaşımları, tasarım sırasında mümkün olan birbirinden fiziksel, duyuşsal ve bilişsel olarak farklı ve geniş bir kullanıcı yelpazesini hesaba katmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşımlara örnek olarak evrensel tasarım, kapsayıcı tasarım ve herkes için tasarım gösterilmektedir (Stockholm Declaration, 2004). Farklı köken yerlerine ve bazı anlamsal ayrımlara rağmen, tüm bu yaklaşımlar benzer bir amacı paylaşmaktadır. Kapsayıcı tasarım diğer iki terim yerine seçilmiştir. Çünkü bu yaklaşım, mümkün olduğu kadar birbirinden farklı özelliklere sahip daha çok insanı tasarıma dahil etme amacını taşımaktadır.

Kapsayıcı olarak tasarlanmış ortamlar, insanların farklı yeteneklerini göz önünde bulundurarak,

mekanları çeşitli şekillerde kullanmak için çeşitli mekansal nitelikler ve fırsatlar sunabilmektedir. Bu duruma mimarlar Carlos Pereira veya Chris Downey örnek olarak gösterilmektedir. Her ikisi de görme yetilerini kaybettiklerinden, çok-duyulu potansiyelleri için şekiller ve malzemeler kullanarak daha zengin bir mimari yaratmak için kör olma konusundaki bedenlenmiş bilgilerini kullanmaktadırlar (Vermeersch vd., 2013). Örneğin Pereira, Şekil 1’de gösterilen Portekiz sahilinde bulunan deniz banyosu tesisi için bir tasarım önerisi hazırlarken, dokunsal nitelikleri için havzanın yuvarlak şekillerini ve koku alma ve dokunsal nitelikleri için daha küçük havzalara entegre deniz yosunlarını seçmiştir. Böylelikle, farklı ve geniş kullanıcı kitlesine hitap eden, kullanıcı profiline çeşitli olduğu bir tasarım yaklaşımı ortaya konmuş ve tasarımın kapsayıcılığı artırılmıştır.



Şekil 1. Portekiz sahilinde Carlos Mourao Pereira tarafından tasarlanan deniz banyosu tesisi ve kesiti (Vermeersch vd., 2013).

Figure 1. Sea-bath facility and cross-section designed by Carlos Mourao Pereira on the Portuguese coast (Vermeersch et al., 2013).

Bununla birlikte, birçok çalışma, tasarım uygulamasında kapsayıcı tasarımın benimsenmesinin, özellikle yapı çevre ile ilgili olarak şimdiye kadar sınırlı olduğunu ileri sürmektedir (Basnak vd., 2015). Bu sınırlı benimseme, kapsayıcı tasarım hakkında var olan yanlış anlamalardan kaynaklanmaktadır (Heylighen, 2014). Araştırmalar, kapsayıcı tasarımın mimarlar ve diğer yapı çevre uzmanları tarafından çeşitli şekillerde anlaşıldığını göstermektedir (Wauters, 2014). Kapsayıcı tasarım, iyi niyet, erişilebilirlik ve işlevsellik ile ilişkili görünen temel bir tutum olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda bazı kesimler tarafından da ütopyik olarak kabul edilmektedir (Steinfeld & Tauke, 2002). Çünkü tasarımda “herkes için tasarlama” hedefine ulaşmak imkansız görünmektedir. Sonuç olarak, birçok mimar ve diğer yapı çevre uzmanları, kapsayıcı tasarımın tam olarak neyi gerektirdiği konusunda kararsız kalmaktadır. Bu durum, kapsayıcı tasarımın algıları ve pratik uygulanabilirliği ile ilgili olarak

ele alınması gereken birçok zorluğu olduğunu göstermektedir. Kapsayıcı tasarım sadece mimarların çalışma alanı ile sınırlı değildir. Tasarım kararları üzerinde etkileri olan her türlü yapı çevre uzmanının (örneğin akustik, iç mekan konforu, sürdürülebilirlik, kentsel tasarım ve planlama) da çalışma alanı kapsamındadır. Yapı çevre ile ilgili olarak, özel ihtiyaçlar için alınan tasarım kararları genellikle tekerlekli sandalye kullanıcılarına odaklanmakta ve bu nedenle kapsayıcı mimari tasarım genellikle erişilebilir veya engelsiz tasarım olarak adlandırılmaktadır. Kapsayıcı tasarımın temel farkı, toplumu oluşturan insanların etkileşimlerini ve ilişkilerini ele alırken çevreyi de dahil ederek mevcut durumu daha fazla insan için iyileştirerek fayda sağlamaktır.

Teknolojinin hızla gelişmesi, kentlere olan orantısız göç, artan bina stoku, sanayileşmenin artması ve fosil yakıt kullanımı çevre üzerinde, bozulan ekosistem ve azalan biyolojik çeşitlilik gibi olumsuz etkiler bırakmaktadır. Son yıllarda

dünya gündeminde olan küresel ısınma ve ona bağlı yaşanan iklim değişikliği de yine bozulan çevreden kaynaklı olarak karşımıza çıkmaktadır. Tasarım kararlarında çevre-insan ilişkisini odağına alan kapsayıcı mimari tasarım, süreç içerisinde değişen durumlara karşı çevresel ve ekolojik stratejilerle birlikte cevap niteliği taşımaktadır.

Bu makalenin amacı, mimari tasarımda mevcut şartları ve gelecekte değişme ihtimallerini göz önünde bulundurarak tasarım yapılmasını, tasarıma mümkün olduğu kadar farklı fiziksel, duyuşsal ve bilişsel özelliklere sahip daha çok insanın dahil edilmesinin önemli olduğunu ortaya sunmaktır. Küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi süreç içerisinde ortaya çıkan sorunlarla mücadele kapsamında değişen çevresel ve ekolojik stratejiler ışığında, mimari tasarımın sürdürülebilir olması adına kapsayıcı mimari tasarım modeli önerilmektedir. Makalede, kapsayıcı mimari tasarımın nasıl olması gerektiği, zaman içerisinde değişen gereksinimlere cevap olarak sunduğu tasarım pratikleri, insan ve doğa uyumundaki sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesinde gerekli olduğu vurgulanmaktadır. Makalenin yöntemi ise ulusal ve uluslararası derinlemesine bir literatür araştırmasına dayanmaktadır.

2. Bir mimari tasarım yaklaşımı olarak kapsayıcı tasarım

2. Inclusive design as an architectural design approach

Birleşmiş Milletler Engelli Hakları Sözleşmesi (CORD)'inde "tüm insanlar tarafından, mümkün olan en geniş ölçüde, herhangi bir müdahale olmaksızın kullanılacak ürünler, ortamlar, programlar ve hizmetler tasarımı" şeklinde evrensel tasarım tanımlanmıştır (National Disability Authority, 2011). 1972 yılında

Stockholm bildirgesinde, herkes için tasarım yaklaşımının toplumu oluşturan her kesimden insanın her alana katılmak için eşit fırsatlara sahip olmalarını sağlamayı amaçladığı ifade edilmektedir. Bunu başarmak için ise; toplumdaki herkesin kullanımına uygun ve gelişen, insana duyarlı yapıları çevre, hizmetler, çeşitlilik, kültür ve bilgi insanlar tarafından erişilebilir olmalıdır (Stockholm Declaration, 2004). Bu tanımlardan sonra kullanıcı profiline ve ihtiyaçlarının zaman içerisinde değiştiği fark edilmiştir. Buradan hareketle Roger Coleman (1994), ihtiyaçların ve yeteneklerin yaşam boyunca değiştiğini ve tasarım sürecinde bunu dikkate alarak ürünlerin, hizmetlerin ve ortamların kullanıcıların çoğunluğu için geliştirilebileceğini savunarak Kapsayıcı Tasarım fikrini ortaya atmıştır (Coleman, 1994). British Design Council kapsayıcı tasarımı; "tasarımcıların ürün ve hizmetlerinin yaş veya yeteneğinden bağımsız olarak mümkün olan en geniş kitlenin ihtiyaçlarını karşılamasını sağladığı genel bir tasarım yaklaşımı" olarak tanımlamıştır (Design Council, 2021). Başka bir ifade ile kapsayıcı tasarımın çeşitlik, eşitlik ve sosyal konulara odaklandığı, mümkün olduğu kadar geniş bir kitleye ulaşabilmek adına çaba gösterdiği ve ortaya çıkan tasarımın tüm insanlar tarafından kullanılabilir olmasını amaçlayan bir tasarım yaklaşımı olduğu söylenmektedir. Herkes için mümkün olan en geniş ölçüde tasarım yapma tutkusu, kapsayıcı tasarımı, uyarlamalar veya yardımcı teknoloji yoluyla belirli bir hedef kitleye uyarlanmış özel ihtiyaçlar için tasarımdan ayırmayı amaçlamaktadır. Kapsayıcı tasarım ile ilgili olarak Commission for Architecture and the Built Environment (CABE) tarafından geliştirilen tasarım prensipleri 5 ilke olarak oluşmaktadır. Bu ilkeler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Kapsayıcı tasarım prensipleri (CABE, 2006). (Yazar tarafından belirtilen kaynaktan yorumlanmıştır)
Table 1. Inclusive design principles (CABE, 2006). (Interpreted from the sources indicated by the author)

1. İlke	İnsanı merkezine alan, kullanıcı odaklı tasarım
2. İlke	Tasarım kararlarında çeşitliliği ve farklılığı kabul eden tasarım
3. İlke	Tek bir tasarım kararının tüm kullanıcıları kapsamadığı anda seçenek sunan tasarım
4. İlke	Kullanımda esneklik sağlayan tasarım
5. İlke	Herkes için uygun ve kullanması keyifli bina ve ortamlar sunan tasarım

Hayat boyunca insanların zihinsel ve fiziksel yeteneklerinde farklılıklar olmaktadır. Engellilik sadece sağlık durumunun bozulması, yaşlılık ya da fiziksel bir yoksunluk anlamına gelmemektedir. Çevreyi oluşturan yapısal müdahaleler de yine bir engel durumunu ortaya koymaktadır. Kapsayıcı

tasarımın odağında yaş ve yeteneğin ötesine geçilerek; kültürel ve sosyal farklılıklar, cinsiyet ve bunların kesişimi yer almaktadır (Skjerve vd., 2016). Kapsayıcı mimari tasarım toplumun her kesiminden insanları ilgilendirmektedir. Fakat toplumda bu tasarım yaklaşımı ile ilgili olarak

kesin, net ve doğru bilginin bulunmadığı görülmektedir. Kapsayıcı mimari tasarım ile ilgili olarak;

- Mimari bir engel veya sadece fiziksel erişilebilirlik anlamına geldiği,
- Sadece engelli haklarına atıfta bulunduğu,
- Ekstra bir maliyet oluşturduğu,
- Sadece yasal bir zorunluluk olduğu gibi düşünceler yanlış olarak bilinmektedir.

Bunların aksine kapsayıcı mimari tasarım kullanıcılar için faydalı olmakla birlikte yüksek yaşam kalitesi sunmakta, çağdaş sosyal gerçeklerin ve olayların farkındalığını yansıtmakta ve toplum için olumlu örnekler sunmaktadır.

Şekil 2’de Stephane Beel ve Caroline Van Doren tarafından tasarlanan Belçika’nın Leuven kentinde bulunan ünlü M Müzesi’nin girişi gösterilmektedir. Tasarımcılar merdivene bir rampa entegre ederek tekerlekli sandalye kullanıcılarını ve basamak çıkma güçlüğü çekenleri tasarıma dahil etmişlerdir. Rampanın merdivenleri geçtiği yerde, kullanıcıyı merdivenlerden inerken destekleyen ve yönlendiren bir de tirabzan bulunmaktadır. Tasarımdaki rampanın sürekliliği için tirabzan ikiye bölünmüştür. Fakat bu durumda görme engelli bir kullanıcı için bir sonraki tirabzanı bulması zor olmaktadır (Heylighen vd., 2013). Bu örnekten de anlaşılacağı üzere kapsayıcı tasarımda, tasarıma daha çok insanı dahil etme çabası çoklu bakış açısı gerektirmektedir. Farklı kullanıcı gruplarının arasında uyumu sağlayabilmek teoride mantıklı olsa da pratikte bazı durumlarda tavizler gerektirmektedir.



Şekil 2. Belçika Leuven'deki M müzesi girişi (Heylighen vd., 2013).
Figure2. Entrance to museum M in Leuven, Belgium (Heylighen et al., 2013).

Son yıllarda kapsayıcı tasarıma olan ilgi ve farkındalığın artmasının öncelikli sebebi olarak küresel ölçekte, 2008 yılında yürürlüğe giren Engelli Hakları Sözleşmesi gelmektedir. Bu sözleşme özellikle engellilerin haklarının gündemde tutulduğu ilk uluslararası insan hakları sözleşmesidir (UN, 2021). Bu sözleşmeyi kabul eden 96 ülke ve AB ayrımcılık yapmamayı, toplumdaki her kesimi desteklemeyi ve engelli insanlara topluma tam olarak katılmaları için ihtiyaç duydukları hizmetleri sunmayı taahhüt etmektedir. Katılım konusunda tasarlanan çevrenin kullanıcıyı engelleyebileceği ya da teşvik edeceği düşünüldüğünde tasarımcının rolünün büyük paya sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. İlgi ve

farkındalığın diğer sebebi ise düşen doğurganlık oranı ve uzun yaşam beklentisidir. Dünya çapında 60 yaş üstü insanların oranı diğer tüm yaş gruplarından daha hızlı büyümektedir (WHO, 2021). Yaşlanmak genellikle fiziksel, bilişsel, sosyal ya da ekonomik olsun, tasarlanan çevre ile insanın etkileşimini etkileyen birçok değişiklikle birlikte gelmektedir. Buna örnek olarak ileri yaşlarda görme ve işitme kapasitesinin bozulmasıyla birlikte düşme riskinin artması ve yaralanmaların sonuçları daha ciddi olmaktadır. Bu sebeple yapılı çevrenin tasarımının nüfusun yaşlanmasını da hesaba katarak yapılması gerekmektedir.

Kapsayıcı tasarım bina ölçeğinde ele alındığında binanın toplu taşımaya olan mesafesi, yürüme güçlüğü çekenler için yakınlarda otopark imkanı ve binaya girmek ve gezinmek için düşük fiziksel çaba gereksinimi tasarım kararlarında önem arz etmektedir (Connell vd., 1997). Kapsayıcı tasarımdan basit ve sezgisel kullanıma izin vermesi beklenmektedir. Bunlara ek olarak mekânsal organizasyonun mantığının anlaşılır ve okunabilir olması yine bu tasarım yaklaşımında önemle vurgulanmaktadır. Binayı ilk kez ziyaret edenler için nereye gitmeleri ya da gitmemeleri gerektiğinin algılanabilir olması gerekmektedir. Buna örnek olarak kanser hastalarına ait bir tedavi

merkezinde, insanların dinlendiği alanlar ile sosyalleştiği alanları okuyabilmek mekanın kalitesini göstermektedir (Van der Linden vd., 2016). Bir mekanın nasıl görüldüğü mutlaka önemlidir fakat buna ek olarak o mekanın nasıl hissettirdiği, tatmin duygusu, sesi ve kokusu da insanların mekanı deneyimlemelerinde önemli rol oynamaktadır. Bir mekanın kalitesi çoklu duyuların birleşimi ile değerlendirilmektedir (Pallasmaa, 2005). Kapsayıcı tasarımlar oluşturmak birden fazla seviyedeki bileşenlerin değerlendirilmesini gerektirmektedir. Şekil 3'te kapsayıcı tasarımı oluşturan bileşenler gösterilmektedir.

Kapsayıcı Mimari Tasarım	Bileşenler	Soru/Değerlendirme
Sistem Bileşenleri	Fiziksel Çevre	Yerel iklim (çöl, tropikal vb.), ana yollara ulaşım, çevresel tahribat, kaonut durumu ve stoğu.
	Sosyal, Organizasyonel, Kültürel	Etnik köken, cinsiyet, dini inanç, yerel ve merkezi yönetim.
	Birey/Kullanıcı	Duyusal, fiziksel ve bilişsel yetenekler ve ihtiyaçlar.
Tasarım Bileşenleri	Tasarım	Yapılan tasarım herkes tarafından erişilebilir mi? Tasarımda kapsayıcı tasarım gerekli midir?
	İşlevsellik	Tasarımda belirlenen hedef kullanıcı için hangi tasarımlar gereklidir? Belirlenen tasarımlar hedef kullanıcı grubu arasında farklılıklar gösterecek mi?
	İçerik	Yapılan tasarım kullanıcı grubunun kültürel değerlerini yansıtıyor mu?
	Kullanıcı arayüzü	Yapılan tasarım kullanıcı grubunun dil ve okuryazarlık düzeyine uygun mudur? Renkler ve simgeler kullanıcı grup tarafından yorumlanabilir mi?
Tasarımın Ölçülmesi	Erişim	Yapılan tasarıma katılan/erişilebilir kullanıcı grupları kimlerdir? İlgili Kullanıcı grupları arasında yapılan kullanıma dayalı ölçümlerde farklılıklar var mıdır?
	Adaptasyon/uyum	Yapılan tasarıma uyum sağlayan, oturan veya kullanan kullanıcı grupları kimlerdir?
	Bağlılık/etkililik	Yapılan tasarımda zamanla kullanılmama veta yıpranma var mıdır? Tasarımda hedeflenen grup ile kullanıcı grup arasında farklılıklar var mıdır?

Şekil 3. Kapsayıcı tasarım için sistem bileşenleri (Holden vd., 2013; Smith-Jackson vd., 2013), tasarım bileşenleri (Valdez vd., 2012) ve tasarımın ölçülmesi (Veinot vd., 2018). (Yazar tarafından belirtilen kaynaklardan yorumlanmıştır)

Figure 3. System components for inclusive design (Holden et al., 2013; Smith-Jackson et al., 2013), design components (Valdez et al., 2012), and design measurement (Veinot et al., 2018). (Interpreted from the sources indicated by the author)

Şekil 3'te yapılan değerlendirme belirlenen seviyelerin birbiriyle bağlantılı olduğunu göstermektedir. Örnek olarak erişimin nerdeyse tasarıma bağlı olduğu, tasarım seçiminin ise fiziksel ortamın kısıtlamaları ve hedeflenen kullanıcıların duyusal, fiziksel ve bilişsel yetenekleri tarafından belirlendiği ortaya çıkmaktadır. Hastane otoparklarında sürüş esnasında hızlı okumayı kolaylaştırmak için kullanılan kısa ifadeler, renk körlüğü sorunu yaşayanların karıştırılabileceği renklerin kullanılmaması, toplumun her kesiminin anlayabileceği orta sembollerin ve karanlık alanlarda kolayca ayırt edilebilen parlak renklerin kullanılması gibi alınan tasarım kararları otopark tasarımının kapsayıcılığını genişletmekte ve

otoparkın farklı kullanıcılara hizmet etmesine olanak sağlamaktadır. Şöyle ki; otoparka gelen sürücünün kendisi hasta veya refakatçi konumunda olabilir. Bu kişi görme veya hareket kabiliyeti az, okuryazarlık durumu olmayan veya dilbilgisi yetersiz, birtakım bilişsel özelliklerini kaybetmiş ya da yüksek stresli bir durum yaşayan kişi de olabilir. Tasarım kararlarında bütün ihtimaller düşünülüp hatta bazı durumlarda kullanıcıdan geri bildirim olarak hareket edilmelidir. Bir başka örnek ise görme yetisini kaybetmiş kişilerin sağlık koşulları sebebiyle, daha büyük ekranlı cihazları tercih etmesinden kaynaklı olarak tablet tabanlı müdahaleleri telefonla yapılan müdahalelere tercih ettiği bilinmektedir (Muskens vd., 2014). Kapsayıcı mimari tasarımda bu çerçevenin

seviyeleri arasındaki etkileşimlerin dikkate alınması önem arz etmektedir.

Kapsayıcı tasarım, son yıllarda sürdürülebilir çevreler yaratmaya yönelik süregelen çabalara katkıda bulunma konusunda da önemli bir potansiyel göstermektedir. Çevrenin mevcut kaynaklarının gelecek nesilleri de düşünerek etkin ve verimli kullanılmasında kapsayıcı tasarım pratikleri etkin rol oynamaktadır. Günümüzdeki nesillerin ihtiyaçlarının karşılanması ve gelecekteki nesiller arasındaki kaynak dengesinin kurulması önem arz etmektedir. Bu denge, sürdürülebilirliği oluşturan boyutların aynı anda ve aynı yönde ilerlemesi ile mümkün olmaktadır. Kapsayıcı tasarım, sürdürülebilirliği sağlamak adına çevresel, ekonomik, sosyal ve kültürel boyutları bir arada düşünerek tasarıma dahil etmektedir. Temel düzeyde, daha kapsayıcı alanlar ve binalar tasarlanmasının daha sonraki bir aşamada adaptasyon ihtiyacını ve bunun çevresel ve ekonomik maliyetlerini azalttığı görülmektedir. Ayrıca, sosyal sürdürülebilirlik, kapsayıcı tasarımı

sürdürülebilir tasarım çatısı altına yerleştiren bir kavram olarak geliştirilmiştir (Ostroff, 2011). Sosyal sürdürülebilirlik, sosyal etkileşimi teşvik eden programların, süreçlerin ve ürünlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Savunmasız insanları korumayı, sosyal çeşitliliğe saygı duymayı ve sosyal sermayeyi güçlendirmeyi vurgulamaktadır. Bu durum tam olarak, sürdürülebilirliğin diğer boyutlarını gözden kaçırmadan kapsayıcı tasarımın katkıda bulunabileceği yer olarak gösterilmektedir. Çevreleri tasarlamak, insanların yaşadıkları ve çalıştıkları yerlerde neye ihtiyaç duyduklarına dair öngörülerden başlayarak, kapsayıcı bir şekilde refahı teşvik etmektedir. Örneğin, kapsayıcı toplu taşıma ve çalışma ortamları, daha fazla insanın sosyal ve ekonomik olarak daha sürdürülebilir bir işe sahip olmasına olanak tanımaktadır (Kulkarni & Gopakumar, 2014). Bu konu ile ilgili olarak kapsayıcı yaklaşımın farklı konumdaki bireyler için ortaya koyduğu faydalar Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Kapsayıcı yaklaşımın faydaları (Johnson & Layer, 2017).

Figure 4. Benefits of the inclusive approach (Johnson & Layer, 2017).

Ayrıca kapsayıcı tasarım insanların refahını, sağlığını ve bağımsızlığını destekleyerek, sağlık bakım maliyetlerinin azaltılmasına da potansiyel olarak katkıda bulunmaktadır. Daha genel olarak; Leslie Kanés Weisman'ın (2000) belirttiği gibi, kapsayıcı tasarım, sürdürülebilir çevrelerin yaratılması üzerinde en az iki şekilde benzersiz ve güçlü bir şekilde olumlu bir etkiye sahip olmaktadır. Bir yandan kapsayıcı tasarım, tasarımı ve onun toplum bilincindeki değerini yükselterek, kişiden ürüne veya kişiden çevreye ara yüzü geliştirerek; konfor, sağlık, güvenlik ve insan performansının artırılmasına katkıda bulunurken; diğer yandan da tasarım profesyonelleri arasında etik davranışı teşvik ettiğini savunmaktadır (Weisman, 2000). Çünkü tasarım kararlarımızla başkalarının hayatlarını etkilediğimizi ve bu nedenle sorumlu olduğumuzu kabul etmektedir.

Sonuç olarak, kapsayıcı tasarım yaklaşımları, tüm insanların ve tüm canlıların önemli olduğu bir toplumu tasarlamak için önemli kılavuz çizgileri sağlamaktadır. Çevreyi ve çevreyi oluşturan toplumu tanıyarak hareket etmeyi ve buradan yola çıkarak tasarım yapmaya teşvik etmektedir.

3. Mimari tasarımda çevresel ve ekolojik stratejiler

2. Environmental and ecological strategies in architectural design

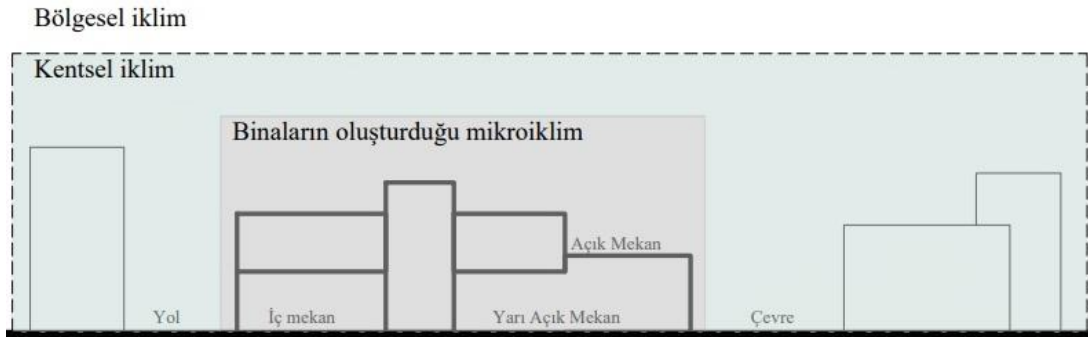
Endüstri devrimi itibarıyla gelişen teknoloji ile birlikte toplumun yaşam tarzı değişmiş ve buna bağlı olarak enerji tüketim miktarı artmıştır. Yaşam standardının yükseltilmesi adına yapılan son teknolojiye ait ürünler ortaya çıkmıştır. Elektronik aletler, otomobiller ve iklimlendirme sistemleri

gibi ürünler değişen ihtiyaçlara cevap verebilmek adına üretilmiş ve gelişen sanayi faaliyetleri ile birlikte üretilmeye de devam etmektedir. Artan endüstri faaliyetlerinde çevrenin varlığı göz ardı edilmiş; sanayileşmeye odaklanılmıştır (Alkin & İlkin, 1991). Kullanılan fosil enerji kaynakları çevrenin kirlenmesine ve tahribatına yol açmıştır. Çevrenin yaşadığı bu sorunlardan özellikle kentlerde yaşayanların yaşam kalitesi olumsuz yönde etkilenmektedir.

Kırsal alanlardan gelen yoğun göçe maruz kalan kentlerde son zamanlarda, özellikle 1980 sonrasında, kentsel yapılaşmanın hızlandığı görülmektedir. Bu hızlı kentsel yapılaşma ve gelişme ise kentlerde birtakım sorunlara neden olmaktadır. Örnek olarak trafik sıklığı kentsel çevreye büyük zarar vermekte ve bu durumdan da kent sakinlerinin yaşamı doğrudan etkilenmektedir. Kentsel çevrenin gördüğü bu zararlardan sonra, çevreyi daha güçlü kılmak ve iyileştirmek adına hükümetlerin izlediği politikalar çevre kirliliğine makro ölçekte bir bakış açısı getirmektedir.

Enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar atmosferdeki sera gazı oranını değiştirmektedir. Hızlı kentleşmenin de etkisiyle bu oran olumsuz yönde hızla değişmekte ve dünyanın yüzey sıcaklığında artış yaşanmasına neden olmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından hazırlanan 5. Değerlendirme Raporunda, günümüzde yaşanan iklim sorunlarının artan sera gazı birikiminden ve buna olumsuz anlamda katkısı olan insan faaliyetlerinden kaynaklandığı vurgulanmıştır (IPCC AR5 Report WGI SPM, 2013; IPCC AR5 Report WGIII SPM, 2014). Yine aynı raporda iklim değişikliğinin belirli bir coğrafyaya özgü olmadığı tüm dünyayı ilgilendirdiği de belirtilmiştir. Değişen çevresel ve ekolojik koşulları dünya gündeminde tutmak ve önemini vurgulamak için uluslararası platformda çalışmalar yapılmıştır. 1992 yılında imzaya sunulmasına rağmen 1994 yılında yürürlüğe girebilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) ve 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolü, değişen çevresel ve ekolojik koşulların sonucu olarak yaşanan iklim değişikliğinden kaynaklanan etkilerin azaltılmasına yönelik yapılan uluslararası çalışmalardır. Bu çalışmaların neticesinde verimli sonuçlar alınmadığından Fransa'nın Paris kentinde 2015 yılı aralık ayında Paris İklim Anlaşması 196 üye ülke ve AB'nin imzası ile kabul edilmiştir. Bu anlaşma Kyoto Protokolü'nün bitiş tarihi olan 2020 yılından sonraki süreç için imzalanmıştır. Paris İklim Anlaşması'nın esas

amacı bu yüzyıl içinde küresel anlamda sıcaklık artışını 2.0 °C'nin altında tutabilmek ve sanayi öncesinde yaşan sıcaklık seviyesinin 1.50 °C üstünde bir artışla sınırlandırmaktır (Paris Agreement, 2016). Bu anlaşma Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) ve Birleşmiş Milletler (BM) 2030 Ajandası ile uyum içinde olmakla birlikte; değişen çevresel ve ekolojik şartlarla değişen iklim sorununun insan hakları sorunu olduğunu ve kent ile birlikte ele alınması gerektiğini savunmaktadır. Anlaşmada kentleşmenin getirdiği iklim sorunlarının çözümünde üst ölçekten bakmak yerine, paydaşların arttırılarak ve her kesimden katılım sağlanarak müdahale edilmesinin önemi belirtilmiştir. Paris İklim Anlaşması'na kadar olan sürede hükümetler ve yerel yönetimler bir araya gelerek yeterli derecede bu konuya odaklanmamıştır. Çevresel ve ekolojik değişimlerin hem sebebi olarak görülen hem de sonucundan büyük oranda etkilenen kentlerin mücadele sürecine dahil edilmesi ve yerelde kararların alınması önemli bir gelişmedir. C40 Kentleri olarak bilinen Büyük Kentler İklim Liderlik Grubu ve Uluslararası Yerel Çevre Girişimleri Konseyi (ICLEI) iklim değişikliğine uyum ve karbon salınımını azaltmayı amaç edinmiş uluslararası çalışmalardan birkaçıdır (ICLEI, 2021; C40, 2021). Bu alandaki diğer çalışmalar ise AB Belediye Başkanları Sözleşmesi (Covenant of Mayors) ve Yerel Yönetimler İklim Yol Haritasıdır. Kentleşmenin sürdürülebilir ve iklime dayanıklı olması hususundaki güncel belge ise 2016 yılında 17-20 Ekim tarihlerinde gerçekleşen BM Habitat III Konferansı'dır. Konferans sonunda ise Yeni Kent Gündemi ve Kito Bildirgesi kabul edilmiştir. Bu konferans ve çıktıları incelendiğinde Paris İklim Anlaşması, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) VE BM 2030 Ajandası ile uyum içindedir. Ek olarak bu anlaşma fosil yakıt tüketiminin azaltılması, enerjinin etkin ve verimli kullanılması ve tasarım yaklaşımlarında da özellikle bu duruma dikkat edilmesini vurgulamaktadır (UN Habitat III, 2016). Kanada'nın Montreal kentinde 2017 yılında 5-10 Eylül tarihlerinde gerçekleşen IPCC tarafından düzenlenen 46. Oturumda kent ve iklim değişikliği ilişkisi açık bir şekilde ifade edilmiş, IPCC tarafından hazırlanan 6. Değerlendirme Raporu'nda Şehirler ve İklim Değişikliği Özel Raporu'na yer verileceği ifade edilmiştir (IPCC, 2021). Kent ve iklim ilişkisi uluslararası platformda son yıllarda sıklıkla gündeme gelmektedir. Şekil 5'te bina, kent ve iklim ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 5. Bina, kent ve iklim ilişkisi (Du vd., 2014). (Yazar tarafından belirtilen kaynaktan yorumlanmıştır)

Figure 5. The relationship between building, city and climate (Du et al., 2014). (Interpreted from the source cited by the author)

Geçmişte çevresel ve ekolojik stratejiler kentsel mekansal planlamanın sadece küçük bir parçası iken; günümüzde ekolojik stratejiler kentsel mekansal planlama ve geliştirmede en önemli içerik ve ön koşul olarak sunulmaktadır. Kentin yapısal çerçevesi ve kentin doğal çevresi birbirini tamamlayıcı ve yakından ilişkili olmalıdır. Bilimsel ve makul bir kentsel yapısal çerçeve ve yerleşim, kentteki doğal çevreden tam anlamıyla faydalanabilmekte ve doğal çevrenin etkin bir şekilde korunmasını sağlayabilmektedir. Aksine, kentsel yapı, çerçeve ve yerleşim mantıksız ise, kentteki doğal çevreye zarar vermesi muhtemeldir. Kentsel yapı ve çevre düzeni, kentin tarihi koşulları, trafik koşulları ve çeşitli binaların planlanması gibi kentsel yapının çerçevesini ve düzenini etkileyecek çeşitli faktörlerden oluşmakta ve etkilenmektedir. Bu nedenle, kentsel alanı planlarken, kentin gelişimini daha sürdürülebilir kılmak için, kentsel yapının çerçevesini ve düzenini, doğal çevreyi korumanın çevresel ve ekolojik gereksinimlerine göre ayarlamak gerekmektedir (Pathak vd., 2020). Örneğin bina tasarımında yapı sektörünün çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin önüne geçebilmek için sertifikasyon programları geliştirilmiştir. Birtakım kriterler içeren bu sertifikalar, binaları kapsamlı ve objektif olacak şekilde bir değerlendirmeye tabi tutmaktadır. Bahsi geçen binanın çevresel ve ekolojik performansının değerlendirilmesiyle tasarımda kalitenin artması, bazı durumlarda maliyetin düşmesi hatta binanın pazarlama değerinde de bir artış beklenmektedir (Sev, 2009). Geliştirilen bu sertifikasyon programları ile yapı sektörünün çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Bu programlardan BREEAM ve LEED öne çıkmaktadır.

Ölçütlere dayalı ilk değerlendirme sistemi olan Yapı Araştırma Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodu (BREEAM), 1990 yılında İngiltere’de

bulunan Yapı Araştırma Kurumu (BRE) tarafından geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Kurum çevresel kalkınmayı değerlendirme sisteminin merkezine koymuştur. Bu sistemle yeni binalar değerlendirilmektedir. Örnek olarak eko konut, okul, hastane, cezaevi, yurt, adliye, endüstri yapısı, apartman, alışveriş merkezi ve bakımevi gibi binalar değerlendirilmektedir. İsteğe bağlı olacak şekilde, kesin değerlendirme öncesinde bir ön değerlendirme yapılmaktadır. Geniş bir değerlendirme yelpazesine sahip değerlendirme tabloları ile binaların çevresel performansları farklı kategorilerde değerlendirilmektedir. Değerlendirme işlemi ilgili kurumun lisanslı değerlendirme uzmanları aracılığıyla yapılmaktadır. Değerlendirme sonunda tablolardan elde edilen puanlarla binalar Seçkin (Outstanding), Mükemmel (Excellent), Çok İyi (Very Good), İyi (Good) ve Geçer (Pass) şeklinde derecelendirilmektedir (Sev, 2009). Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (LEED) programı 1998 yılında Amerikan Yeşil Binalar Konseyi (USGBC) tarafından geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Değerlendirme aşaması şeffaf bir şekilde olmaktadır. Bu değerlendirme sistemi ilgili kuruma bağlı lisanslı değerlendirme uzmanlarının yanı sıra halka da açıktır. Bu sertifikasyon sistemi önceleri yeni binalar için geliştirilse de sonrasında farklı bina türlerini de değerlendirme sistemine alacak şekilde geliştirilmiştir. Değerlendirme sonucunda yapılan puanlama sisteminde sertifikanın düzeyi belirlenmektedir. LEED sertifikasyon sisteminde 4 aşama bulunmaktadır. Bu aşamalar; Platin (Platinum), Altın (Gold), Gümüş (Silver) ve Sertifikalı (Certified)’dır (Sev, 2009). İki sertifikasyon programı karşılaştırıldığında LEED ve BREEAM’ın değerlendirmeye aldığı birçok konu ortak olmasına rağmen değerlendirmede kullandığı metotların farklı olduğu görülmektedir. Buna örnek olarak enerji tasarrufunda, LEED binanın enerji harcama

potansiyelini hesaplarken, BREEAM bina tarafından salınan CO₂ miktarını hesaplamaktadır. BREEAM binaların çevreyle olan ilişkisini yakından incelemekte ve çevreye verdiği zararları minimuma indirmeyi amaçlamaktadır. LEED ise bina kullanıcılarının sağlığını ve uygun konfor koşullarını daha ön planda tutmaktadır. Sertifikalar esasen, binaların belirli kriterlere göre değerlendirilmesi sonucunda binalara verilen bir tür etikettir. Ülkemizde LEED ve BREEAM sertifika programları uygulanmaktadır. İzmir’de Teğet Mimarlık tarafından tasarlanan 35.Sokak BREEAM Çok İyi (Very Good) sertifikasına sahiptir. Bir konut projesi olan 35.Sokak, çevreci yaklaşım ve yüksek enerji tasarrufuna yönelik bir sistemle inşa edilmiştir. Projenin yapımında kullanılan çelik sistem %90 oranında geri dönüştürülebilir malzemeden oluşmaktadır. Böylelikle, bina ömrünü tamamlayıp yıkıldığında malzemeler geri dönüşümle tekrar kullanılabilir. İstanbul’da Emre Arolat Architects tarafından tasarlanan Kağıthane OfisPark LEED Altın sertifikasına sahiptir. Tasarım %24 oranında enerji tüketiminde anında tasarruf sağlamaktadır. Isıtma ve soğutma merkezi sistem ile sağlanmaktadır. İç mekan hava kalitesinin sağlanması adına zehirli gazlar içermeyen boya ve benzeri ürünler kullanılmıştır. Az katlı ofislerin bir avlu etrafında toplanma konsepti ile tasarlanmıştır. LEED sertifikasına sahip diğer örnek ise Gebze Organize Sanayi Bölgesi’nde bulunan Siemens ofis ve üretim merkezidir. LEED Altın sertifikasına sahiptir. İnşaat aşamasında oluşması muhtemel çevre kirliliğini azaltmak adına birçok tedbir alınmıştır. Gün ışığından en yüksek seviyede faydalanarak elektrik tüketiminin en az seviyede tutulması hedeflenmektedir. Binanın çatısında konumlanan güneş enerjisi sitemleri ile sıcak su elde edilmektedir. Binanın yapımında kullanılan malzemelerin %35’i geri dönüştürülmüş malzemelerden seçilmiştir (Arkitera, 2021).

Son zamanlarda uluslararası ve ulusal platformda da sıklıkla gündeme gelen küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında tasarımın sürdürülebilir olması büyük önem taşımaktadır. Sertifikasyon programlarının tasarım sürecine dahil edilmesi mücadele anlamında önem arz etmektedir. Binanın hem inşaat aşamasında hem yapım aşamasında hem de kullanım aşamasında atmosfere bıraktığı zehirli gazlar, tükettiği enerji ve ortaya çıkan maliyet sürdürülebilir insan yerleşmeleri oluşturmak ve kaliteli kentsel mekanlar üretebilmek adına dikkat edilmesi gereken unsurlardır. Daha çok insana ulaşmayı amaç edinen kapsayıcı tasarımla üretilen mekanın

bir sertifikaya sahip olması, kullanıcılara daha sağlıklı ve verimli bir mekan sunacağı anlamına gelmektedir. Kapsayıcı tasarım zamanla değişen çevresel ve ekolojik koşullara uyum sağlamayı ve konfor koşullarını korumayı hedeflemektedir. Bunun yanı sıra kullanıcının mevcut durumunu ve gelecekte de gerçekleşmesi muhtemel durumları önceden düşünerek tasarıma dahil etmektedir. Son yıllarda sıklıkla gündeme gelen kapsayıcı mimari tasarımın önemi gittikçe daha da artmaktadır.

4. Değerlendirme ve öneri

4. Assessment and recommendation

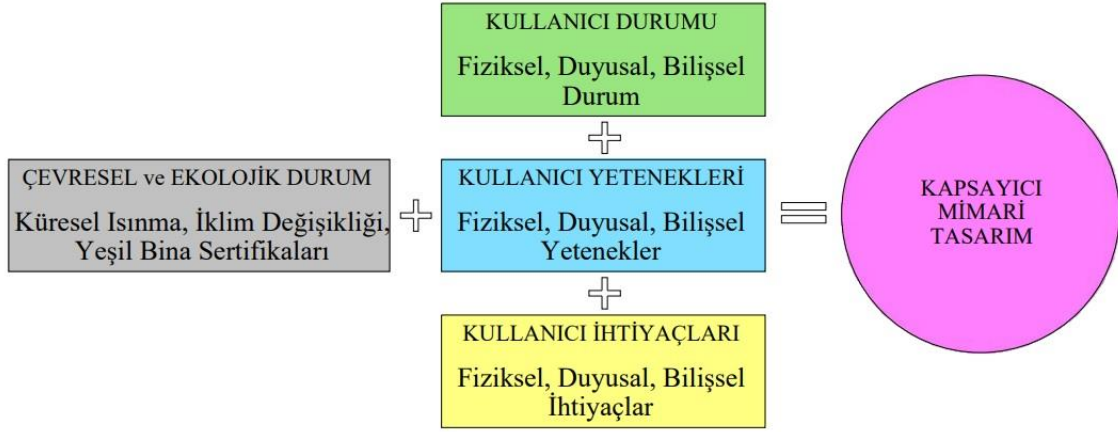
Son yıllarda tasarım ortamlarında sıklıkla gündeme gelen kapsayıcı mimari tasarım yaklaşımının ülkemizdeki mimari araştırmalara henüz dahil edilmediği görülmektedir. Bu sebeple bu makalede ülkemiz için kapsayıcı mimari tasarım modelinin oluşturulması hedeflenmiştir. Kapsayıcı mimari tasarım modeli çevre ile insan etkileşimlerindeki çeşitliliği ön plana çıkarmak ve tasarım kararlarının insan üzerindeki etkisinin neler olacağını düşünmeyi desteklemektedir. Bu modelde öncelikle çevresel ve ekolojik durum belirlenmelidir. Kullanıcının mevcut durumu, yetenekleri ve ihtiyaçlarına ait bilgiler toplanarak tasarıma dahil edilmelidir. Amacı birbirinden fiziksel, duyuşsal ve bilişsel olarak farklı daha çok insanı tasarıma dahil etmek olan kapsayıcı mimari tasarım yaklaşımının böylelikle başarılı olması beklenmektedir. Bunlara ek olarak tasarıma başlamadan önce problem net bir şekilde ortaya konmalı ve disiplinler arası ortak çalışmalar yapılmalıdır. Kapsayıcı mimari tasarıma ulaşmada ve tasarımın başarılı olmasında belirlenen yöntemle ait bir model önerisi Şekil 6’da gösterilmektedir.

Stratejik bir tasarım şablonu olarak gösterilen ve Şekil 6’da sunulan tasarım yöntemi modeli, tasarım profesyonellerince insanların yeteneklerini keşfetmelerine ve farklı kullanıcı profillerinin ihtiyaçlarının ve isteklerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olarak küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi süreç içerisinde ortaya çıkan sorunlarla mücadele kapsamında ve değişen çevresel ve ekolojik stratejilerle birlikte daha kapsayıcı bir tasarım süreci geliştirme potansiyeline sahiptir. Bu yöntem, daha kapsayıcı, erişilebilir, ulaşılabilir ve algılanabilir bina tasarımının ihtiyaçlarının ve dikkate alınması gereken tamamlayıcı yönlerinin belirlenmesini kolaylaştırmaktadır.

Sürdürülebilirliğin sağlanması için yapılan tasarımın değişen iklime uyum sağlaması beklenmektedir. Bu yüzden kullanılan malzeme, tasarıma ait kararlar ve sertifikasyon sistemlerinin

uygun yasa ve yönetmeliklerde belirtilmesi gerekmektedir. Ülkemizde henüz bu yönde bir çalışma bulunmamaktadır. Kapsayıcı tasarım yaklaşımının ülkemizde kullanır hale gelebilmesi için mimarlık eğitiminde ve uygulamada kullanılması, toplumun bilinçlendirilmesi, dezavantajlı grupların tasarıma dahil edilmesi, yasa

ve yönetmeliklerin bu doğrultuda düzenlenmesi gerekmektedir. Çevresel ve ekolojik değişimlerden etkilenen ülkemizde sürdürülebilir yerleşmeler ve tasarımların ortaya çıkması için yerel yönetimlerden başlayarak küresel ısınma ve iklim değişikliğine uyum kapsamında sosyal boyut göz ardı edilmeden stratejik kararlar alınmalıdır.



Şekil 6. Kapsayıcı mimari tasarıma ait bir model önerisi.

Figure 6. A model proposal for inclusive architectural design.

5. Sonuç

5. Conclusion

Kapsayıcı tasarım, mümkün olduğu kadar çok insanı tasarıma dahil etmeyi amaçlayan güncel bir tasarım yaklaşımıdır. Bu tasarım yaklaşımı hepimizi ilgilendirmektedir. Çünkü her insanın yeteneği farklıdır ve yaşam boyunca da değişiklik göstermektedir. Ayrıca kapsayıcı tasarım kentsel ve peyzaj tasarımı seviyesinden detaylandırmaya ve tefriş gibi iç mekan öğelerinin seçimine kadar, yapıyı çevrenin farklı ölçeklerinde tasarım kararlarında çıkarımlara sahip olan bir tasarım yaklaşımıdır. Kapsayıcı mimari tasarım bağlamında binalarda kullanılan sertifikasyon sistemi ile çevresel tahribatın en aza indirilmesi, ekosistemlerin de korunması amaçlanmaktadır. Tasarımda insan çeşitliliğini ve yapıyı çevreye etkisini düşünerek kararlar alınmalıdır. Kapsayıcı mimari tasarım, farklı mekansal nitelikler ve alanları birden çok şekilde kullanmak için fırsatlar sunarak, çeşitlilik gösteren ve yaşlanan toplumumuzun zorluklarının sürdürülebilir bir şekilde ele alınmasına yardımcı olma potansiyeline sahiptir. İmkansız gibi görünen kapsayıcı mimari tasarım yaklaşımı, uygun yönetmeliklerde yer aldığı takdirde sürdürülebilirlik adına daha olumlu sonuçlar alınacağı aşikardır.

Görülmektedir ki; hep var olan insan ve doğa ilişkisi, insanın tek taraflı sömürsü sonucunda çevresel ve ekolojik koşullarda değişiklikler ortaya

çıkarmaktadır. Buna sebep olan ve bu durumdan da sağlık açısından zarar gören insan olmaktadır. Kapsayıcı mimari tasarım, sadece engelli bireylere yönelik olmamakla beraber çevresel, ekonomik, sosyal ve kültürel bütün değerleri içine alan bir tasarım yaklaşımıdır. Kapsayıcı tasarım ile birlikte günümüz ve gelecek koşullar düşünülerek tasarıma farklı özelliklere sahip grupların dahil edilmesiyle sürdürülebilir mimari ve planlama anlayışının ön plana çıkması sağlanmaktadır. Gelecekte mimarlık meslek eğitiminde ve uygulamalarında makalede incelenen ve Şekil 6'da stratejik bir tasarım şablonu olarak sunulan kapsayıcı mimari tasarım modelinin bir an evvel uygulamaya geçilmesi ve kurumlar tarafından geleceğe yönelik bir strateji olarak kabul edilmesi gerekmektedir. Kapsayıcı mimari tasarım yaklaşımı ile birlikte akreditasyon, etiketleme ve sertifika programları ile bir standart oluşturulmalı ve böylelikle küresel ısınma ve iklim değişikliğine hazır olunmalıdır. Unutulmamalıdır ki günümüzde öneminin anlaşıldığı ve gelecekte daha da önemli olacağı düşünülen sürdürülebilir mimari tasarım ve planlama bir tercih değil artık bir zorunluluktur.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazarların araştırmaya olan katkı oranları eşittir ve çalışmanın her aşamasında birlikte görev yapmışlardır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Alkin, E., & Ikin, A. (1991). Ekonomik ve Sosyal Sorunlar Çözüm Önerileri Dizisi 1, Çevre Sorunları, TOBB, İstanbul: 1-6.
- Arkitera (2021, 15 Kasım). <https://www.arkitera.com/haber/yesil-bina-etutleri/>
- Basnak, M., Tauke, B., & Weidemann, S. (2015). Universal design in architectural education: who is doing It? How is it being done? in: A. Aksamija, J. Haymaker, A. Aminmansour (Eds.), Future of Architectural Research. Proceedings of the Architectural Research Centers Consortium ARCC 2015 Conference, Perkins+Will, pp. 670-678.
- C40 (2021, 12 Kasım). C40 Cities, www.c40.org/
- CABE (2006). Commission for Architecture and the Built Environment, <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20110118095356/http://www.cabe.org.uk/files/the-principles-of-inclusive-design.pdf>
- Coleman, R. (1994). The case for inclusive design e an overview, in: Proceedings of the 12th Triennial Congress of the International Ergonomics Association, International Ergonomics Association, Toronto, August 15-19.
- Connell, B.R., Jones, M., Mace, R., Mueller, J., Mullick, A., Ostroff, E., Sanford, J., Steinfeld, E., Story M. & Vanderheiden, G. (1997). The Principles of Universal Design, NC State University, Center for Universal Design, College of Design, Raleigh (NC). http://www.ncsu.edu/ncsu/design/cud/about_ud/udprinciplestext.htm.
- Design Council (2021, 13 Kasım). Inclusive Design Education Resource, Design Council, London, UK. <http://www.designcouncil.info/inclusivedesignresource/>
- Du, X., Bokel, R., & Van Den Dobbelsteen, A. (2014). Building microclimate and summer thermal comfort in free-running buildings with diverse spaces: a Chinese vernacular house case, Building and Environment. Elsevier Ltd 82 215–227, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.022>
- Heylighen, A. (2014). About the nature of design in universal design, Disabil. Rehabilitation 36 (16) 1360-1368.
- Heylighen, A., Van Doren, C., & Vermeersch, P. (2013). Enriching our understanding of architecture through disability experience, Open House Int. 38 (1) 7-19.
- Holden, R. J., Carayon, P., Gurses, A. P., Hoonakker, P., Hundt, A. S., Ozok, A. A., & RiveraRodriguez, A. J. (2013). SEIPS 2.0: A human factors framework for studying and improving the work of healthcare professionals and patients. Ergonomics. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.838643>.
- ICLEI (2021, 13 Kasım). International Council for Local Environment Initiatives, www.iclei.org/
- IPCC (2021, 15 Kasım). Cities and Climate Change Science Conference, <http://www.ipcc.ch/meetings/cities/>
- IPCC, AR5 Report, Working Group I: Climate Change (2013): The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers, ISBN: 978-92-9169-138-8.
- IPCC, AR5 Report, Working Group III: Climate Change (2014): Mitigation of Climate Change, Summary for Policy Makers.
- Johnson, J. ve Layer, G., (2017). Inclusive Teaching and Learning in Higher Education as a route to Excellence, <https://www.gov.uk/government/publications/inclusive-teachingandlearningin-higher-education>, (Erişim tarihi: 09.11.2021).
- Kulkarni, M., & Gopakumar, K.V. (2014). Career management strategies of people with disabilities, Hum. Resour. Manag. 53 (3) 445-466.
- Muskens, L., Van Lent, R., Vijfinkel, A., Van Cann, P., & Shahid, S. (2014). Never too old to use a tablet: Designing tablet applications for the cognitively and physically impaired determining the design guidelines: Literature review. In: The 14th international conference on computers helping people with special needs (pp. 391-398).
- National Disability Authority, (2011). UN convention on the rights of persons with disabilities and Council of Europe Disability Action Plan, undated. Cited, in: Ostroff, E. (Ed.), Universal

- Design: an Evolving Paradigm, Universal Design Handbook, second ed., McGraw-Hill, , 1.3-1-11.
- Ostroff, E. (2011). Universal Design: an Evolving Paradigm. Universal Design Handbook, second ed., McGraw-Hill, 1.3-1-11.
- Pallasmaa, J. (2005). *The Eyes of the Skin*, John Wiley & Sons.
- Paris Agreement (2016). https://unfccc.int/sites/default/files/resource/paris_agreement_publication.pdf
- Pathak, U., Kant, R., & Shankar, R. (2020). Price and profit decisions in manufacturer-led dual-channel supply chain configurations. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11, 377–400, <https://doi-org.proxy2.cl.msu.edu/10.5267/j.ijiec.2020.1.002>.
- Sev, A. (2009). *Sürdürülebilir Mimarlık, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları*, İstanbul, 1- 55.
- Skjerve, R., Giannoumis, G.A., & Naseem, S. (2016). An intersectional perspective on web accessibility, in: P. Langdon, J. Lazar, A. Heylighen, H. Dong (Eds.), *Designing Around People*, Springer, pp.13-22.
- Smith-Jackson, T. L., Resnick, M. L., & Johnson, K. T. (2013). *Cultural ergonomics: Theory, methods, and applications*. CRC Press.
- Steinfeld, E., & Tauke, B. (2002). Universal designing, in: J. Christophersen (Ed.), *Universal Design. 17 Ways of Thinking and Teaching*, Husbanken, pp. 165-189.
- Stockholm Declaration (2004). EIDD Design for All Europe, <https://dfaeurope.eu/what-is-dfa/dfa-documents/the-eidd-stockholm-declaration-2004/>
- UN (2021, 13 Kasım). United Nations, <http://www.un.org/disabilities/convention/conventionfull.shtml>
- UN-Habitat III, (2016). Outcome Document, <https://www2.habitat3.org/bitcache/99d99fbd0824de50214e99f864459d>.
- Valdez, R. S., Gibbons, M. C., Siegel, E. R., Kukafka, R., & Brennan, P. F. (2012). Designing consumer health IT to enhance usability among different racial and ethnic groups within the United States. *Health and Technology*, 2(4), 225233. <https://doi.org/10.1007/s12553-012-0031-6>.
- Van der Linden, V., Annemans, M. & Heylighen, A. (2016). Architects' approaches to healing environment in designing a Maggie's Cancer Caring Centre, *The Design Journal*, 19(3), 511-533.
- Veinot, T. C., Mitchell, H., & Ancker, J. (2018). Good intentions are not enough: How informatics interventions can worsen inequality. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 25(8), 1080-1088. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocy052>.
- Vermeersch, P., & Heylighen, A. (2013). Rendering the tacit observable in the learning process of a changing body, in: N. Nimkulrat, K. Niedderer, M. Evans (Eds.), *Knowing inside Out-Experiential Knowledge, Expertise and Connoisseurship*. EKSIG 2013. Loughborough, Loughborough University, July 4-5, pp. 259-270.
- Wauters, H., Vermeersch, P.W., & Heylighen, A. (2014). Reality check: notions of accessibility in today's architectural design practice, in: Y.-K. Lim, K. Niedderer, J. Redstrom, E. Stolterman, A. Valtonen (Eds.), *DRS 2014: Design's Big Debates*. € Umeå, Design Research Society & Umeå Institute of Design, June 16-19, pp. 1482-1491.
- Weisman, L.K. (2000). Creating the universally designed city: prospects for the new century, *Architectural Theory Review*, 5(2), 156-173.
- WHO (2021, 14 Kasım). World Health Organisation, <http://www.who.int/topics/ageing/en/>

Farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansına etkisi

Impact of different troposphere models on the real-time multi-GNSS PPP performance

Berkay BAHADUR*^{1,a}

¹Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya, Ankara

• Geliş tarihi / Received: 22.01.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 05.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.04.2022

Öz

IGS (International GNSS Service) gerçek zamanlı ürünlerin kullanıma açılmasıyla gerçek zamanlı Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) uygulamaları GNSS (Global Navigation Satellite Systems) kullanıcıları arasında ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Troposferin GNSS sinyalleri üzerindeki etkisi gerçek zamanlı PPP çözümü açısından en önemli hata kaynaklarından bir tanesidir. PPP tekniğinde troposferik gecikmenin kuru bileşeni genellikle deneysel modeller aracılığıyla düzeltilirken ıslak bileşen tahmin sürecinde bilinmeyen bir parametre olarak kestirilir. Dolayısıyla PPP çözümünde kullanılan troposfer modeli elde edilecek çözüm performansı üzerine önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle bu çalışmanın temel amacı farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansına olan etkisini incelemektir. Çalışma kapsamında GNSS çözümlerinde en sık kullanılan Saastamoinen ve Hopfield modellerinin GPT (Global Pressure and Temperature) 2 ve 3 modelleri ile ayrı ayrı kullanıldığı toplamda dört farklı troposfer modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda 19-28 Aralık 2021 tarihleri arasındaki on günlük dönem için toplamda on altı farklı IGS istasyonundan elde edilen gözlem verisi dört farklı troposfer modeli kullanarak işlenmiştir. PPP çözümleri konum belirleme performansına ek olarak toplam zenit gecikme (zenith total delay, ZTD) kestirimi açısından da analiz edilmiştir. Sonuçlar, en yüksek konum belirleme performansının Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanıldığı durumda elde edilebileceğini göstermektedir. İlgili çözümden elde edilen üç boyutlu konum doğruluğu 2.72 cm olup en yakın çözüme kıyasla %9.2 oranında daha iyidir. Öte yandan, ZTD kestirimi açısından en iyi performans yine Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanılması durumunda elde edilmiştir. Bu çözümün ise ZTD kestirim doğruluğu 1.24 cm olarak hesap edilmiştir ve bu değer en yakın çözüme göre %10.2 oranında daha iyi bir performansa işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Gerçek zamanlı, GNSS, Hassas Nokta Konumlama, PPP, Troposfer

Abstract

With the initialization of IGS (International GNSS Service) real-time service products, real-time Precise Point Positioning (PPP) applications have been a popular topic within the GNSS (Global Navigation Satellite Systems) users. The impact of the troposphere on GNSS signals is one of the most crucial error sources regarding the real-time PPP solution. In the PPP technique, the dry component of tropospheric delay is usually corrected by means of empirical models, while its wet component is estimated as an unknown parameter in the adjustment process. Hence, the troposphere model employed in the PPP solution has a considerable impact on the performance of the obtained solution. Therefore, the main objective of this study is to investigate the impact of different troposphere models on the performance of real-time multi-GNSS PPP. As a part of this study, four different troposphere models, where Saastamoinen and Hopfield models that are most frequently used in GNSS solutions are used together with GPT (Global Pressure and Temperature) 2 and 3 models separately, were constituted. In this context, the observation dataset acquired from a total of 16 different IGS stations over a ten-day period of December 19-28, 2021, were processed utilizing four different troposphere models. In addition to the positioning performance, PPP solutions were also analyzed in terms of zenith total delay (ZTD) estimation. The results show that the best positioning performance can be obtained when the Saastamoinen model is used in combination with GPT3. The three-dimensional positioning accuracy acquired from the corresponding solution is 2.72 cm, which is better than the closest solution by a ratio of 9.2%. Besides, in terms of the ZTD estimation, the best performance is achieved again in the case when the Saastamoinen model is used in combination with GPT3. For the related solution, the accuracy of ZTD estimation is calculated as 1.24 cm and this value indicates a better performance by a ratio of 10.2% compared with the closest solution.

Keywords: Real-time, GNSS, Precise Point Positioning, PPP, Troposphere

*a Berkay BAHADUR; berkaybahadur@hacettepe.edu.tr, Tel: (0312) 297 69 90, orcid.org/0000-0003-3169-8862

1. Giriş

1. Introduction

Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) yalnızca tek bir alıcı kullanarak küresel ölçekte yüksek konum doğruluğu sağlayabilen Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) temelli bir konum belirleme tekniğidir (Zumberge vd., 1997; Kouba & Héroux, 2001). PPP tekniğinde uydu yörünge ve saat hatasını ortadan kaldırmak için küresel bir ağdan, örneğin IGS (International GNSS Service), elde edilen hassas ürünler kullanılmaktadır. Diferansiyel ve/veya rölatif konum belirleme tekniklerinde ihtiyaç duyulan referans istasyon kullanımını ortadan kaldırması PPP tekniğinin en büyük avantajı olarak görülmektedir. Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında PPP tekniği referans istasyon gerektirmemesi nedeniyle hem işlem maliyetini düşürmekte hem de uygulamada önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu nedenle PPP son yıllarda GNSS kullanıcıları arasında yüksek ilgi gören bir konu olmuş ve atmosferin modellenmesi, yapı sağlığının izlenmesi, yer kaynaklı tehlikelerin belirlenmesi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmıştır (Tu vd., 2013; Lu vd., 2015; Wright vd., 2012; Li vd., 2013; Yigit & Gurlek, 2017). Ayrıca son yıllarda ortaya çıkan Galileo ve BDS gibi yeni küresel navigasyon sistemleri PPP tekniğinin en büyük dezavantajı olarak görülen yakınsama süresinin iyileştirilmesi açısından önemli fırsatlar getirmiş ve böylece tekniğin popülerliğinin giderek artmasına neden olmuştur (Li vd., 2015; Pan vd., 2017; Bahadur & Nohutcu, 2018a).

Standart PPP yaklaşımında kullanılan hassas ürünler yaklaşık iki haftalık bir gecikme ile elde edildiğinden bu ürünlerin gerçek zamanlı GNSS uygulamalarında kullanılması mümkün değildir. Bu durum PPP tekniğinin daha geniş kullanım alanlarına ulaşmasını engelleyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir. Ancak son yıllarda gerçek zamanlı GNSS çözümlerine olan ilginin bir sonucu olarak IGS 2013 yılında kendi gerçek zamanlı servisini hayata geçirmiştir. Bu sayede IGS analiz merkezleri tarafından üretilen uydu yörünge ve saat bilgilerine anlık olarak erişmek ve dolayısıyla gerçek zamanlı PPP çözümünü gerçekleştirmek mümkün hale gelmiştir (Hadas & Bosy, 2015). Bu tarihten itibaren yapılan birçok çalışma gerçek zamanlı PPP çözümünün GNSS uygulamalarında başarıyla kullanılabilirliğini göstermiştir. Örneğin, Shi vd. (2017) gerçek zamanlı PPP çözümünün havai nirengi uygulamalarında başarıyla kullanılabilirliğini göstermiştir. Zhao vd. (2018a) gerçek zamanlı PPP

çözümü ile atmosferdeki yağışa dönüşebilir su buharı miktarının belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiş ve bu yolla yüklü yağışların büyük çoğunlukla önceden tahmin edilebileceği sonucuna varmıştır. Ayrıca, Jin ve Su (2019) yaptıkları çalışmada yüksek frekanslı GNSS verisi ve PPP çözümü kullanarak deprem kaynaklı yer değişimlerinin gerçek zamanlı izlenebileceğini belirtmiştir. Son olarak, Nie vd. (2020) düşük maliyetli GNSS alıcılarıyla gerçek zamanlı PPP performansını incelemiş ve yatayda yarım metrelik konum doğruluğu elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Ancak belirtmelidir ki bu çalışmalarda elde edilen konum doğruluğu ilgili hata kaynaklarının uygun modeller kullanılarak düzeltilmesi veya gerekli stokastik yaklaşımlarla kestirilmesiyle yakından ilişkilidir.

Gerçek zamanlı PPP çözümünde ele alınması gereken en önemli hata kaynaklarından bir tanesi troposferin GNSS sinyalleri üzerine olan etkisidir. Troposfer etkisi, GNSS çözümlerinde genel olarak kuru ve ıslak bileşenlerine ayrılarak ele alınır (Davis vd., 1985). Troposferik etkinin kuru bileşeni deneysel modeller yardımıyla elde edilebilirken atmosferdeki su buharı miktarındaki ani değişimler nedeniyle ıslak bileşeni modellemek oldukça zordur. Bu nedenle PPP tekniğinde troposferik etkinin kuru bileşeni modeller aracılığıyla düzeltilirken ıslak bileşen ise bir bilinmeyen parametre olarak kestirilmektedir (Kouba & Héroux, 2001). Literatürde troposferik etkinin kuru bileşenini elde etmek için geliştirilmiş birçok deneysel modele rastlanmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan iki tanesi Saastamoinen (1972) ve Hopfield (1969) modelleridir. Bu modellerde istasyon konumuna ek olarak basınç ve sıcaklık gibi meteorolojik parametreler kullanılarak kuru troposferik gecikme hesap edilmektedir. Burada ihtiyaç duyulan meteorolojik parametreler ise genellikle küresel basınç ve sıcaklık modellerinden elde edilmektedir, örneğin GPT (Global Pressure and Temperature) (Böhm vd., 2007). Bu nedenle kullanılan troposfer modeli ve meteorolojik parametrelerin elde edilmiş olması PPP performansı açısından önem arz etmektedir. Literatür incelendiğinde mevcut çalışmaların çoğunlukla gerçek zamanlı PPP çözümü ile troposferik gecikme kestirimi üzerine odaklandığı görülmektedir (Dousa & Vaclavovic, 2014; Hadas vd., 2017; Zhao vd., 2018b). Mevcut literatürde farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı PPP performansı açısından değerlendirildiği kayda değer bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışmanın temel amacı farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı

PPP performansına olan etkisinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda dört küresel sistemin, yani GPS, GLONASS, Galileo ve BDS, dahil edildiği çoklu-GNSS PPP çözümünün konum belirleme ve toplam zenit gecikme (zenith total delay, ZTD) kestirim performansları çeşitli uygulamalar aracılığıyla analiz edilmiştir.

2. Metodoloji

2. Methodology

Bu bölümde öncelikle gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP modeli sunulacaktır. Ardından çalışmada kullanılan iki farklı troposfer modeli detaylarıyla birlikte açıklanacaktır.

2.1. Gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP modeli

2.1. Real-time multi-GNSS PPP model

PPP tekniğinin ölçü modeli çift frekanslı kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız (İB) doğrusal kombinasyonlarından oluşmaktadır. Daha önceden de belirtildiği üzere PPP tekniğinin en temel özelliği uydu yörünge ve saat hatalarını gidermek için küresel bir ağdan elde edilen hassas ürünlerin kullanılmasıdır. Gerçek zamanlı PPP çözümünde ise IGS gerçek zamanlı servisi tarafından yayınlanan uydu yörünge ve saat düzeltmeleri kullanılmaktadır. IGS hassas ürünleri gibi gerçek

zamanlı ürünler de belirli bir sinyal ya da sinyal kombinasyonu baz alınarak üretilmektedir. Örneğin, GPS uydularına ait ürünler L1 ve L2 sinyalleri üzerindeki kod gözlemlerinin İB kombinasyonları kullanılarak üretilmektedir (Teunissen & Montenbruck, 2017). Benzer şekilde GLONASS uyduları için G1 ve G2 sinyalleri, Galileo uyduları için E1 ve E5a sinyalleri, BDS uyduları için de B1 ve B3 sinyalleri üzerindeki kod gözlemlerinin İB kombinasyonları ilgili ürünlerin üretiminde referans gözlem olarak kullanılmaktadır (Steigenberger vd., 2015). Bu nedenle IGS gerçek zamanlı ürünlerde sunulan uydu saat düzeltmeleri de bu referans gözlemler dikkate alınarak üretilir ve gerçek uydu saat hatasına ek olarak İB kombinasyonuna ait uydu kod donanım hatasını da içermektedir. Bu ürünler kullanılırken uydu kod donanım hataları orijinal saat hatasına eklenerek düzeltilmektedir. Diğer taraftan alıcı saat hatası ve ona ait kod donanım hatası aralarındaki yüksek korelasyon nedeniyle birlikte kestirilir (Kouba & Héroux, 2001). Faz donanım hataları için ayrı ürünler olmadığından bu hatalar faz belirsizlik parametresine yüklenerek tek bir bilinmeyen olarak kestirilmektedir. Tüm bunlar göz önüne alınarak çift frekanslı kod (P) ve faz (L) gözlemlerinin İB kombinasyonları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{IB}^{j,k} = \rho_r^{j,k} + c\widehat{dt}_r^j - c\widehat{dT}^{j,k} + T_r^{j,k} + \varepsilon(P_{IB}^{j,k}) \quad (1)$$

$$L_{IB}^{j,k} = \rho_r^{j,k} + c\widehat{dt}_r^j - c\widehat{dT}^{j,k} + T_r^{j,k} + \lambda_{IB}^j \widehat{N}_{IB}^{j,k} + \varepsilon(L_{IB}^{j,k}) \quad (2)$$

burada

$$c\widehat{dt}_r^j = cdt_r^j + b_{IB,r}^j, c\widehat{dT}^{j,k} = cdT^{j,k} + b_{IB}^{j,k} \text{ ve } \widehat{N}_{IB}^{j,k} = N_{IB}^{j,k} + (B_{IB,r}^j - B_{IB}^{j,k}) - (b_{IB,r}^j - b_{IB}^{j,k}) \quad (3)$$

Ayrıca r , j ve k sırasıyla alıcıyı, GNSS indeksini (G: GPS, R: GLONASS, E: Galileo, C: BDS) ve uydu numarasını göstermektedir. $\rho_r^{j,k}$ uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, c ışık hızını, \widehat{dt}_r^j ve $\widehat{dT}^{j,k}$ sırasıyla İB doğrusal kombinasyon için düzenlenmiş alıcı ve uydu saat hatasını, $T_r^{j,k}$ troposferik gecikmeyi, λ_{IB}^j ve $\widehat{N}_{IB}^{j,k}$ sırasıyla İB doğrusal kombinasyon için sinyal dalga boyunu ve düzenlenmiş belirsizlik parametresini, ε ise ilgili gözlem için çoklu-yol etkisini de içeren gözlem gürültüsünü göstermektedir. Ayrıca dt_r^j ve $dT^{j,k}$ orijinal alıcı ve uydu saat hatalarını, $b_{IB,r}^j$ ve $b_{IB}^{j,k}$ İB doğrusal kombinasyon için alıcı ve uydu kod donanım hatalarını, $B_{IB,r}^j$ ve $B_{IB}^{j,k}$ İB doğrusal kombinasyon için alıcı ve uydu faz donanım hatalarını, $N_{IB}^{j,k}$ ise İB doğrusal kombinasyon için

orijinal tam sayı belirsizlik parametresini göstermektedir.

Yukarıdaki eşitlikler PPP ölçü modelini oluşturmaktadır. (1) ve (2) eşitliklerinden görüleceği üzere her uydu sistemi için farklı alıcı ve uydu saat hatası bulunmaktadır. Bunun temel nedeni her uydu sisteminin kendine has bir zaman ölçeği kullanmasıdır. Uydu saat hataları IGS gerçek zamanlı ürünler kullanılarak düzeltilir. Alıcı saat hatasına gelince çoklu-GNSS uygulamalarında genellikle her uydu sistemi için ayrı bir saat hatası tanımlanmaz. Bunun yerine seçilen bir referans zaman ölçeğine göre, çoğunlukla GPS zamanı, eklenen diğer sistemler için sistemler arası fark (SAF) parametresi tanımlanmaktadır (Cai & Gao, 2013; Abd Rabbou vd., 2018). Sonuç olarak bu modelde üç konum

bileşeni, bir alıcı saat hatası, bir troposferik gecikme (ıslak bileşen), gözlenen her uydu için bir belirsizlik parametresi ve eklenen her yeni sistem için bir SAF parametresi bilinmeyenler vektörünü oluşturmaktadır.

2.2. Troposfer modelleri

2.2. Troposphere models

$$T_r^{j,k} = M_K(E)ZTD_K + M_I(E)ZTD_I \quad (4)$$

burada ZTD_K ve ZTD_I sırasıyla zenit doğrultusunda kuru ve ıslak troposferik gecikmeyi, M_K ve M_I ise uydunun yükselim açısına (E) bağlı iz düşüm fonksiyonunun kuru ve ıslak bileşenlerini göstermektedir. Daha önceden belirtildiği üzere troposferik etkinin kuru bileşeni istasyon konumu ve meteorolojik parametrelere bağlı olarak deneysel modeller yardımıyla düzeltilebilirken ıslak bileşeni modellemek oldukça zordur. Bu

$$ZTD_K = (0.0022768 \cdot p)/(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} h_{el}) \quad (5)$$

burada φ ve h_{el} sırasıyla istasyonun enlemini ve elipsoit yüksekliğini (m), p ise ilgili istasyon için basınç değerini (milibar) göstermektedir. Diğer taraftan troposferik etkinin kuru bileşenini

$$ZTD_K = ((77.64 \cdot p)/T) \cdot 10^{-6} \sum_{i=1}^9 (f_{K,i}/i) r_K \quad (6)$$

Burada p yine basınç değerini (milibar), T ise sıcaklık değerini (Kelvin) göstermektedir. r_K ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$r_K = \sqrt{(R_e + h_K)^2 - R_e^2 \sin^2(z) - R_e \cos(z)} \quad \text{ve} \quad h_K = 40136 + 148.72(T - 273.15) \text{ m} \quad (7)$$

burada R_e Dünya'nın yarıçapını (6378137 m), z ise ilgili uydunun zenit açısını göstermektedir. Ayrıca f_K katsayıları aşağıdaki şekilde hesap edilmektedir.

$$f_{K,1} = 1, \quad f_{K,2} = 4a, \quad f_{K,3} = 6a^2 + 4b, \quad f_{K,4} = 4a(a^2 + 3b), \quad f_{K,5} = a^4 + 12a^2b + 6b^2, \\ f_{K,6} = 4ab(a^2 + 3b), \quad f_{K,7} = b^2(6a^2 + 4b), \quad f_{K,8} = 4ab^3 \quad \text{ve} \quad f_{K,9} = b^4 \quad (8)$$

burada $a = -\cos(z)/h_K$ ve $b = -\sin^2(z)/(2h_K R_e)$ şeklinde elde edilmektedir.

Her iki modelde de görüldüğü üzere troposferik etkinin kuru bileşeni istasyonun konumuna ek olarak basınç ve sıcaklık gibi meteorolojik parametrelere dayalı olarak hesap edilmektedir. Dolayısıyla troposferik modeller ilgili istasyon için meteorolojik parametrelere ihtiyaç duyar. Bu parametreleri genel olarak yerinde ölçmek oldukça güçtür. Bunun yerine yaygın yaklaşım ilgili parametreleri küresel basınç ve sıcaklık modellerinden elde etmektir. Bu amaçla en güncel modeller olan GPT2 ve GPT3 istasyona ait meteorolojik parametrelerin elde edilmesinde

Uydu jeodezisi tekniklerinde genel bir yaklaşım olarak troposferin GNSS sinyalleri üzerine olan etkisi kuru ve ıslak bileşenlere ayrılarak ele alınır. Troposferik gecikme zenit açısı doğrultusunda modellenerek iz düşüm fonksiyonları aracılığıyla ilgili sinyal doğrultusuna indirgenmektedir. Toplam troposferik gecikme zenit doğrultusunda aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir (Davis vd., 1985).

nedenle troposferik etkinin ıslak bileşeni bir önceki bölümde de belirtildiği üzere bilinmeyen bir parametre olarak tahmin sürecinde kestirilir.

Saastamoinen (1972) model GNSS uygulamalarında kuru troposferik gecikmeyi düzeltmek için sıklıkla kullanılan modellerden bir tanesidir. Bu modele göre troposferik etkinin kuru bileşeni aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilebilir.

hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir diğer model ise Hopfield (1969) modelidir. Bu modele göre kuru troposferik gecikme aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

kullanılabilir. Bu modellerle eşlenik iz düşüm fonksiyonları VMF1 (Vienna Mapping Functions) ve VMF3 de zenit doğrultusunda modellenen troposferik gecikmeyi sinyal doğrultusuna indirmek için kullanılmaktadır (Lagler vd., 2013; Landskron, & Böhm, 2018).

3. Deneysel test ve analizler

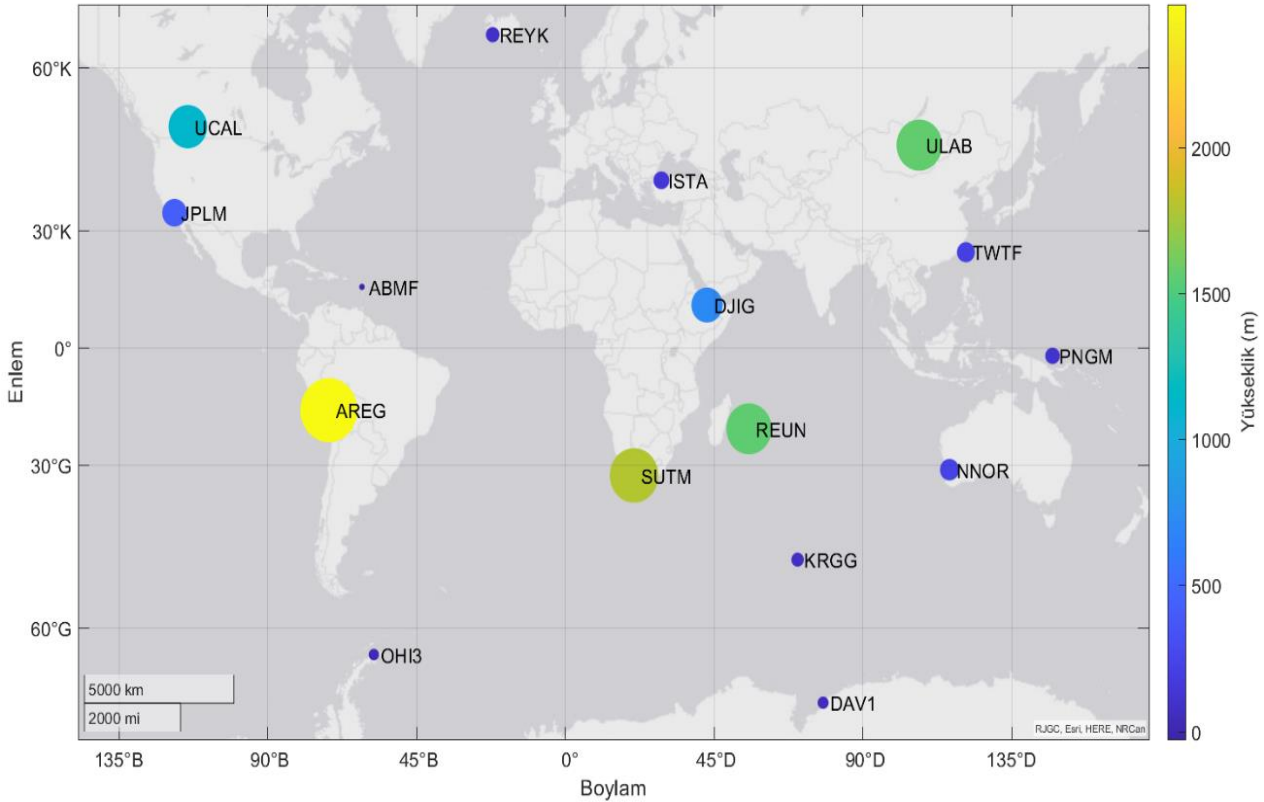
3. Experimental tests and analyses

Bu bölümde öncelikle uygulamada kullanılan veri seti ve gerçek zamanlı PPP çözümü için kullanılan

işlem stratejileri açıklanacaktır. Devamında farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı PPP performansına olan etkisi önce konum belirleme performansı ve daha sonra ZTD kestirimi açısından değerlendirilecektir.

Çalışma kapsamında 19-28 Aralık 2021 tarihleri (yılım 353 ile 362. günleri) arasındaki ardışık on gün boyunca toplamda 16 IGS istasyonunda toplanmış olan GNSS gözlem verisi kullanılmıştır. Bu istasyonların tamamı dört küresel sistemin gözlemlerini kaydedebilen çoklu-GNSS alıcılarla donatılmış olup gözlemlerin veri aralığı 30

saniedir. İstasyonlar küresel anlamda dünyayı en iyi şekilde temsil edecek ve ayrıca farklı yüksekliklere sahip olacak şekilde seçilmiştir. İstasyonlar ve tarihlerin seçiminde Kp indeks değerleri dikkate alınarak yüksek iyonosferik aktivitenin olmasından kaçınılmıştır. Ayrıca büyük tektonik hareketlerin varlığı da kontrol edilmiştir. İstasyonların yarısı kuzey diğer yarısı ise güney yarım kürede yer almaktadır. İlgili istasyonların coğrafi konumları ve elipsoidal yükseklikleri Şekil 1'de sunulmuştur. İstasyonların elipsoidal yükseklikleri-25.6 m (ABMF) ile 2489.4 m (AREG) arasında değişmektedir.



Şekil 1. Uygulamada kullanılan istasyonların coğrafi konumları ve elipsoidal yükseklikleri.

Figure 1. Geographical locations and ellipsoidal heights of the stations utilized in the experiment.

3.1. Gerçek zamanlı PPP işlem stratejisi

Bu çalışmada uydu yörünge ve saat düzeltmelerini elde etmek için IGS gerçek zamanlı servisi aracılığıyla yayınlanan ve CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) analiz merkezi tarafından üretilen SSRA00CNE0 mesajı kullanılmıştır. IGS gerçek zamanlı ürünleri ise BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) tarafından geliştirilen NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) istemci programı (BNC) yardımıyla elde edilmiştir (BNC, 2022). IGS

gerçek zamanlı ürünleri navigasyon mesajından elde edilen uydu yörünge ve saat bilgisine düzeltme olarak yayımlandığı için ilgili servis aracılığıyla sistemlere ait navigasyon mesajları da aynı şekilde elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada PPP çözümleri, PPPH yazılımının gerçek zamanlı çözümlerin gerçekleşmesine olanak sağlayan genişletilmiş bir versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bahadur & Nohutcu, 2018b). Çözümlerde uygulanan işlem stratejileri Tablo 1'de detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 1. Gerçek zamanlı PPP çözümlerinde uygulanan işlem stratejileri.**Table 1.** Processing strategies applied in the real-time PPP processes.

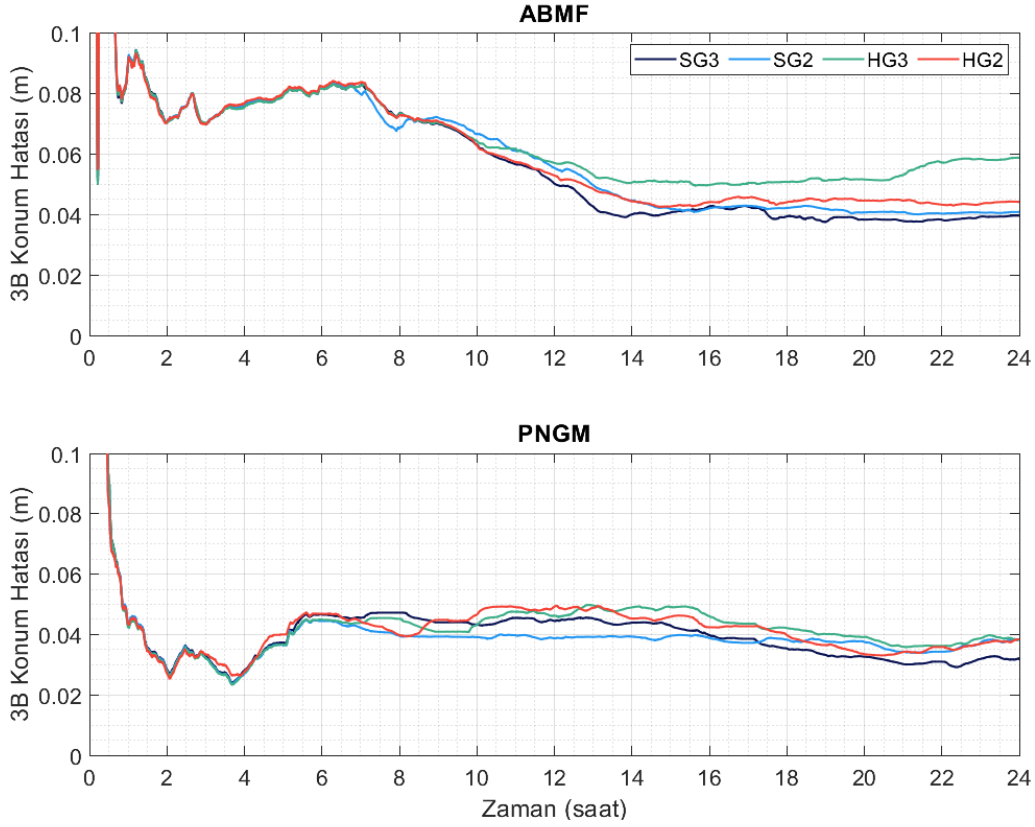
Gözlemler	GPS için L1 ve L2, GLONASS için G1 ve G2, Galileo için E1 ve E5a, BDS için B1 ve B3 sinyalleri üzerindeki çift-frekanslı kod ve faz gözlemlerinin İB kombinasyonları
Uydu yörünge ve saat düzeltmesi	CNES gerçek zamanlı ürünleri
Troposfer	
Kuru bileşen	Saastamoinen ve Hopfield modelleri ile düzeltildi
Islak bileşen	Epok bazlı kestirildi
Alıcı anten faz merkezi ve değişimi	Güncel IGS anten modeli (igs14.atx) ile düzeltildi
Rölativistik etkiler	Düzeltildi (Kouba, 2015)
Faz dönüklüğü	Düzeltildi (Wu vd., 1993)
Katı Yer gelgiti ve okyanus yüklemesi	Düzeltildi (Petit & Luzum, 2010)
Kestirim metodu	Kalman filtresi
Gözlemlerin standart sapmaları	Kod ve faz gözlemleri için 0.3 ve 0.003 m
Gözlem ağırlık yöntemi	Yükselim açısına bağlı

3.2. Konum belirleme performansı

Farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı PPP performansına olan etkisini araştırmak için Saastamoinen ve Hopfield modellerinin kullanıldığı iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Ayrıca bu modellerde ihtiyaç duyulan meteorolojik parametreleri elde etmek için de hem GPT2 hem de GPT3 modelleri eşlenik iz düşüm fonksiyonları VMF1 ve VMF3 ile ayrı ayrı kullanılmıştır. Dolayısıyla Saastamoinen GPT3, Saastamoinen GPT2, Hopfield GPT3 ve Hopfield GPT2 olmak üzere toplamda dört farklı troposferik işlem senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryolar çalışmanın devamında SG3, SG2, HG3 ve HG2 modelleri olarak adlandırılacaktır. 16 istasyona ait 10 günlük veri seti bu dört farklı senaryo altında ayrı ayrı işlenmiştir. PPP çözümlerinin konum belirleme performansını değerlendirebilmek için IGS haftalık çözümlerinde yayınlanan yüksek doğruluğa sahip istasyon koordinatları referans kabul edilerek lokal koordinat sisteminde (kuzey, doğu, yukarı) konum hataları hesaplanmıştır. Konum hataları PPP çözümünün gerçekleştirildiği her epok için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 2, 19 Aralık 2021 tarihli ABMF ve PNGM istasyonlarına ait veriler kullanılarak gerçekleştirilen farklı troposfer modellerinin kullanıldığı gerçek zamanlı PPP çözümlerinden elde edilen üç boyutlu (3B) konum hatalarını göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere kullanılan troposfer modeline göre elde edilen konum belirleme performansı önemli ölçüde değişmektedir. Farklı troposfer

modellerinin kullanılması her iki istasyon için de özellikle sekizinci saatten sonra PPP performansında kayda değer değişikliklere yol açmıştır. Gün sonundaki konum hataları incelendiğinde her iki istasyonda da SG3 modelinin kullanıldığı çözümünün diğer çözümlere göre daha düşük konum hatasına sahip olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan her bir istasyonda dört farklı troposfer modelinin kullanıldığı gerçek zamanlı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hataları için hesaplanan Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. KOH değerlerinin hesabında ilgili istasyonların on günlük dönem boyunca tüm günlük çözümleri dikkate alınmıştır. Tablodan görüleceği üzere elde edilen hatalar istasyona ve troposfer yaklaşımına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. İstasyonlar arası farklılıklar temel olarak istasyonun konumu, istasyonun yüksekliği ve atmosfer koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Aynı istasyona ait çözümlerde ise yine kullanılan troposfer modeline göre önemli değişiklikler gözlenmektedir. Tüm istasyonlar incelendiğinde en düşük KOH değerlerinin istasyonların 10 tanesinde SG3 modelinin kullanıldığı çözümde, 2 tanesinde SG2 modelinin kullanıldığı çözümde, 3 tanesinde HG3 modelinin kullanıldığı çözümde ve 1 tanesinde ise HG2 modelinin kullanıldığı çözümde elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2. 19 Aralık 2021 tarihinde ABMF ve PNGM istasyonları için farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hataları.

Figure 2. 3D positioning errors obtained from PPP solutions that different troposphere models are employed for the stations of ABMF and PNGM on December 19, 2021.

Tablo 2. Farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hataları için hesap edilen istasyon bazlı KOH değerleri (m).

Table 2. Station-wise RMS values computed for 3D positioning errors acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed (m).

İstasyon	Model			
	SG3	SG2	HG3	HG2
ABMF	0.0312	0.0360	0.0400	0.0387
AREG	0.0341	0.0342	0.0342	0.0356
DAV1	0.0310	0.0579	0.0446	0.0556
DJIG	0.0232	0.0208	0.0232	0.0239
ISTA	0.0242	0.0250	0.0239	0.0242
JPLM	0.0152	0.0163	0.0157	0.0156
KRGG	0.0212	0.0250	0.0236	0.0244
NNOR	0.0232	0.0212	0.0234	0.0234
OHI3	0.0193	0.0202	0.0196	0.0199
PNGM	0.0422	0.0433	0.0471	0.0446
REUN	0.0228	0.0313	0.0312	0.0317
REYK	0.0280	0.0278	0.0276	0.0274
SUTM	0.0284	0.0299	0.0288	0.0299
TWTF	0.0294	0.0374	0.0289	0.0376
UCAL	0.0212	0.0226	0.0221	0.0216
ULAB	0.0317	0.0338	0.0311	0.0336

On günlük dönem boyunca tüm istasyonlara ait sonuçlar göz önüne alındığında dört farklı troposfer modeli için kuzey, doğu, yukarı yönlerde elde edilen konum hataları için hesaplanan KOH değerleri Tablo 3'te verilmiştir. İlgili tablo ayrıca tüm istasyonlardan elde edilen 3B konum hataları için hesap edilen KOH değerlerini de sunmaktadır. Tablo incelendiğinde beklenildiği üzere yukarı yöndeki hatanın diğer yönlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Farklı troposfer modellerinin PPP çözümüne etkisine gelince kuzey yönde elde edilen KOH değerleri birbirine

yakınken diğer yönlerdeki değerler arasında kayda değer farklar gözlenmektedir. SG3 modelinin kullanıldığı çözümün tüm bileşenler için en düşük KOH değerine sahip olduğu yine tablodan görülmektedir. 3B konum hatası için hesaplanan KOH değerleri düşünüldüğünde SG3 modelinin kullanıldığı çözümün SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı çözümlere kıyasla gerçek zamanlı PPP'nin konum belirleme performansını sırasıyla %13.7, %9.2 ve %14.4 oranında iyileştirdiği sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Tüm istasyonlar göz önüne alınarak farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen konum hataları için hesaplanan KOH değerleri (m).

Table 3. RMS values computed for positioning errors acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed considering all stations (m).

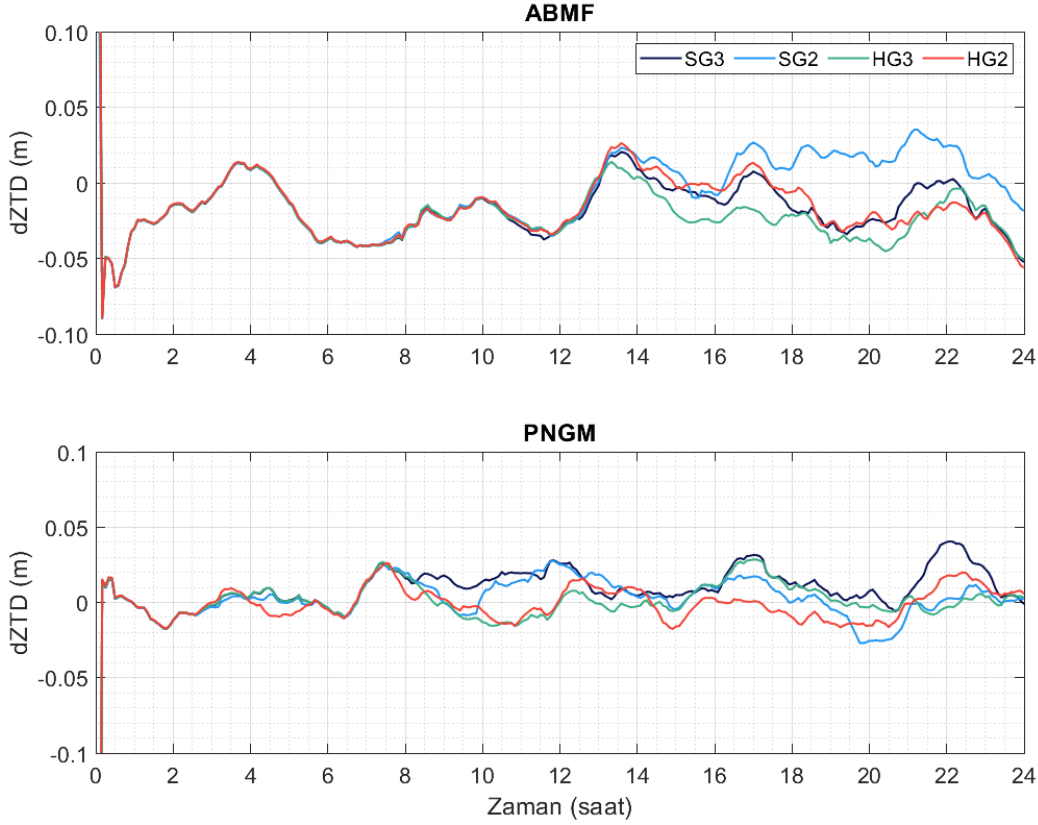
Model	Konum hatası			
	Kuzey	Doğu	Yukarı	3B
SG3	0.0095	0.0138	0.0215	0.0272
SG2	0.0099	0.0158	0.0255	0.0316
HG3	0.0097	0.0162	0.0233	0.0300
HG2	0.0098	0.0172	0.0249	0.0318

Son olarak bu çalışmada PPP çözümlerinin konum belirleme performansının bir değerlendirme ölçütü olarak yakınsama süresi incelenmiştir. Burada yakınsama süresi 3B konum hatasının 10 cm altına düştüğü ve devamındaki 10 dakika 10 cm üzerine çıkmadığı epok olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma göre test dönemi boyunca tüm istasyonlar göz önünde bulundurularak farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümleri için ortalama yakınsama süreleri hesap edilmiştir. Ortalama yakınsama süreleri SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümleri için sırasıyla 35.40, 39.06, 37.89 ve 39.38 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar SG3 modelinin kullanıldığı çözümün ortalama yakınsama süresini SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı çözümlere göre sırasıyla %9.4, %6.6 ve %10.1 oranında kısalttığını göstermektedir.

3.3. ZTD kestirim performansı

PPP tekniğinde troposferik etkinin kuru bileşeninin deneysel modellerle düzeltildiği ıslak bileşeninin de bilinmeyen bir parametre olarak tahmin sürecinde kestirildiği önceki bölümlerde belirtilmişti. Dolayısıyla troposferin kuru bileşenini düzeltmek için kullanılan model konum bileşenlerini olduğu gibi elde edilen troposfer kestirimini de etkilemektedir. Bunun sonucu olarak

kuru ve ıslak troposfer gecikmelerinin toplamı olan ZTD değeri de kullanılan troposfer modeline göre değişim göstermektedir. Bu çalışma kapsamında PPP performansının değerlendirilmesinde konum bileşenlerinin yanı sıra ZTD kestirimleri de analiz edilmiştir. ZTD kestirim performansını değerlendirmek için IGS tarafından yayınlanan hassas troposfer ürünleri referans olarak kabul edilmiş ve PPP çözümlerinden elde edilen ZTD değerleriyle arasındaki farklar (dZTD) hesaplanmıştır. IGS hassas troposfer ürünleri hassas uydu yörünge ve saat bilgileri kullanılarak PPP tekniği aracılığıyla elde edilmektedir. Bu ürünler GMF (Global Mapping Function) iz düşüm fonksiyonu kullanılarak ve ayrıca 7 derece yükselim açısının altındaki gözlemler elimine edilerek kestirilmektedir (Teke vd., 2011). IGS troposfer ürünlerinin veri aralığı 300 saniye olduğu için dZTD değerleri yalnızca ilgili epoklarda hesaplanmıştır. 19 Aralık 2021 tarihli ABMF ve PNGM istasyonlarına ait veriler kullanılarak gerçekleştirilen farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen günlük dZTD değerleri Şekil 3'te sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere gerçek zamanlı PPP çözümünden elde edilen ZTD kestirim performansı konum belirleme performansında olduğu gibi kullanılan troposfer modeline göre değişiklikler göstermektedir.



Şekil 3. 19 Aralık 2021 tarihinde ABMF ve PNGM istasyonları için farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerleri.

Figure 3. dZTD values obtained from PPP solutions that different troposphere models are employed for the stations of ABMF and PNGM on December 19, 2021.

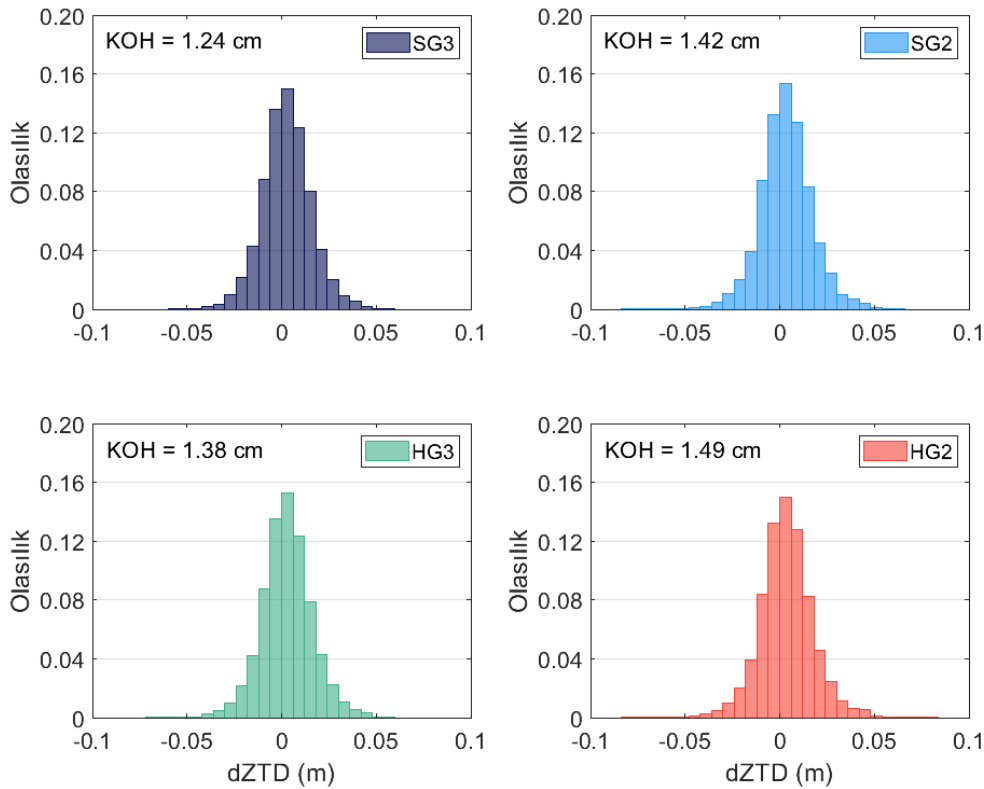
Diğer taraftan farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesaplanan KOH değerleri her bir istasyon için Tablo 4'te verilmiştir. KOH hesaplanırken istasyon bazında 10 günlük dönem boyunca çözüm gerçekleştirilen her epoka ait dZTD değeri dikkate alınmıştır. Tablodan görüleceği üzere KOH değerleri istasyona ve kullanılan troposfer modeline bağlı olarak kayda değer miktarda değişmektedir. Sonuçlar incelendiğinde dZTD'ler için en küçük KOH değerlerinin 12 istasyonda SG3 modelinin kullanıldığı çözümden, 3 istasyonda SG2 modelinin kullanıldığı çözümden ve 1 istasyonda da HG3 modelinin kullanıldığı çözümden elde edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar istasyonların büyük bir bölümünde SG3 modelinin kullanıldığı PPP çözümünün ZTD kestiriminde diğer modellerin kullanıldığı çözümlere kıyasla çok daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir.

Tüm istasyonlar göz önüne alındığında farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait olasılık dağılımları Şekil 4'te sunulmuştur. Şekilde orijinal frekans değerleri yerine ilgili frekansların toplam epok sayısına bölümünden hesaplanan olasılık değerleri kullanılmıştır. Öte yandan farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesaplanan KOH değerleri yine şekillerle birlikte verilmiştir. KOH değerleri SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümleri için sırasıyla 1.24, 1.42, 1.38 ve 1.49 cm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar SG3 modelinin kullanıldığı çözümün SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı çözümlere kıyasla %12.7, %10.2 ve %16.8 oranında daha iyi ZTD kestirim performansına sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesap edilen istasyon bazlı KOH değerleri (m).

Table 4. Station-wise RMS values computed for dZTDs acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed (m).

İstasyon	Model			
	SG3	SG2	HG3	HG2
ABMF	0.0196	0.0222	0.0217	0.0245
AREG	0.0133	0.0139	0.0135	0.0142
DAV1	0.0099	0.0112	0.0121	0.0113
DJIG	0.0145	0.0195	0.0158	0.0187
ISTA	0.0082	0.0090	0.0086	0.0090
JPLM	0.0127	0.0129	0.0129	0.0138
KRGG	0.0113	0.0116	0.0112	0.0121
NNOR	0.0116	0.0142	0.0122	0.0141
OHI3	0.0085	0.0096	0.0088	0.0097
PNGM	0.0198	0.0194	0.0200	0.0226
REUN	0.0145	0.0136	0.0141	0.0142
REYK	0.0117	0.0117	0.0123	0.0121
SUTM	0.0158	0.0151	0.0156	0.0158
TWTF	0.0124	0.0125	0.0124	0.0126
UCAL	0.0111	0.0115	0.0113	0.0111
ULAB	0.0099	0.0102	0.0103	0.0103



Şekil 4. Farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait olasılık dağılımları.

Figure 4. Probability distributions for dZTD values acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansı üzerine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla Saastamoinen ve Hopfield modellerinin hem GPT2 hem de GPT3 modelleri ile kullanıldığı toplamda dört farklı troposfer modeli oluşturulmuştur. 19-28 Aralık 2021 tarihleri arasındaki on günlük dönem için toplamda 16 IGS istasyonundan elde edilen gözlem verisi dört farklı troposfer modeli kullanılarak ayrı ayrı işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar hem konum belirleme hem de ZTD kestirim performansı açısından analiz edilmiştir.

Sonuçlar, tüm istasyonlar göz önüne alındığında SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hatalarına ait KOH değerlerinin sırasıyla 2.72, 3.16, 3.00 ve 3.18 cm olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar gerek Saastamoinen gerekse Hopfield modelleri için GPT3 modelinin kullanılması durumunda GPT2 modeline göre daha yüksek konum doğruluğu elde edilebileceğini işaret etmektedir. Bunun temel nedeni olarak GPT3'ün meteorolojik parametrelerin elde edilmesinde çeşitli iyileştirmeleri içeren daha güncel bir model olmasıdır. Diğer taraftan sonuçların işaret ettiği bir diğer husus Saastamoinen modelin Hopfield modele kıyasla gerçek zamanlı PPP çözümü için daha yüksek konum belirleme performansı sağladığıdır. Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanıldığı durumda (SG3) en düşük KOH değeri elde edilmiştir ve bu değer Hopfield modelinin kullanıldığı eş değer çözüme (HG3) göre 3B konum doğruluğunu ortalama %9.2 oranında iyileştirmiştir. Benzer şekilde SG3 modelinin kullanıldığı PPP çözümü 35.4 dakika ile en düşük yakınsama süresine sahiptir. Bu sonuç SG3 modelinin kullanıldığı çözümün en yakın çözüme göre %6.6 oranında daha kısa yakınsama süresine sahip olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan tüm istasyonlar düşünüldüğünde SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesap edilen KOH değerleri sırasıyla 1.24, 1.42, 1.38 ve 1.49 cm'dir. Sonuçlar konum belirleme performansına benzer şekilde Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanılması durumunda (SG3) ZTD kestirim performansının diğer modellere kıyasla önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. SG3 modelinin kullanıldığı PPP çözümünden elde edilen ZTD kestirim doğruluğu en yakın çözüme göre %10.2 oranında daha iyidir. Bu çalışma gerçek zamanlı

PPP çözümlerinde kullanılan troposfer modellerinin elde edilecek sonuçlar üzerine önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca gerek konum belirleme gerekse ZTD kestirimi açısından Saastamoinen modelin GPT3 ile kullanılması durumunda gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP çözümünden en yüksek performansın elde edilebileceği bu çalışmanın temel çıkarımlarından birisidir.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu makalede uygulanan metodoloji, kavramsallaştırma, veri toplama, görselleştirme, yazma ve inceleme işlemleri Berkay BAHADUR tarafından yapılmıştır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Abd Rabbou, M., El-Shazly, A., & Ahmed, K. (2018). Comparative analysis of multi-constellation GNSS single-frequency precise point positioning. *Survey Review*, 50(361), 373-382. <https://doi.org/10.1080/00396265.2017.1296628>
- Bahadur, B., & Nohutcu, M. (2018a). Türkiye ve yakın çevresi için çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına etkisi. *Harita Dergisi*, 84(160), 1-11.
- Bahadur, B., & Nohutcu, M. (2018b). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(4), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0777-z>
- BNC-BKG NTRIP Client (2022, 21 Ocak) <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>
- Böhm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Short note: a global model of pressure and temperature

- for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81(10), 679-683. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0135-3>
- Cai, C., & Gao, Y. (2013). Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS Solutions*, 17(2), 223-236. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0273-9>
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593-1607. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>
- Dousa, J., & Vaclavovic, P. (2014). Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Advances in Space Research*, 53(9), 1347-1358. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.021>
- Hadas, T., & Bosy, J. (2015). IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solutions*, 19(1), 93-105. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0369-5>
- Hadas, T., Teferle, F.N., Kazmierski, K., Hordyniec, P., & Bosy, J. (2017). Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time. *GPS Solutions*, 21(3), 1069-1081. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0595-0>
- Hopfield, H.S. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18), 4487-4499. <https://doi.org/10.1029/JC074i018p04487>
- Jin, S., & Su, K. (2019). Co-seismic displacement and waveforms of the 2018 Alaska earthquake from high-rate GPS PPP velocity estimation. *Journal of Geodesy*, 93(9), 1559-1569. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01269-3>
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). GPS precise point positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, 5(2), 12-28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Kouba, J. (2015). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products, IGS website <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., & Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1069-1073. <https://doi.org/10.1002/grl.50288>
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349-360. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>
- Li, X., Ge, M., Zhang, X., Zhang, Y., Guo, B., Wang, R., Klotz, J., & Wickert, J. (2013). Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: Application to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 40(2), 295-300. <https://doi.org/10.1002/grl.50138>
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0802-8>
- Lu, C., Li, X., Nilsson, T., Ning, T., Heinkelmann, R., Ge, M., Glaser, S., & Schuh, H. (2015). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *Journal of Geodesy*, 89(9), 843-856. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0818-0>
- Nie, Z., Liu, F., & Gao, Y. (2020). Real-time precise point positioning with a low-cost dual-frequency GNSS device. *GPS Solutions*, 24(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0922-3>
- Pan, Z., Chai, H., & Kong, Y. (2017). Integrating multi-GNSS to improve the performance of precise point positioning. *Advances in Space Research*, 60(12), 2596-2606. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.014>
- Petit, G., & Luzum, B. (2010). IERS Conventions 2010 IERS Techn. Note 36 Verlagdes Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany, ISBN 3-89888-989-6
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, 105(1), 279-298. <https://doi.org/10.1007/BF02521844>
- Shi, J., Yuan, X., Cai, Y., & Wang, G. (2017). GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation. *GPS Solutions*, 21(2), 405-414. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0532-2>
- Steigenberger, P., Hugentobler, U., Loyer, S., Perosanz, F., Prange, L., Dach, R., Uhlemann, M., Gendt, G., & Montenbruck, O. (2015). Galileo orbit and clock quality of the IGS Multi-GNSS Experiment. *Advances in Space Research*, 55(1), 269-281. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.030>
- Teke, K., Böhm, J., Nilsson, T., Schuh, H., Steigenberger, P., Dach, R., ... & Shimizu, S. (2011). Multi-technique comparison of troposphere zenith delays and gradients during

- CONT08. *Journal of Geodesy*, 85(7), 395-413. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0434-y>
- Teunissen, P.J.G., & Montenbruck, O. (Eds.) (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*, Springer.
- Tu, R., Zhang, H., Ge, M., & Huang, G. (2013). A real-time ionospheric model based on GNSS Precise Point Positioning. *Advances in Space Research*, 52(6), 1125-1134. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.06.015>
- Wright, T. J., Houlié, N., Hildyard, M., & Iwabuchi, T. (2012). Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 39(12). <https://doi.org/10.1029/2012GL051894>
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W., & Liehten, S. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, *Manuscripta Geodaetica*, 18(2), 91-98.
- Yigit, C. O., & Gurlek, E. (2017). Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 893-904. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1284160>
- Zhao, Q., Yao, Y., & Yao, W. (2018a). GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 167, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.013>
- Zhao, Q., Yao, Y., Yao, W., & Li, Z. (2018b). Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting. *Scientific Reports*, 8(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26299-3>
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., & Webb, F.H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>

Sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümeler ve karar verme üzerine bir uygulaması

Virtual intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft sets and their application in decision-making

Orhan DALKILIÇ^{*1,a}, Naime DEMİRTAŞ^{2,b}

¹Mersin Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, 33110, Mersin

²Mersin Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, 33110, Mersin

• Geliş tarihi / Received: 09.09.2021

• Düzelttilerek geliş tarihi / Received in revised form: 07.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.04.2022

Öz

Bu çalışmada sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümeler için karar vericiler tarafından ifade edilen sezgisel bulanık değerlerin daha doğru bir şekilde ifade edilebilmesi hedeflenmiştir. Bunun için sanal alt ve üst sezgisel bulanık yaklaşım kavramları tanımlanarak sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümeler önerilmiştir. Dahası bu hibrit küme tipi için temel küme işlemleri ilişkili özellikleriyle birlikte incelenmiştir. Ayrıca soft kümelere odaklanan belirsizlik problemlerine yönelik bir karar verme algoritması inşa edilmiştir. Son olarak elde edilen sonuçların bir irdelemesi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Karar verme, Sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek küme, Sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek küme

Abstract

In this paper, it is aimed to express more accurately the intuitionistic fuzzy values expressed by the decision-makers for intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft sets. For this purpose, virtual intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft sets are proposed by defining the concepts of virtual lower and upper intuitionistic fuzzy approaches. Moreover, the basic set operations for this hybrid set type are examined together with their associated properties. In addition, a decision-making algorithm focusing on virtual intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft sets is constructed. Finally, an analysis of the obtained results was made.

Keywords: Decision-making, Intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft set, Virtual intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft set

^{*a} Orhan DALKILIÇ; orhandlk952495@hotmail.com, Tel: (0544) 5840317, orcid.org/0000-0003-3875-1398

^b orcid.org/0000-0003-4137-4810

1. Giriş

1. Introduction

Günümüzde insan ihtiyaçlarının farklılaşması ve çeşitlenmesiyle birlikte birçok alanda karşılaşılan belirsizlik problemlerine yönelik daha nitelikli matematiksel modellerin literatüre kazandırılması bir zorunluluk haline almıştır. Bu durum, birçok araştırmacı için bir motivasyon kaynağı olarak görülmüş ve belirsizlik problemlerine yönelik özellikle karar verme süreçlerinin daha ideale yakın bir şekilde yönetilebilmesi amaçlanmıştır. Literatürü incelediğimizde, belirsizliğin giderilebilmesine yönelik ilk matematiksel modellerden biri bulanık kümelerdir (Zadeh, 1965). Bulanık kümeler, bir elemanın herhangi bir kümeye aidiyetini $[0,1]$ aralığında ifade eder. Bu yönüyle klasik matematikten uzaklaşmamıza olan katkısı nedeniyle çok önemlidir. İlerleyen yıllarda, bir elemanın herhangi bir kümeye ait olmamasını da irdeleyen sezgisel bulanık kümeler önerilmiştir (Atanassov, 1986). Her iki matematiksel model de oldukça başarılı yaklaşımlar önermesine karşın, belirsizlik problemlerine doğrudan uygulanabilmesi oldukça zordur. Bu durumun nedeni olarak, bir parametrisasyon aracı eksikliği olduğunu düşünen Molodtsov, esnek kümeleri literatüre kazandırmıştır (Molodtsov, 1999). Özellikle belirsizlik problemlerini pratik bir şekilde ifade edebilmesi, karşılaşılan belirsizlik üzerinde yapılabilecek işlemlerin kolaylığı açısından önemli olduğundan birçok araştırmacının dikkatini çekmeyi başarmıştır ve üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Zou vd., 2008; Enginoğlu vd., 2015; Deli vd., 2016; Selvakumari, 2018; Demirtaş vd., 2019; Saeed vd., 2020; Demirtaş vd., 2020; Dalkılıç, 2021b; Dalkılıç, 2021c; Irkin vd., 2018; Demir, 2021; Güzel Ergül vd., 2019; Demirtaş vd., 2022).

Bir parametrisasyon aracının katkısıyla inşa edilen esnek kümeler, bu özelliğinden dolayı belirsizlikle mücadele kapsamında literatüre kazandırılan diğer matematiksel modellerle birlikte kolaylıkla hibrit yapılar kurabilir. Bu sayede daha karmaşık verilerin ayrıştırılabilmesine yönelik yapılan sınıflandırmaların daha kolay bir şekilde yapılabilmesine olanak tanınmış olur. Örneğin; bulanık kümeler ve sezgisel bulanık kümeler ile birlikte düşünülen esnek kümeler birçok hibrit matematiksel modelin inşa edilebilmesine ön ayak olmuştur (Maji vd., 2001a; Maji vd., 2001b; Enginoğlu vd., 2019; Sulukan vd., 2019).

Hibrit kümeler kendini oluşturan kümelerin tüm özelliklerini kendi bünyesinde barındırdığı için karşılaşılan belirsizlik problemlerini daha ideale

yakın bir şekilde modelleyebilirler. Bahsedilen bulanık küme, sezgisel bulanık küme ve esnek kümelerden faydalanılarak inşa edilen bazı küme tipleri şöyle sınıflandırılmıştır:

Bulanık esnek kümeler (Maji vd., 2001a),
Sezgisel bulanık esnek kümeler (Maji vd., 2001b),
Bulanık parametrelili esnek kümeler (Çağman vd., 2011),
Sanal bulanık parametrelili esnek kümeler (Dalkılıç vd., 2021),
Sezgisel bulanık parametrelili esnek kümeler (Deli vd., 2015),
Bulanık parametrelili bulanık esnek kümeler (Çağman vd., 2010),
Sanal bulanık parametrelili bulanık esnek kümeler (Dalkılıç, 2021a),
Sezgisel bulanık parametrelili bulanık esnek kümeler (El-Yagubi vd., 2013),
Sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümeler (Karaaslan, 2016) (Kısaca sbp-sbe-küme),
Sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümeler (Bu çalışmada önerilen) (Kısaca sbsp-sbe-küme)

Bu çalışmada sbp-sbe-kümelerin bir genellemesi olan sbsp-sbe-küme kavramı tanıtılmıştır. Belirsizlikle mücadele kapsamında önemli bir matematiksel model olan sbp-sbe-kümeleri genelleştirmemizin en önemli nedeni, karar vericilerin sezgisel bulanık değerleri $[0,1]$ aralığında doğru bir şekilde ifade edebilmesinin oldukça zor bir iş olmasıdır. Çünkü bu aralıkta çok sayıda rasyonel sayı vardır. Bu problemi çözebilmek için, bu çalışmada sanal alt ve üst sezgisel bulanık yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yaklaşımlar sayesinde kazanılan bazı avantajlı durumlar şöyledir:

- i. Karar vericilerin ifade ettiği sezgisel bulanık değerlerin daha doğru bir şekilde ifade edilebilmesi ve bu sayede olası bir hatanın önüne geçilmesi
- ii. Her karar vericiye göre sanal alt ve üst sezgisel bulanık yaklaşımların değişkenlik gösterebilmesi sayesinde belirsizlik problemine daha esnek bir şekilde yaklaşılabilme olanağını tanımlaması

Bu çalışmanın amacı belirsizliğe yönelik karar verme sürecinin en doğru şekilde yönetilmesini sağlayacak karar vericiler tarafından ifade edilen sezgisel bulanık değerleri kolaylıkla tespit edebilmektir. Ayrıca bu çalışmada sbsp-sbe-kümeler için tümleyen, alt küme, birleşim, kesişim gibi temel küme işlemleri verilerek bazı ilişkili

özellikleri irdelenmiştir. Dahası tanıtılan hibrit küme tipi için bir karar verme algoritması önerilmiştir. Son olarak bir karşılaştırmalı analiz sunulmuştur.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

Bu bölümde sonraki bölümlerde verilen kavramların tanıtılmasında yararlanılan bazı matematiksel modeller hatırlatılmıştır.

Çalışma boyunca $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ bir parametre kümesi, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ bir başlangıç evreni ve 2^U , U 'nun kuvvet kümesi olarak ifade edilmiştir. Ayrıca; çalışma içerisinde küme tanımları, anlam hatası oluşmaması için gerek sayıda şart ile yetinilerek verilmiştir.

Tanım 2.1: (Zadeh, 1965) B, U üzerinde bir bulanık küme olmak üzere $\mu_B: U \rightarrow [0,1]$ fonksiyonu yardımıyla $B = \left\{ \frac{u}{\mu_B(u)} : u \in U \right\}$ şeklinde ifade edilir. Her $u \in U$ elemanının B kümesine olan üyelik derecesi $\mu_B(u)$ olarak belirtilir.

Tanım 2.2: (Atanassov, 1986) U üzerinde bir sezgisel bulanık küme $\mu_S: U \rightarrow [0,1]$ ve $\nu_S: U \rightarrow [0,1]$ fonksiyonları yardımıyla her $u \in U$ için $0 \leq \mu_S(u) + \nu_S(u) \leq 1$ olacak şekilde ifade edilen $S = \left\{ \frac{u}{\langle \mu_S(u), \nu_S(u) \rangle} : u \in U \right\}$ şeklindedir. Burada μ_S ve ν_S fonksiyonlarına sırasıyla S 'nin üyelik ve üyelik olmama fonksiyonları denir. Dahası, $\mu_S(u)$ ve $\nu_S(u)$ değerlerine sırasıyla $u \in U$ 'nin üyelik derecesi ve üyelik olmama derecesi olarak ifade edilir.

Çalışma boyunca U üzerindeki tüm sezgisel bulanık kümelerinin ailesi $SB(U)$ şeklinde ifade edilmiştir.

$S, S_1, S_2 \in SB(U)$ için (Atanassov, 1986):

- i. Her $u \in U$ için $\mu_S(u) = 0$ ve $\nu_S(u) = 1$ ise S boş sezgisel bulanık küme olarak adlandırılır ve S_\emptyset ile gösterilir.
- ii. Her $u \in U$ için $\mu_S(u) = 1$ ve $\nu_S(u) = 0$ ise S evrensel sezgisel bulanık küme olarak adlandırılır ve S_U ile gösterilir.
- iii. Her $u \in U$ için $\mu_{S_1}(u) \leq \mu_{S_2}(u)$ ve $\nu_{S_2}(u) \geq \nu_{S_1}(u)$ ise S_1, S_2 'nin bir sezgisel bulanık alt kümesidir ve $S_1 \subseteq S_2$ şeklinde gösterilir.
- iv. S 'nin tümleyeni $S^c = \left\{ \left(\frac{u}{\langle \nu_S(u), \mu_S(u) \rangle} \right) : u \in U \right\}$.
- v. S_1 ve S_2 'nin kesişimi $S_1 \cap S_2 = \left\{ \left(\frac{u}{\langle \min\{\mu_{S_1}(u), \mu_{S_2}(u)\}, \max\{\nu_{S_1}(u), \nu_{S_2}(u)\} \rangle} \right) : u \in U \right\}$.
- vi. S_1 ve S_2 'nin birleşimi $S_1 \cup S_2 = \left\{ \left(\frac{r}{\langle \max\{\mu_{S_1}(u), \mu_{S_2}(u)\}, \min\{\nu_{S_1}(u), \nu_{S_2}(u)\} \rangle} \right) : u \in U \right\}$.

Tanım 2.3: (Molodsov, 1999) U üzerinde bir esnek küme $K: E \rightarrow 2^U$ yaklaşım fonksiyonu yardımıyla ifade edilen $K = \{(e, K(e)) : e \in E\}$ şeklindeki sıralı ikililerin bir kümesidir.

Tanım 2.5: (Dalkılıç ve Demirtaş, 2021) S, E üzerinde bir bulanık küme olsun. Bu durumda $1 \leq i \leq n$ değeri için her $0 \leq \underline{\alpha}_i < \mu_S(e_i)$ değerine karşılık gelecek yazılabilecek parametre kümesine, bir alt sanal parametre kümesi denir ve $\underline{S} = \{e_1^{\underline{\alpha}_1}, e_2^{\underline{\alpha}_2}, \dots, e_n^{\underline{\alpha}_n}\}$ şeklinde ifade edilir. Burada $e_i^{\underline{\alpha}_i}$ parametresi şu anlama gelmektedir: “ e_i parametresinin α_i sayısınca OLUMSUZ YÖNDE GELİŞİM PARAMETRESİ”. Benzer şekilde; $1 \leq i \leq n$ değeri için her $0 \leq \bar{\alpha}_i \leq 1 - \mu_S(e_i)$ değerine karşılık gelecek yazılabilecek parametre kümesine bir üst sanal parametre kümesi denir ve $\bar{E} = \{e_1^{\bar{\alpha}_1}, e_2^{\bar{\alpha}_2}, \dots, e_n^{\bar{\alpha}_n}\}$ şeklinde ifade edilir. Burada $e_i^{\bar{\alpha}_i}$ parametresi şu anlama gelmektedir: “ e_i parametresinin α_i sayısınca OLUMLU YÖNDE GELİŞİM PARAMETRESİ”.

Tanım 2.6: (Dalkılıç ve Demirtaş, 2021) B, E üzerinde bir bulanık küme olmak üzere

$$\underline{F}_B = \left\{ \left(\frac{e}{\mu_B(e)}, \underline{f}_B \left(\frac{e}{\mu_B(e)} \right) \right) : e \in E \right\} \tag{1}$$

$$F_B = \left\{ \left(\frac{e}{\mu_B(e)}, f_B \left(\frac{e}{\mu_B(e)} \right) \right) : e \in E \right\} \tag{2}$$

$$\overline{F}_B = \left\{ \left(\frac{e}{\overline{\mu}_B(e)}, \overline{f}_B \left(\frac{e}{\overline{\mu}_B(e)} \right) \right) : e \in E \right\} \tag{3}$$

U üzerindeki bir VF_B sanal bulanık parametrelili esnek küme (1), (2) ve (3) kümelerinin birleşimi, yani

$$VF_B = \underline{F}_B \cup F_B \cup \overline{F}_B \tag{4}$$

(4) ile tanımlanır. Burada $\mu_B(e) - \underline{\alpha} = \underline{\mu}_B(e) \leq \mu_B(e) \leq \overline{\mu}_B(e) = \mu_B(e) + \overline{\alpha}$ ve $\overline{f}_B \left(\frac{e}{\overline{\mu}_B(e)} \right) \subseteq f_B \left(\frac{e}{\mu_B(e)} \right) \subseteq f_B \left(\frac{e}{\underline{\mu}_B(e)} \right)$ biçimindedir. Ayrıca karar vericiler tarafından ifade edilen değerler $0 \leq \underline{\alpha} < \mu_B(e)$ ve $0 \leq \overline{\alpha} \leq 1 - \mu_B(e)$ aralıklarındadır. Dahası; $\underline{f}_B: \underline{E} \rightarrow 2^U$, $f_B: E \rightarrow 2^U$ ve $\overline{f}_B: \overline{E} \rightarrow 2^U$ fonksiyonlarına sırasıyla alt yaklaşım, yaklaşım ve üst yaklaşım fonksiyonu, $\underline{\mu}_B: \underline{E} \rightarrow [0,1]$, $\mu_B: E \rightarrow [0,1]$ ve $\overline{\mu}_B: \overline{E} \rightarrow [0,1]$ fonksiyonlarına ise sırasıyla alt üyelik, üyelik ve üst üyelik fonksiyonu denir. Özel olarak $\mu_B(e) = 0$ ise $f_B(e) = \emptyset$ dir.

Tanım 2.4: (Karaaslan, 2016) $S = \{(e, \mu_S(e), \nu_S(e)) : e \in E\}$, E üzerinde bir sezgisel bulanık küme ve $\phi_S: E \rightarrow SB(U)$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonu verilsin. Bu durumda U üzerinde bir sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek (sbp-sbe-)küme

$$\Omega_S = \left\{ \left(\frac{e}{\langle \mu_S(e), \nu_S(e) \rangle}, \phi_S(e) \right) : e \in E \right\} \tag{5}$$

şeklinde ifade edilir. (5) kümesinde eğer her $p \in P$ için $\mu_S(e) = 0$ ve $\nu_S(e) = 1$ ise $\phi_S(e) = \emptyset$ dir.

3. Sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek küme

3.Virtual intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft set

Bu bölümde belirsizliğin giderilmesine yönelik yeni bir matematiksel model olan sbp-sbe (ssbp-sbe)-kümeler tanımlanmıştır. Ayrıca ssbp-sbe-kümelere yönelik alt küme, tümleyen, birleşim ve kesişim gibi temel küme işlemleri verilerek bazı özellikleri incelenmiştir.

Tanım 3.1: \underline{S} ve \overline{S} sırasıyla \underline{E} ve \overline{E} üzerinde bir sezgisel bulanık küme olmak üzere $\underline{E} = \{e^{\underline{\alpha}^{1,2}} : 0 \leq \underline{\alpha}^1 \leq \mu_S(e), 0 \leq \underline{\alpha}^2 \leq 1 - \nu_S(e)\}$ ve $\overline{E} = \{e^{\overline{\alpha}^{1,2}} : 0 \leq \overline{\alpha}^1 \leq 1 - \mu_S(e), 0 \leq \overline{\alpha}^2 \leq \nu_S(e)\}$ kümeleri sırasıyla bir alt ve üst sanal parametre kümesi olsun. O halde,

$$\underline{\Omega}_S = \left\{ \left(\frac{e}{\langle \mu_{\underline{S}}(e^{\underline{\alpha}^1}), \nu_{\underline{S}}(e^{\underline{\alpha}^2}) \rangle}, \phi_{\underline{S}}(e^{\underline{\alpha}^{1,2}}) \right) : e \in E \right\} \tag{6}$$

$$\Omega_S = \left\{ \left(\frac{e}{\langle \mu_S(e), \nu_S(e) \rangle}, \phi_S(e) \right) : e \in E \right\} \tag{7}$$

$$\overline{\Omega}_S = \left\{ \left(\frac{e}{\langle \mu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha}^1}), \nu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha}^2}) \rangle}, \phi_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha}^{1,2}}) \right) : e \in E \right\} \tag{8}$$

için U üzerindeki bir Ψ_X ssbp-sbe-kümesi (6), (7) ve (8)'den yararlanılarak

$$\Psi_S = \underline{\Omega}_S \cup \Omega_S \cup \overline{\Omega}_S \tag{9}$$

(9) şeklinde ifade edilir. Burada; $\phi_{\underline{S}}: \underline{E} \rightarrow SB(U)$, $\phi_S: E \rightarrow SB(U)$ ve $\phi_{\overline{S}}: \overline{E} \rightarrow SB(U)$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonlarına sırasıyla sanal alt sezgisel bulanık, sezgisel bulanık ve sanal üst sezgisel bulanık

yaklaşım fonksiyonu denir ve $\underline{\phi}_S(e^\alpha)$, $\phi_S(e)$ ve $\overline{\phi}_S(e^{\overline{\alpha}})$ sırasıyla her $e^\alpha \in \underline{E}$, $e \in E$ ve $e^{\overline{\alpha}} \in \overline{E}$ için Ψ_S ssbp-sbe-kümesinin bir sanal alt sezgisel bulanık, sezgisel bulanık ve sanal üst sezgisel bulanık e -elemanıdır. Ayrıca

$\mu_S: \underline{E} \rightarrow [0,1]$, $\nu_S: \underline{E} \rightarrow [0,1]$ ve $\mu_S: \overline{E} \rightarrow [0,1]$, $\nu_S: \overline{E} \rightarrow [0,1]$ fonksiyonları için sırasıyla $\mu_S(e^{\alpha^1}) = \mu_S(e) - \alpha^1$, $\nu_S(e^{\alpha^2}) = \nu_S(e) + \alpha^2$ ve $\mu_S(e^{\overline{\alpha^1}}) = \mu_S(e) + \overline{\alpha^1}$, $\nu_S(e^{\overline{\alpha^2}}) = \nu_S(e) - \overline{\alpha^2}$ eşitlikleri geçerlidir.

Burada; $\mu_S(e) = 0$ ve $\nu_S(e) = 1$ ise $\phi_S(e) = \emptyset$ dir. Benzer şekilde $\mu_S(e^{\alpha^1}) = 0$ ve $\nu_S(e^{\alpha^2}) = 1$ ise $\underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}}) = \emptyset$ ve dahası, $\mu_S(e^{\overline{\alpha^1}}) = 0$ ve $\nu_S(e^{\overline{\alpha^2}}) = 1$ ise $\overline{\phi}_S(e^{\overline{\alpha}}) = \emptyset$ dir.

Burada tercih edilen gösterimlerden olan $e^{\alpha^{1,2}}$ ve $e^{\overline{\alpha^{1,2}}}$ ifadeleri üyelik olma ve üye olmama derecelerinin değişimine bağlı olan sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonlarındaki farklılığı ifade etmektedir.

Çalışma boyunca U üzerindeki tüm ssbp-se-kümelerinin ailesi $SSBP - SBE(U)$ şeklinde ifade edilmiştir.

Özellik 3.1: $\Psi_S \in SSBP - SBE(U)$ olsun. O halde; her $e \in E$, $e^{\alpha^{1,2}} \in \underline{E}$, $e^{\overline{\alpha^{1,2}}} \in \overline{E}$ ve $u \in U$ için $\mu_{\frac{\underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}(u) \leq \mu_{\phi_S(e)}(u) \leq \mu_{\frac{\overline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}(u)$ ve $\nu_{\frac{\underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}(u) \leq \nu_{\phi_S(e)}(u) \leq \nu_{\frac{\overline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}(u)$ eşitsizlikleri gerçekleşir. Burada; $\mu_{\frac{\underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}, \mu_{\phi_S(e)}, \mu_{\frac{\overline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}$ sırasıyla $\overline{\phi}_S(e^{\overline{\alpha^{1,2}}}), \phi_S(e), \underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})$ sezgisel yaklaşım fonksiyonlarının üyelik fonksiyonlarıdır. Benzer şekilde; $\nu_{\frac{\underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}, \nu_{\phi_S(e)}, \nu_{\frac{\overline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})}{\phi_S(e^{\alpha^{1,2}})}}$ sırasıyla $\overline{\phi}_S(e^{\overline{\alpha^{1,2}}}), \phi_S(e), \underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}})$ sezgisel yaklaşım fonksiyonlarının üye olmama fonksiyonlarıdır.

Kanıt: Tanım 3.1’den açıktır.

Örnek 3.1: Nesnelerin ve parametrelerin kümesi sırasıyla $U = \{u_1, u_2, u_3\}$ evren kümesi ve $E = \{e_1, e_2\}$ şeklinde verilsin. O halde alt ve üst sanal parametre kümeleri sırasıyla $\underline{E} = \left\{ e_1^{\alpha_1^{1,2}}, e_2^{\alpha_2^{1,2}} \right\}$ ve $\overline{E} = \left\{ e_1^{\overline{\alpha_1^{1,2}}}, e_2^{\overline{\alpha_2^{1,2}}} \right\}$ şeklinde ifade edilir. \underline{E} , E , \overline{E} üzerindeki sezgisel bulanık kümeler ise sırasıyla $\underline{S} = \left\{ \frac{e_1}{\langle 0.22, 0.47 \rangle}, \frac{e_2}{\langle 0.1, 0.5 \rangle} \right\}$, $S = \left\{ \frac{e_1}{\langle 0.3, 0.4 \rangle}, \frac{e_2}{\langle 0.45, 0.4 \rangle} \right\}$, $\overline{S} = \left\{ \frac{e_1}{\langle 0.6, 0.21 \rangle}, \frac{e_2}{\langle 0.7, 0.2 \rangle} \right\}$ olarak verilsin. Ayrıca sanal alt sezgisel bulanık, sezgisel bulanık ve sanal üst sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonları sırasıyla her parametre için

$$\begin{aligned} \underline{\phi}_S\left(\frac{e_1}{\langle 0.22, 0.47 \rangle}\right) &= \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.7, 0.1 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.82, 0.14 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.63, 0.1 \rangle} \right\}, \\ \underline{\phi}_S\left(\frac{e_2}{\langle 0.1, 0.5 \rangle}\right) &= \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.85, 0.12 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.71, 0.2 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.8, 0.14 \rangle} \right\}, \\ \phi_S\left(\frac{e_1}{\langle 0.3, 0.4 \rangle}\right) &= \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.62, 0.15 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.7, 0.24 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.5, 0.3 \rangle} \right\}, \\ \phi_S\left(\frac{e_2}{\langle 0.45, 0.4 \rangle}\right) &= \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.5, 0.28 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.66, 0.31 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.42, 0.35 \rangle} \right\}, \\ \overline{\phi}_S\left(\frac{e_1}{\langle 0.6, 0.21 \rangle}\right) &= \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.4, 0.3 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.5, 0.47 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.32, 0.53 \rangle} \right\}, \\ \overline{\phi}_S\left(\frac{e_2}{\langle 0.7, 0.2 \rangle}\right) &= \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.3, 0.5 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.4, 0.5 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.2, 0.64 \rangle} \right\} \end{aligned}$$

şeklinde olsun. Karar verici tarafından ifade edilen bu değerler rastgele değildir. Örneğin; e_1 için $\underline{\alpha_1^{1,2}}, 0 \leq \underline{\alpha_1^1} = 0.08 \leq 0.3$, $0 \leq \underline{\alpha_1^2} = 0.1 \leq 0.4$ ve $\overline{\alpha_1^{1,2}}, 0 \leq \overline{\alpha_1^1} = 0.3 \leq 0.6$, $0 \leq \overline{\alpha_1^2} = 0.19 \leq 0.4$ aralığında ifade edilmek zorundadır. Bu durumda Ψ_S sskümesi

$$\Psi_S = \left\{ \begin{array}{l} \left(\left(\frac{e_1}{\langle 0.22, 0.47 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.7, 0.1 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.82, 0.14 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.63, 0.1 \rangle} \right\} \right) \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.1, 0.5 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.85, 0.12 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.71, 0.2 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.8, 0.14 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_1}{\langle 0.3, 0.4 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.62, 0.15 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.7, 0.24 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.5, 0.3 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.45, 0.4 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.5, 0.28 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.66, 0.31 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.42, 0.35 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_1}{\langle 0.6, 0.21 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.4, 0.3 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.5, 0.47 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.32, 0.53 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.7, 0.2 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.3, 0.5 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.4, 0.5 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.2, 0.64 \rangle} \right\} \right) \end{array} \right\}$$

şeklinde ifade edilir. Dikkat edilmelidir ki; Ψ_S sspb-sbe-kümesi

$$\begin{aligned} \underline{\Omega}_S &= \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{e_1}{\langle 0.22, 0.47 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.7, 0.1 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.82, 0.14 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.63, 0.1 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.1, 0.5 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.85, 0.12 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.71, 0.2 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.8, 0.14 \rangle} \right\} \right) \end{array} \right\}, \\ \Omega_S &= \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{e_1}{\langle 0.3, 0.4 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.62, 0.15 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.7, 0.24 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.5, 0.3 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.45, 0.4 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.5, 0.28 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.66, 0.31 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.42, 0.35 \rangle} \right\} \right) \end{array} \right\}, \\ \overline{\Omega}_S &= \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{e_1}{\langle 0.6, 0.21 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.4, 0.3 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.5, 0.47 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.32, 0.53 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.7, 0.2 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.3, 0.5 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.4, 0.5 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.2, 0.64 \rangle} \right\} \right) \end{array} \right\}. \end{aligned}$$

olmak üzere üç tane sbp-sbe-kümenin birleşimiyle inşa edilmiştir.

Tanım 3.2: $\Psi_S \in SSBP - SBE(U)$ olsun. O halde; her $e^{\alpha^1}, e^{\alpha^2}, e^{\alpha^{1,2}} \in \underline{E}$ ve $e^{\overline{\alpha^1}}, e^{\overline{\alpha^2}}, e^{\overline{\alpha^{1,2}}} \in \overline{E}$ için

- i. $\underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}}) = S_\emptyset$ ve $\mu_S(e^{\alpha^1}) = 0, \nu_S(e^{\alpha^2}) = 1$ ise Ψ_S 'e, boş sspb-sbe-küme denir ve Ψ_\emptyset ile gösterilir.
- ii. $\overline{\phi}_S(e^{\overline{\alpha^{1,2}}}) = S_U$ ve $\mu_S(e^{\overline{\alpha^1}}) = 1, \nu_S(e^{\overline{\alpha^2}}) = 0$ ise Ψ_S 'e, evrensel sspb-sbe-küme denir ve Ψ_E ile gösterilir.

Örnek 3.2: Örnek 3.1'i düşünelim. O halde,

$$\begin{aligned} \Psi_\emptyset &= \left\{ \left(\frac{e_1}{\langle 0, 1 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0, 1 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0, 1 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0, 1 \rangle} \right\} \right), \left(\frac{e_2}{\langle 0, 1 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0, 1 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0, 1 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0, 1 \rangle} \right\} \right) \right\}, \\ \Psi_E &= \left\{ \left(\frac{e_1}{\langle 1, 0 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 1, 0 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 1, 0 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 1, 0 \rangle} \right\} \right), \left(\frac{e_2}{\langle 1, 0 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 1, 0 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 1, 0 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 1, 0 \rangle} \right\} \right) \right\} \end{aligned}$$

Tanım 3.3: $\Psi_S, \Psi_T \in SSBP - SBE(U)$ ve " $\underline{S}, \underline{T}; \underline{E}$ üzerinde", " $\overline{S}, \overline{T}; \overline{E}$ üzerinde", " $\overline{S}, \overline{T}; \overline{E}$ üzerinde" bir sezgisel bulanık küme olsun. O halde,

- i. $\underline{S}, \underline{T}$ 'nin sezgisel bulanık alt kümesi ve $\underline{\phi}_S, \underline{\phi}_T$ 'nin bir sezgisel bulanık alt kümesi
- ii. S, T 'nin sezgisel bulanık alt kümesi ve ϕ_S, ϕ_T 'nin bir sezgisel bulanık alt kümesi
- iii. $\overline{S}, \overline{T}$ 'nin sezgisel bulanık alt kümesi ve $\overline{\phi}_S, \overline{\phi}_T$ 'nin bir sezgisel bulanık alt kümesi

olmak üzere Ψ_S, Ψ_T 'nin ssbp-sbe-alt kümedir ve $\Psi_S \hat{=} \Psi_T$ şeklinde gösterilir. Eğer $\Psi_S \hat{=} \Psi_T$ ve $\Psi_T \hat{=} \Psi_S$ ise Ψ_S ve Ψ_T ssbp-sbe-eşittir denir ve $\Psi_S = \Psi_T$ şeklinde gösterilir.

Özellik 3.2: $\Psi_S, \Psi_T, \Psi_R \in SSBP - SBE(U)$ olsun. O halde,

- i. $\Psi_\emptyset \hat{=} \Psi_S$
- ii. $\Psi_S \hat{=} \Psi_S$
- iii. $\Psi_S \hat{=} \Psi_T$ ve $\Psi_T \hat{=} \Psi_R$ ise $\Psi_S \hat{=} \Psi_R$

Tanım 3.4: $\Psi_S \in SSBP - SBE(U)$ olsun. Ψ_S 'in tümleyeni Ψ_S^c aşağıdaki koşulları sağlar;

- i. $\underline{S}, \underline{S}^c; E$ üzerinde bir sezgisel bulanık küme olmak üzere $\underline{S}^c, \underline{S}$ 'nin sezgisel bulanık tümleyeni ve $\underline{\phi}_{S^c}, \underline{\phi}_S$ 'nin bir sezgisel bulanık tümleyenidir.
- ii. $\overline{S}, \overline{S}^c; E$ üzerinde bir sezgisel bulanık küme olmak üzere $\overline{S}^c, \overline{S}$ 'nin sezgisel bulanık tümleyeni ve $\overline{\phi}_{S^c}, \overline{\phi}_S$ 'nin bir sezgisel bulanık tümleyenidir.
- iii. $\overline{S}, \overline{S}^c; E$ üzerinde bir sezgisel bulanık küme olmak üzere $\overline{S}^c, \overline{S}$ 'nin sezgisel bulanık tümleyeni ve $\overline{\phi}_{S^c}, \overline{\phi}_S$ 'nin bir sezgisel bulanık tümleyenidir.

Örnek 3.2: Örnek 3.1'i tekrar ele alalım. O halde,

$$\Psi_S^c = \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{e_1}{\langle 0.47, 0.22 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.1, 0.7 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.14, 0.82 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.1, 0.63 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.5, 0.1 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.12, 0.85 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.2, 0.71 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.14, 0.8 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_1}{\langle 0.4, 0.3 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.15, 0.62 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.24, 0.7 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.3, 0.5 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.4, 0.45 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.28, 0.5 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.31, 0.66 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.35, 0.42 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_1}{\langle 0.21, 0.6 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.3, 0.4 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.47, 0.5 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.53, 0.32 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.2, 0.7 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.5, 0.3 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.5, 0.4 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.64, 0.2 \rangle} \right\} \right) \end{array} \right\}.$$

Tanım 3.5: $\Psi_S, \Psi_T \in SSBP - SBE(U)$ olsun. O halde Ψ_S, Ψ_T ssbp-sbe-kümelerinin birleşimi

- i. her $e^{\alpha^1}, e^{\beta^1}, e^{\gamma^1}, e^{\alpha^2}, e^{\beta^2}, e^{\gamma^2}, e^{\alpha^{1,2}}, e^{\beta^{1,2}}, e^{\gamma^{1,2}} \in \underline{E}$ ve $e \in E$ için $\mu_{\underline{SUT}}(e^{\gamma^1}) = \max\{\mu_{\underline{S}}(e^{\alpha^1}), \mu_{\underline{T}}(e^{\beta^1})\}$, $\nu_{\underline{SUT}}(e^{\gamma^2}) = \min\{\nu_{\underline{S}}(e^{\alpha^2}), \nu_{\underline{T}}(e^{\beta^2})\}$ ve $\phi_{\underline{SUT}}(e^{\gamma^{1,2}}) = \underline{\phi}_S(e^{\alpha^{1,2}}) \check{\cup} \underline{\phi}_T(e^{\beta^{1,2}})$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonu,
- ii. her $e \in E$ için $\mu_{SUT}(e) = \max\{\mu_S(e), \mu_T(e)\}$, $\nu_{SUT}(e) = \min\{\nu_S(e), \nu_T(e)\}$ ve $\phi_{SUT}(e) = \phi_S(e) \check{\cup} \phi_T(e)$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonu,
- iii. her $e \in E$ ve $e^{\overline{\alpha^1}}, e^{\overline{\beta^1}}, e^{\overline{\gamma^1}}, e^{\overline{\alpha^2}}, e^{\overline{\beta^2}}, e^{\overline{\gamma^2}}, e^{\overline{\alpha^{1,2}}}, e^{\overline{\beta^{1,2}}}, e^{\overline{\gamma^{1,2}}} \in \overline{E}$ için $\mu_{\overline{SUT}}(e^{\overline{\gamma^1}}) = \max\{\mu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^1}}), \mu_{\overline{T}}(e^{\overline{\beta^1}})\}$, $\nu_{\overline{SUT}}(e^{\overline{\gamma^2}}) = \min\{\nu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^2}}), \nu_{\overline{T}}(e^{\overline{\beta^2}})\}$ ve $\overline{\phi}_{SUT}(e^{\overline{\gamma^{1,2}}}) = \overline{\phi}_S(e^{\overline{\alpha^{1,2}}}) \check{\cup} \overline{\phi}_T(e^{\overline{\beta^{1,2}}})$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonu

koşullarının gerçekleşmesi ile inşa edilmiş olur ve $\Psi_S \hat{\cup} \Psi_T$ şeklinde gösterilir. Benzer şekilde Ψ_S, Ψ_T sspb-sbe-kümelerinin kesişimi ise

- i. her $e^{\underline{\alpha}^1}, e^{\underline{\beta}^1}, e^{\underline{\gamma}^1}, e^{\underline{\alpha}^2}, e^{\underline{\beta}^2}, e^{\underline{\gamma}^2}, e^{\underline{\alpha}^{1,2}}, e^{\underline{\beta}^{1,2}}, e^{\underline{\gamma}^{1,2}} \in \underline{E}$ ve $e \in E$ için $\mu_{\underline{SNT}}(e^{\underline{\gamma}^1}) = \min\{\mu_{\underline{S}}(e^{\underline{\alpha}^1}), \mu_{\underline{T}}(e^{\underline{\beta}^1})\}$, $\nu_{\underline{SNT}}(e^{\underline{\gamma}^2}) = \max\{\nu_{\underline{S}}(e^{\underline{\alpha}^2}), \nu_{\underline{T}}(e^{\underline{\beta}^2})\}$ ve $\phi_{\underline{SNT}}(e^{\underline{\gamma}^{1,2}}) = \phi_{\underline{S}}(e^{\underline{\alpha}^{1,2}}) \check{\wedge} \phi_{\underline{T}}(e^{\underline{\beta}^{1,2}})$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonu,
- ii. her $e \in E$ için $\mu_{SNT}(e) = \min\{\mu_S(e), \mu_T(e)\}$, $\nu_{SNT}(e) = \max\{\nu_S(e), \nu_T(e)\}$ ve $\phi_{SNT}(e) = \phi_S(e) \check{\wedge} \phi_T(e)$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonu,
- iii. her $e \in E$ ve $e^{\overline{\alpha}^1}, e^{\overline{\beta}^1}, e^{\overline{\gamma}^1}, e^{\overline{\alpha}^2}, e^{\overline{\beta}^2}, e^{\overline{\gamma}^2}, e^{\overline{\alpha}^{1,2}}, e^{\overline{\beta}^{1,2}}, e^{\overline{\gamma}^{1,2}} \in \overline{E}$ için $\mu_{\overline{SNT}}(e^{\overline{\gamma}^1}) = \min\{\mu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha}^1}), \mu_{\overline{T}}(e^{\overline{\beta}^1})\}$, $\nu_{\overline{SNT}}(e^{\overline{\gamma}^2}) = \max\{\nu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha}^2}), \nu_{\overline{T}}(e^{\overline{\beta}^2})\}$ ve $\phi_{\overline{SNT}}(e^{\overline{\gamma}^{1,2}}) = \phi_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha}^{1,2}}) \check{\wedge} \phi_{\overline{T}}(e^{\overline{\beta}^{1,2}})$ sezgisel bulanık yaklaşım fonksiyonu

koşullarının gerçekleşmesi ile inşa edilir ve $\Psi_S \hat{\cap} \Psi_T$ şeklinde gösterilir.

Özellik 3.3: $\Psi_S, \Psi_T, \Psi_R \in SSBP - SBE(U)$ olsun. O halde,

- i. $\Psi_S \hat{\cup} \Psi_S = \Psi_S$ ve $\Psi_S \hat{\cap} \Psi_S = \Psi_S$
- ii. $\Psi_{\emptyset} \hat{\cup} \Psi_S = \Psi_S$ ve $\Psi_{\emptyset} \hat{\cap} \Psi_S = \Psi_{\emptyset}$
- iii. $\Psi_S \hat{\cup} \Psi_{\emptyset} = \Psi_S$ ve $\Psi_S \hat{\cap} \Psi_{\emptyset} = \Psi_{\emptyset}$
- iv. $\Psi_S \hat{\cup} \Psi_E = \Psi_S$ ve $\Psi_S \hat{\cap} \Psi_E = \Psi_S$
- v. $\Psi_S \hat{\cup} \Psi_T = \Psi_T \hat{\cup} \Psi_S$ ve $\Psi_S \hat{\cap} \Psi_T = \Psi_T \hat{\cap} \Psi_S$
- vi. $(\Psi_S \hat{\cup} \Psi_T) \hat{\cup} \Psi_R = \Psi_S \hat{\cup} (\Psi_T \hat{\cup} \Psi_R)$ ve $(\Psi_S \hat{\cap} \Psi_T) \hat{\cap} \Psi_R = \Psi_S \hat{\cap} (\Psi_T \hat{\cap} \Psi_R)$

Kanıt: Tanım 3.5'ten açıktır.

Özellik 3.4: $\Psi_S, \Psi_T \in SSBP - SBE(U)$ olmak üzere De Morgan kuralları gerçekleşir,

- i. $(\Psi_S \hat{\cup} \Psi_T)^c = \Psi_S^c \hat{\cap} \Psi_T^c$
- ii. $(\Psi_S \hat{\cap} \Psi_T)^c = \Psi_S^c \hat{\cup} \Psi_T^c$

Kanıt: Tanım 3.4 ve 3.5'ten faydalanılarak kolayca gösterilebilir.

Özellik 3.5: $\Psi_S, \Psi_T, \Psi_R \in SSBP - SBE(U)$ olsun. O halde,

- i. $\Psi_S \hat{\cup} (\Psi_T \hat{\cap} \Psi_R) = (\Psi_S \hat{\cup} \Psi_T) \hat{\cap} (\Psi_S \hat{\cup} \Psi_R)$
- ii. $\Psi_S \hat{\cap} (\Psi_T \hat{\cup} \Psi_R) = (\Psi_S \hat{\cap} \Psi_T) \hat{\cup} (\Psi_S \hat{\cap} \Psi_R)$

Kanıt: Özellik 3.3'ten açıktır.

4. Bir karar verme yaklaşımı

4. A decision making approach

Bu çalışmada tanıtılan sspb-sbe-kümeler karşılaşılan belirsizlik problemlerine yönelik karar vericilerden alınan üyelik veri kümesinin daha iyi bir şekilde işlenebilmesini amaçlar. Bu amacı gerçekleştirebilmek için; sspb-sbe-kümelerin bir genellemesi olan bu yeni matematiksel modelde sezgisel bulanık değerlerin alt ve üst

değerlerine yönelik sırasıyla alt ve üst bulanık yaklaşım kavramları verilmiştir. Bu bölümde ssbp-sbe-kümelerin karşılaşılan herhangi bir belirsizlik problemine uygulanabilmesi için bir karar verme algoritması önerilmiştir. Ayrıca algoritmanın bir uygulaması örneklendirilerek elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Algoritma:

Adım 1. Mevcut belirsizlik problemini ifade eden nesne kümesi U , parametre kümeleri $\underline{E}, E, \overline{E}$ ve bu parametre kümeleri üzerindeki sezgisel bulanık kümeler sırasıyla $\underline{S}, S, \overline{S}$ olacak şekilde ifade edin.

Adım 2. Karar verici tarafından ifade edilen sezgisel bulanık değerlerden faydalanarak Ψ_S ssbp-sbe-kümesini girin.

Adım 3. Her $u \in U$ için nesnelere toplam puanları

$$\Delta_{\Psi_S}(u) = \Sigma_{\Psi_S}^{\mu}(u) - \Sigma_{\Psi_S}^{\nu}(u) \tag{10}$$

şeklinde ifade edilen formülasyon yardımıyla hesapla. Burada

$$\Sigma_{\Psi_S}^{\mu}(u) = \frac{1}{3|E|} \left(\begin{array}{l} \sum_{e^{\alpha^{1,2}} \in \underline{E}} (\mu_{\underline{S}}(e^{\alpha^1}) - \nu_{\underline{S}}(e^{\alpha^2})) \mu_{\phi_{\underline{S}}(e^{\alpha^{1,2}})}(u) + \\ \sum_{e \in E} (\mu_S(e) - \nu_S(e)) \mu_{\phi_S(e)}(u) + \\ \sum_{e^{\overline{\alpha}} \in \overline{E}} (\mu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^1}}) - \nu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^2}})) \mu_{\phi_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^{1,2}}})}(u) \end{array} \right) \tag{11}$$

$$\Sigma_{\Psi_S}^{\nu}(u) = \frac{1}{3|E|} \left(\begin{array}{l} \sum_{e^{\alpha^{1,2}} \in \underline{E}} (\mu_{\underline{S}}(e^{\alpha^1}) - \nu_{\underline{S}}(e^{\alpha^2})) \nu_{\phi_{\underline{S}}(e^{\alpha^{1,2}})}(u) + \\ \sum_{e \in E} (\mu_S(e) - \nu_S(e)) \nu_{\phi_S(e)}(u) + \\ \sum_{e^{\overline{\alpha}} \in \overline{E}} (\mu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^1}}) - \nu_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^2}})) \nu_{\phi_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^{1,2}}})}(u) \end{array} \right) \tag{12}$$

şeklinde ifade edilir. Formülasyonlarda kullanılan $|E|$, E 'nin kardinalitesini ifade eder. Ayrıca; $\mu_{\phi_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^{1,2}}})}$, $\mu_{\phi_S(e)}$, $\mu_{\phi_{\underline{S}}(e^{\alpha^{1,2}})}$ sırasıyla $\overline{\phi_S}(e^{\overline{\alpha^{1,2}}})$, $\phi_S(e)$, $\underline{\phi_S}(e^{\alpha^{1,2}})$ sezgisel yaklaşım fonksiyonlarının üyelik fonksiyonlarıdır. Benzer şekilde; $\nu_{\phi_{\overline{S}}(e^{\overline{\alpha^{1,2}}})}$, $\nu_{\phi_S(e)}$, $\nu_{\phi_{\underline{S}}(e^{\alpha^{1,2}})}$ sırasıyla $\overline{\phi_S}(e^{\overline{\alpha^{1,2}}})$, $\phi_S(e)$, $\underline{\phi_S}(e^{\alpha^{1,2}})$ sezgisel yaklaşım fonksiyonlarının üye olmama fonksiyonlarıdır.

Adım 4. $\Delta_{\Psi_S}(u_l) = \max\{\Delta_{\Psi_S}(u_k) : u_k \in U\}$ değerini bul.

Adım 5. Mevcut belirsizlik probleminde ifade edilen parametreleri sağlayan en iyi nesne u_l 'dir.

Şimdi, ssbp-sbe-kümeler için inşa edilen bu karar verme algoritmasının bir belirsizlik problemi üzerinde nasıl uygulanması gerektiğini örneklelim;

Problem: Elektrikli bir araç almak isteyen bir kişinin kendisine en yakın galeriye gittiğini varsayalım. Galerideki mevcut elektrikli araçların kümesi $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ ve bu kişinin daha önceden kendisi için belirlemiş olduğu parametrelerin kümesi $E = \{e_1: \text{hızlı}, e_2: \text{konforlu}, e_3: \text{ekonomik}\}$ şeklinde verilmiş olsun. Galerici; bu kişinin ifade ettiği her parametrenin kendisi için ne kadar önemli ve önemsiz olduğunu ifade etmesini istemiştir. Böylece mevcut araçlar arasından en uygun elektrikli aracın tespiti galerici ya da araç almak isteyen kişi için tespit edilebilir. Ancak bu kişi sezgisel bulanık değerleri ifade edebilmekte oldukça zorlanmaktadır. Bu zorluğun sebebi $[0,1]$ aralığında çok sayıda rasyonel sayı olması ve bu sayılardan hangisinin kendisi için doğru değer olabileceğini tespit edememesidir. Bu oldukça zor bir iştir. Bunun için bu kişiden her bir değer için bir alt ve üst değer de belirtmesi istenmiştir. Bu durumda bu kişi tarafından ifade edilen sezgisel bulanık değerler $\underline{E} = \left\{ \frac{e_1}{\langle 0.4, 0.52 \rangle}, \frac{e_2}{\langle 0.4, 0.55 \rangle}, \frac{e_3}{\langle 0.52, 0.43 \rangle} \right\}$, $E = \left\{ \frac{e_1}{\langle 0.42, 0.5 \rangle}, \frac{e_2}{\langle 0.6, 0.2 \rangle}, \frac{e_3}{\langle 0.61, 0.3 \rangle} \right\}$ ve $\overline{E} = \left\{ \frac{e_1}{\langle 0.74, 0.2 \rangle}, \frac{e_2}{\langle 0.7, 0.1 \rangle}, \frac{e_3}{\langle 0.7, 0.25 \rangle} \right\}$ olsun. Galerici tarafından ifade edilen parametreler için mevcut elektrikli araçların değerlendirilmesi

$$\Psi_S = \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{e_1}{\langle 0.4, 0.52 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.8, 0.1 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.6, 0.32 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.72, 0.2 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.6, 0.32 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.7, 0.04 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.4, 0.55 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.5, 0.3 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.62, 0.25 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.5, 0.27 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.8, 0.15 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.82, 0.2 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_3}{\langle 0.52, 0.43 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.8, 0.1 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.73, 0.2 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.64, 0.32 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.76, 0.22 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.9, 0.06 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_1}{\langle 0.42, 0.5 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.7, 0.2 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.5, 0.4 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.6, 0.24 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.45, 0.35 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.65, 0.1 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.6, 0.2 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.4, 0.37 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.6, 0.3 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.48, 0.3 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.62, 0.32 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.75, 0.21 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_3}{\langle 0.61, 0.3 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.55, 0.4 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.5, 0.3 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.62, 0.35 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.64, 0.44 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.36, 0.58 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_1}{\langle 0.74, 0.2 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.64, 0.3 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.47, 0.41 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.55, 0.3 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.42, 0.38 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.55, 0.2 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_2}{\langle 0.7, 0.1 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.39, 0.4 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.57, 0.31 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.4, 0.32 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.6, 0.33 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.7, 0.25 \rangle} \right\} \right), \\ \left(\frac{e_3}{\langle 0.7, 0.25 \rangle}, \left\{ \frac{u_1}{\langle 0.52, 0.42 \rangle}, \frac{u_2}{\langle 0.49, 0.31 \rangle}, \frac{u_3}{\langle 0.6, 0.37 \rangle}, \frac{u_4}{\langle 0.61, 0.45 \rangle}, \frac{u_5}{\langle 0.2, 0.6 \rangle} \right\} \right) \end{array} \right\}$$

ssbp-sbe-kümesi yardımıyla ifade edilsin.

Şimdi Ψ_S ssbp-sbe-kümesinden faydalanılarak her bir nesne için toplam puanları hesaplayalım. Örneğin; ilk elektrikli araç olan u_1 için,

$$\Sigma_{\Psi_S}^{\mu}(u_1) = \frac{1}{9} \left(\begin{array}{l} (0.4 - 0.52)0.8 + (0.4 - 0.55)0.5 + (0.52 - 0.43)0.8 + \\ (0.42 - 0.5)0.7 + (0.6 - 0.2)0.4 + (0.61 - 0.3)0.55 + \\ (0.74 - 0.2)0.64 + (0.7 - 0.1)0.39 + (0.7 - 0.25)0.52 \end{array} \right) = 0.10214$$

ve

$$\Sigma_{\Psi_S}^{\nu}(u_1) = \frac{1}{9} \left(\begin{array}{l} (0.4 - 0.52)0.1 + (0.4 - 0.55)0.3 + (0.52 - 0.43)0.1 + \\ (0.42 - 0.5)0.2 + (0.6 - 0.2)0.37 + (0.61 - 0.3)0.4 + \\ (0.74 - 0.2)0.3 + (0.7 - 0.1)0.4 + (0.7 - 0.25)0.42 \end{array} \right) = 0.08313$$

olmak üzere $\Delta_{\Psi_S}(u) = \Sigma_{\Psi_S}^{\mu}(u) - \Sigma_{\Psi_S}^{\nu}(u) = 0.10214 - 0.08313 = 0.01901$ olarak elde edilir. Benzer şekilde,

$$\begin{array}{ll} \Delta_{\Psi_S}(u_2) = 0.0418, & \Delta_{\Psi_S}(u_3) = 0.0346, \\ \Delta_{\Psi_S}(u_4) = 0.0357, & \Delta_{\Psi_S}(u_5) = 0.0352. \end{array}$$

Buradan, $\max\{\Delta_{\Psi_S}(u_k): u_k \in U\} = \Delta_{\Psi_S}(u_2) = 0.0418$ olduğundan u_2 elektrikli aracı bu kişi için en uygun elektrikli araç olarak tespit edilmiştir.

5. Bir karşılaştırma

5. A comparison

Belirsizliğe yönelik karar verme problemlerini değerlendirmek için faydalanılan ssbp-sbe-kümeler, sbp-sbe-kümelerin bir genellemesi olacak şekilde inşa edildiğinden sbp-sbe-kümelerden daha ideale yakın sonuçları elde eder. En kötü ihtimalle aynı sonuçlar elde edilir. Çünkü bu kümelerin inşasında ana sbp-sbe-kümenin dışında alt ve üst sezgisel bulanık değerlerin ifade edilebilmesine yönelik iki tane sbp-sbe-kümeden de faydalanılmıştır. Bu durumu yine bir örnekle şöyle ifade edilebilir:

Bir önceki bölümde verilen belirsizlik problemi, önerilen algoritma yardımıyla ana sbp-sbe-kümeler için çözümlenmiş olsaydı her bir elektrikli araç için elde edilen toplam puanlar şöyle hesaplanmıştı:

u_1 için,

$$\Sigma_{\Psi_S}^{\mu}(u_1) = \frac{1}{3} ((0.42 - 0.5)0.7 + (0.6 - 0.2)0.4 + (0.61 - 0.3)0.55) = 0.0915$$

ve

$$\Sigma_{\Psi_S}^{\nu}(u_1) = \frac{1}{3} ((0.42 - 0.5)0.2 + (0.6 - 0.2)0.37 + (0.61 - 0.3)0.4) = 0.0853$$

olmak üzere $\Delta_{\Psi_S}(u) = \Sigma_{\Psi_S}^{\mu}(u) - \Sigma_{\Psi_S}^{\nu}(u) = 0.0915 - 0.0853 = 0.0062$ olarak elde edilir. Benzer şekilde,

$$\Delta_{\Psi_S}(u_2) = 0.058, \quad \Delta_{\Psi_S}(u_3) = 0.0423,$$

$$\Delta_{\Psi_S}(u_4) = 0.058, \quad \Delta_{\Psi_S}(u_5) = 0.0346.$$

Buradan, $\max\{\Delta_{\Psi_S}(u_k): u_k \in U\} = \Delta_{\Psi_S}(u_2) = \Delta_{\Psi_S}(u_4) = 0.058$ olduğundan en iyi elektrikli araç seçilemez. Bu nedenle mevcut belirsizlik probleminin çözümlenmesine yönelik karar vericilerin sezgisel bulanık değerleri ifade edebilmesine yardımcı olan sspb-sbe-kümelerin tercih edilmesi önerilir.

6. Sonuç

6. Conclusion

Bu çalışma, sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümelerde karar vericilerin sezgisel bulanık değerleri doğru bir şekilde ifade edebilmesini amaçlar. Buna yönelik sanal alt ve üst sezgisel bulanık yaklaşımlar tanıtılarak sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümelerin bir genellemesi olan sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek küme kavramı tanımlanmıştır. Ayrıca bu hibrit küme tipi için alt küme, tümleyen, birleşim, kesişim gibi temel küme işlemleri verilmiştir. Dahası, sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümelere odaklanan bir karar verme algoritması önerilmiştir ve bir belirsizlik problemine nasıl uygulanabileceği örneklendirilmiştir. Son olarak önerilen algoritma için bir karşılaştırma irdelenmiştir. Bu çalışmada önerilen hibrit matematiksel model sayesinde karmaşık değerli veri analizi konusunda karar vericilerden alınan değerlerin önemi vurgulanmıştır. Özellikle bu anlamda sanal sezgisel bulanık parametrelili sezgisel bulanık esnek kümelerin gelecekte inşa edilmesi düşünülen matematiksel modeller için bir ilham kaynağı olabileceği düşünülmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Araştırmacılarından Dalkılıç; makale fikrinin oluşturulması, literatür verilerin elde edilmesi, bulgular ve sonuç kısmının şekillendirilmesine yönelik (%50 oranında) katkı sunmuştur. Demirtaş ise, makalenin düzenlenmesi, ilerleyişinin denetlenmesi, ilgili tabloların/bulguların ve sonuç kısmının değerlendirilmesi hususunda (%50 oranında) katkı sunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler”

başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Atanassov, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87–96.
- Çağman, N., Çıtak, F., & Enginoğlu, S. (2010). Fuzzy parameterized fuzzy soft set theory and its applications. *Turkish Journal of Fuzzy Systems*, 1(1), 21–35.
- Çağman, N., Çıtak, F., & Enginoğlu, S. (2011). FP-soft set theory and its applications. *Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics*, 2(2), 219–226.
- Dalkılıç, O. (2021a). An application of VFPFSS's in decision-making problems. *Journal of Polytechnic*, 1-11, <https://doi.org/10.2339/politeknik.758474>.
- Dalkılıç, O. (2021b). Relations on neutrosophic soft set and their application in decision-making. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 67(1), 257-273.
- Dalkılıç, O. (2021c). A novel approach to soft set theory in decision-making under uncertainty. *International Journal of Computer Mathematics*, 98(10), 1935-1945.
- Dalkılıç, O., & Demirtaş, N. (2021). VFP-soft sets and its application on decision making Problems. *Journal of Polytechnic*, 24(4): 1391-1399.
- Deli, I., & Çağman, N. (2015). Intuitionistic fuzzy parameterized soft set theory and its decision making. *Applied Soft Computing*, 28, 109-113.
- Deli, I., & Çağman, N. (2016). Application of soft sets in decision making based on game theory. *Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics*, 11(3), 425-438.

- Demir, İ. (2021). N-soft mappings with application in medical diagnosis. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 44(8), 7343-7358.
- Demirtaş, N., & Dalkılıç, O. (2019). An application in the diagnosis of prostate cancer with the help of bipolar soft rough sets, on *Mathematics and Mathematics Education (ICMME 2019)*, KONYA, 283.
- Demirtaş, N., Hussam, S., & Dalkılıç, O. (2020). New approaches of inverse soft rough sets and their applications in a decision making problem. *Journal of applied mathematics and informatics*, 38(3-4), 335-349.
- Demirtaş, N., Dalkılıç, O., & Riaz, M. (2022). A mathematical model to the inadequacy of bipolar soft sets in uncertainty environment: N-polar soft set. *Computational and Applied Mathematics*, 41(1), 1-19.
- El-yagubi, E., & Salleh, A. (2013). Intuitionistic fuzzy parameterised fuzzy soft set. *Journal of Quality Measurement and Analysis*, 9(2), 73-81.
- Enginoğlu, S., Çağman, N., Karataş, S., & Aydın, T. (2015). On soft topology. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2(3), 23-38.
- Enginoğlu, S., Memiş, S., & Çağman, N. (2019). A Generalization of fuzzy soft max-min decision-making method and its application to a performance-based value assignment in image denoising. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 6(3), 466-481.
- Ergül, Z. G., & Yüksel, S. (2019). A new type of soft covering based rough sets applied to multicriteria group decision making for medical diagnosis. *Mathematical Sciences and Applications E-Notes*, 7(1), 28-38.
- Irkin, R., Ozgur, N. Y., & Tas, N. (2018). Optimization of lactic acid bacteria viability using fuzzy soft set modelling. *An International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications*, 8(2), 266-275.
- Karaaslan, F. (2016). Intuitionistic fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft sets with applications in decision making. *Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics*, 11(4), 607-619.
- Maji, P. K., Biswas, R., & Roy, A. R. (2001a). Fuzzy soft sets. *Journal of Fuzzy Mathematics*, 9(3), 589-602.
- Maji, P. K., Biswas, R., & Roy, A. R. (2001b). Intuitionistic fuzzy soft sets. *The Journal of Fuzzy Mathematics*, 9(3), 677-692.
- Molodtsov, D. A. (1999). Soft set theory—first results. *Computers and Mathematics with Applications*, 37(4-5), 19-31.
- Saeed, M., Ahmad, M.R., Saqlain, M., & Riaz, M. (2020). Rudiments N-framed soft sets, *Punjab University Journal of Mathematics*, 52(5), 15-30.
- Selvakumari, K. (2018). Solving game problem using weighted soft sets. *Journal of Computer and Mathematical Sciences*, 9(10), 1307-1311.
- Sulukan, E., Çağman, N., & Aydın, T. (2019). Fuzzy parameterized intuitionistic fuzzy soft sets and their application to a performance-based value assignment problem. *Journal of New Theory*, (29), 79-88.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
- Zou, Y., & Xiao, Z. (2008). Data analysis approaches of soft sets under incomplete information. *Knowledge Base System*, 21, 941-945.

Gradation of continuity for mappings between L-soft topological spaces

L-esnek topolojik uzaylar arasındaki dönüşümler için sürekliliğin derecelendirmesi

Vildan ÇETKİN^{*1,a}

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Umuttepe Yerleşkesi, 41001, Kocaeli

• Geliş tarihi / Received: 27.12.2020

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 08.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 18.04.2022

Abstract

In this article, we aim to present the degrees of continuity, closedness and openness for a soft mapping which is defined between L-soft topological spaces, where L is a complete DeMorgan algebra. We propose the gradation of continuity for a soft mapping with the help of the soft closure operators and by considering the fuzzy soft inclusion which depends on the lattice implication. We also observe many characterizations and properties of the degree of the continuity. Then, we present the degree of openness for a soft mapping with help of the soft interior operators. At the end, we investigate the relations among the proposed concepts; the degree of continuity, closedness and openness in a natural way.

Keywords: Closure, Continuity, Fuzzy soft set, L-soft topology, Openness, Soft mapping

Öz

Bu çalışmada, L bir tam DeMorgan cebiri olmak üzere, L-esnek topolojik uzaylar arasında tanımlanan esnek dönüşümler için süreklilik, kapalılık ve açıklığın derecelendirmesini sunmayı amaçladık. Esnek kapanış operatörleri yardımıyla ve kafes gerektirme işlemine dayanan bulanık esnek içirme bağıntısının da dikkate alınmasıyla esnek bir dönüşüm için sürekliliğin derecelendirmesini ifade ettik. Ayrıca sürekliliğin bu derecelendirmesinin birçok karakterizasyonunu ve özelliğini gözlemledik. Daha sonra, esnek iç operatörlerinin yardımıyla esnek dönüşümler için açıklığın derecelendirmesini verdik. En sonunda, ifade edilen yapılar olan sürekliliğin, kapalılığın ve açıklığın derecelendirmeleri arasındaki ilişkileri doğal bir yolla inceledik.

Anahtar kelimeler: Kapanış, Süreklilik, Bulanık esnek küme, L-esnek topoloji, Açıklık, Esnek dönüşüm

^{*a} Vildan ÇETKİN; vildan.cetkin@kocaeli.edu.tr, Tel: (0262) 303 21 00, orcid.org/0000-0003-3136-0124

1. Introduction

1. Giriş

The soft set theory, described by Molodtsov (1999), is one of the mathematical methods that aims to identify phenomena and concepts of ambiguous, undefined and imprecise meaning. According to this definition, a soft set is a parameterized family of classical sets. This means that parameters play the key role in this definition. Since the objects obtained from the experiments, human decisions, the datas in the computer sciences and so on, depend on some parameters, this new perspective idea drew attention of pure mathematicians as well as researchers in the area of applied mathematics. In the general topology, a set is open or not open, and this idea is based on the two-valued logic. However, in the fuzzy topology a set (or a fuzzy set) is open to some degree, and this idea is based on the fuzzy logic (or so called many valued logic) which gives some belongingness degrees to the elements of the sets. This way of gradation is very useful in many areas, since the real life problems are not black or white, they have greyness and fuzzy logic helps us to model these kinds of phenomena. The birth of the fuzzy soft set theory (Maji et al., 2001) which is gained by combining the soft set theory and the fuzzy set theory (Zadeh, 1965), has accelareted the investigations in many directions. The idea of fuzzy soft set theory is based on the parametric gradation of belongingness. So, it is a more suitable tool for the real life modellings. Inspiring by this idea, mathematicians working in the pure sciences embedded these set theories to their own branches. Up to now, lots of spectacular and creative researches about the theories of soft sets and the fuzzy soft sets have been considered by some scholars (Roy & Maji, 2007; Çetkin, 2019; Terepeta, 2019; Kocinac et al., 2021; Al-jarrah et al., 2022; Çetkin, 2022).

2. Preliminaries

2. Ön bilgiler

Let X be a nonempty set and L be a completely distributive DeMorgan algebra, i.e., completely distributive lattice with an order reversing involution $' : L \rightarrow L$. The smallest element and the largest element in L is denoted by $0_L, 1_L$, respectively. L^X denotes the set of all L -fuzzy subsets of X . For more details about lattices, one can see (Gierz et al., 1980; Liu & Luo, 1997).

The binary operation \mapsto on the complete DeMorgan algebra L is given by

$$\alpha \mapsto \beta = \vee \{ \gamma \in L \mid \alpha \wedge \gamma \leq \beta \}$$

For all $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in L$ and $\{ \alpha_i \}_i, \{ \beta_i \}_i \subseteq L$, the followings are valid:

The concept of continuous function is basic to much of mathematics since it is a special function between some structured spaces. Despite the sets (or fuzzy sets) have some openness degrees in the fuzzy topological spaces, being a continuous map, an open or a closed map are defined as in the classical case. In order to make the structures more compatible with the spirit of the fuzzy theory, Pang (2014) defined the graded continuity and openness for mappings between L -fuzzifying topological spaces. He initiated to give some degrees of continuous mappings and open mappings in the corresponding spaces. Later, the degrees of continuous mappings and open mappings between L -fuzzy topological spaces have been presented by Liang and Shi (2014). Further, the concept of L -continuity between L -topological spaces has been presented and some different characterizations have been described (Xiu & Li, 2019).

By inspired from the former theories, our main intention is to consider the continuous (open and closed) mappings between L -soft topological spaces, in the view of many valued logic by giving some degrees to what extent the mappings are contiuous (open and closed). Hence, in this study, we deal with the formulation of the gradation of continuity for soft mappings between L -soft topological spaces. In this manner, we propose some operators denoted by "*Cont, Close, Open*", respectively, which assigns each soft mapping to some value of the underlying lattice L , which shows "the degree" of continuity, closedness and the openness of the given soft mapping, respectively. In this way, each soft mapping can be regarded as continuous, closed or open to some degrees. Hence, we obtain a compatible continuity definition in the observed structured spaces.

- (1) $\alpha \mapsto \beta \geq \gamma$ iff $\alpha \wedge \gamma \leq \beta$.
- (2) $\alpha \mapsto \beta = 1_L \Leftrightarrow \alpha \leq \beta$.
- (3) $\alpha \mapsto \bigwedge_i \beta_i = \bigwedge_i (\alpha \mapsto \beta_i)$.
- (4) $b(\bigvee_i \alpha_i) \mapsto \beta = \bigwedge_i (\alpha_i \mapsto \beta)$.
- (5) $(\alpha \mapsto \gamma) \wedge (\gamma \mapsto \beta) \leq \alpha \mapsto \beta$.
- (6) $\alpha \leq \beta$ implies $\gamma \mapsto \alpha \leq \gamma \mapsto \beta$.
- (7) $\alpha \leq \beta$ implies $\beta \mapsto \gamma \leq \alpha \mapsto \gamma$.

Let E be an arbitrary nonempty set viewed on the set of parameters. The parameterized version of an L -fuzzy set is called an L -fuzzy soft set and it is defined as follows.

Definition 2.1. (Maji et al., 2001; Çetkin & Aygün, 2014) f is called an L -fuzzy soft set on X , where f is a mapping from E into the set of all L -fuzzy sets, L^X . This means that, $f_e := f(e): X \rightarrow L$ is an L -fuzzy set on X , for each parameter $e \in E$. The family of all L -fuzzy soft sets on X is denoted by $(L^X)^E$.

Definition 2.2. (Ahmad & Kharal, 2009; Çetkin, 2014) Let f, g be two L -fuzzy soft sets on X , then the set-theoretical operations are as follows:

- (1) f is called an L -fuzzy soft subset of g and denoted by $f \sqsubseteq g$, if $f_e \leq g_e$, for each $e \in E$. f, g are called equal if $f \sqsubseteq g$ and $g \sqsubseteq f$.
- (2) the union of f and g , is an L -fuzzy soft set $h = f \sqcup g$, where $h_e = f_e \vee g_e$, for each $e \in E$.
- (3) the intersection of f and g , is an L -fuzzy soft set $h = f \sqcap g$, where $h_e = f_e \wedge g_e$, for each $e \in E$.
- (4) the complement of an L -fuzzy soft set f , is denoted by f' , where $f': E \rightarrow L^X$ is defined by $f'_e(x) = (f_e(x))'$, for each $e \in E$ and $x \in X$. It is clear that $(f')' = f$.

Definition 2.3. (Çetkin, 2014)

- (1) An L -fuzzy soft set f on X , is called a null (empty) L -fuzzy soft set on X , denoted by $\tilde{0}_X$, if $f_e(x) = 0_L$, for each $e \in E$ and $x \in X$.
- (2) An L -fuzzy soft set f on X , is called an absolute (universal) L -fuzzy soft set on X , denoted by $\tilde{1}_X$, if $f_e(x) = 1_L$, for each $e \in E$ and $x \in X$.

Definition 2.4. (Kharal & Ahmad, 2009; Aygünoğlu & Aygün, 2009; Çetkin, 2014) Let $\varphi : X_1 \rightarrow X_2$ and $\psi : E_1 \rightarrow E_2$ be two crisp functions, where E_1 and E_2 are the parameter sets for the classical sets X_1 and X_2 , respectively. Then the pair $(\varphi, \psi): (X_1, E_1) \rightarrow (X_2, E_2)$ (which is denoted by $\varphi_\psi := (\varphi, \psi)$, for short) is said to be a soft mapping from X_1 to X_2 . Then the image and the inverse image (pre-image) are defined by follows.

- (1) Let f be an L -fuzzy soft set on X_1 , then its image under φ_ψ is an L -fuzzy soft set on X_2 ,
 $\varphi_\psi(f)_k(y) = \bigvee_{y=\varphi(x)} \bigvee_{k=\psi(e)} f_e(x)$, for each $k \in E_2$ and $y \in X_2$.
- (2) Let g be an L -fuzzy soft set on X_2 , then its pre-image under φ_ψ is an L -fuzzy soft set on X_1 ,
 $\varphi_\psi^{-1}(g)_e(x) = g_{\psi(e)}(\varphi(x))$, for each $e \in E_1$ and $x \in X_1$.
- (3) If φ and ψ are both surjective (injective), then the soft mapping φ_ψ is called surjective (injective).
- (4) Let φ_ψ be a soft mapping from X_1 to X_2 , and φ_{ψ^*} be a soft mapping from X_2 to X_3 . Then the composition $\varphi_{\psi^*} \circ \varphi_\psi$ is a soft mapping from X_1 to X_3 , and it is defined as follows $(\varphi_{\psi^*} \circ \varphi_\psi) = (\varphi^* \circ \varphi)_{\psi^* \circ \psi}$.

Proposition 2.5. (Kharal & Ahmad, 2009; Çetkin, 2014) Let $\varphi_\psi: (X_1, E_1) \rightarrow (X_2, E_2)$ be a soft mapping. Then the followings are satisfied for each $f, f_1, f_2 \in (L^{X_1})^{E_1}$ and $g, g_1, g_2 \in (L^{X_2})^{E_2}$,

- (1) $f_1 \sqsubseteq f_2$ implies $\varphi_\psi(f_1) \sqsubseteq \varphi_\psi(f_2)$.
- (2) $g_1 \sqsubseteq g_2$ implies $\varphi_\psi^{-1}(g_1) \sqsubseteq \varphi_\psi^{-1}(g_2)$.

- (3) $f \sqsubseteq \varphi_{\psi}^{-1}(\varphi_{\psi}(f))$, the equality holds if φ_{ψ} is injective.
- (4) $\varphi_{\psi}(\varphi_{\psi}^{-1}(g)) \sqsubseteq g$, the equality holds if φ_{ψ} is surjective.

Definition 2.6. (Çetkin, 2019) The fuzzy soft inclusion $[\sqsubseteq] : (L^X)^E \times (L^X)^E \rightarrow L$ is defined by the following equality

$$[f \sqsubseteq g] = \bigwedge_{x \in X} \bigwedge_{e \in E} (f'_e(x) \vee g_e(x))$$

or equivalently,

$$[f \sqsubseteq g] = \bigwedge_{x \in X} \bigwedge_{e \in E} (f_e(x) \mapsto g_e(x)).$$

Lemma 2.7. Let φ_{ψ} be a mapping from an L -soft space (X_1, E_1) to an L -soft space (X_2, E_2) . Then the fuzzy soft inclusion satisfies the following conditions for each $f, g, h \in (L^{X_1})^{E_1}$ and $u, v \in (L^{X_2})^{E_2}$,

- (1) $[f \sqsubseteq g] = 1_L \iff f \sqsubseteq g$.
- (2) $f \sqsubseteq g$ implies $[f \sqsubseteq h] \geq [g \sqsubseteq h]$
- (3) $f \sqsubseteq g$ implies $[h \sqsubseteq f] \leq [h \sqsubseteq g]$
- (4) $[f \sqsubseteq g] \wedge [g \sqsubseteq h] \leq [f \sqsubseteq h]$
- (5) $[f \sqsubseteq g] \leq [\varphi_{\psi}(f) \sqsubseteq \varphi_{\psi}(g)]$
- (6) $[u \sqsubseteq v] \leq [\varphi_{\psi}^{-1}(u) \sqsubseteq \varphi_{\psi}^{-1}(v)]$.

Proof. It is straightforward from the properties of the implication and Definition 2.6.

Definition 2.8. (Tanay & Kandemir, 2011) Let τ be the collection of L -fuzzy soft sets on X . Then τ is said to be an L -soft topology on X if

- (T1) $\tilde{0}_X, \tilde{1}_X \in \tau$
- (T2) $f, g \in \tau$ implies $f \sqcap g \in \tau$.
- (T3) $\{f_i\}_{i \in \Gamma} \subseteq \tau$ implies $\sqcup_{i \in \Gamma} f_i \in \tau$.

Then the pair (X, τ) is called an L -soft topological space. Every member of τ is called an L -soft open set, and if $g' \in \tau$, then the L -soft set $g \in (L^X)^E$ is called an L -soft closed set.

A soft mapping $\varphi_{\psi} : (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2)$ is called continuous between L -soft topological spaces if $\varphi_{\psi}^{-1}(g) \in \tau^1$ for all $g \in \tau^2$.

Definition 2.9. (Varol & Aygün, 2012) A map $cl : (L^X)^E \rightarrow (L^X)^E$ is said to be an L -soft closure operator on X if the following conditions are satisfied

- (SC1) $cl(\tilde{0}_X) = \tilde{0}_X$
- (SC2) $cl(f \sqcup g) = cl(f) \sqcup cl(g)$, for each $f, g \in (L^X)^E$
- (SC3) $f \sqsubseteq cl(f)$, for each $f \in (L^X)^E$

If additionally it satisfies

- (SC4) $cl(cl(f)) = cl(f)$, for each $f \in (L^X)^E$

then the map cl is a topological L -soft closure operator on X . For any topological L -soft closure operator on X , the collection

$\tau = \{f \in (L^X)^E \mid cl(f') = f'\}$ is an L -soft topology on X in which closure of f coincides with $cl(f)$. And if τ is an L -soft topology on X , then

$cl(f) = \sqcap \{g \in (L^X)^E \mid f \sqsubseteq g \text{ and } g' \in \tau\}$ defines an L -soft closure operator on X . (Çetkin & Aygün, 2016)

Definition 2.10. Let \mathcal{C} be the collection of L -fuzzy soft sets on X . Then the collection \mathcal{C} is said to be an L -soft cotopology on X if

- (CT1) $\tilde{0}_X, \tilde{1}_X \in \mathcal{C}$
- (CT2) $f, g \in \mathcal{C}$ implies $f \sqcup g \in \mathcal{C}$.
- (CT3) $\{f_i\}_{i \in \Gamma} \subseteq \mathcal{C}$ implies $\prod_{i \in \Gamma} f_i \in \mathcal{C}$.

For an L -soft cotopology on X , the pair (X, \mathcal{C}) is called an L -soft cotopological space.

A soft mapping $\varphi_\psi: (X_1, \mathcal{C}^1) \rightarrow (X_2, \mathcal{C}^2)$ is called continuous between L -soft cotopological spaces if $\varphi_\psi^{-1}(g) \in \mathcal{C}^1$ for all $g \in \mathcal{C}^2$.

A mapping $\varphi_\psi: (X_1, \mathcal{C}^1) \rightarrow (X_2, \mathcal{C}^2)$ is called closed between L -soft cotopological spaces if $\varphi_\psi(f) \in \mathcal{C}^2$ for all $f \in \mathcal{C}^1$.

Definition 2.11. A map $int: (L^X)^E \rightarrow (L^X)^E$ is said to be an L -soft interior operator on X if the following conditions are satisfied

- (SI1) $int(\tilde{1}_X) = 1_X$
- (SI2) $int(f \sqcap g) = int(f) \sqcap int(g)$, for each $f, g \in (L^X)^E$
- (SI3) $int(f) \sqsubseteq f$, for each $f \in (L^X)^E$
- (SI4) $int(int(f)) = int(f)$, for each $f \in (L^X)^E$

Then the pair (X, int) is called an L -soft interior space. A mapping $\varphi_\psi: (X_1, int^1) \rightarrow (X_2, int^2)$ is called continuous between L -soft interior spaces if it is provided that

$$\varphi_\psi(int^1(f)) \sqsubseteq int^2(\varphi_\psi(f)), \text{ for each } f \in (L^X)^E.$$

It is easily observed that there is close relationship between L -soft topological spaces and L -soft interior operators. In fact these two concepts are equivalent in the following sense,

If τ is an L -soft topology on X , then

$$int^\tau(f) = \sqcup \{g \in (L^X)^E \mid g \sqsubseteq f \text{ and } g \in \tau\}$$

defines an L -soft interior operator on X . And conversely, if $int: (L^X)^E \rightarrow (L^X)^E$ is an L -soft interior operator on X , then $\tau^{int} = \{f \in (L^X)^E \mid int(f) = f\}$ defines an L -soft topology on the same set. In addition, $\tau^{int^\tau} = \tau$ and $int^{\tau^{int}} = int$. If we consider these two concepts in the categorical meaning, then one can see the similar correspondence between the morphisms described between the objects below. So that, there is one-to-one correspondence between the objects and the morphisms of the considered structures. Then one can conclude that, these two concepts are same in the categorical aspect.

Theorem 2.12. (Georgiou et al., 2013) Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ be two L -soft topological spaces. Then the following conditions are equivalent.

- (1) $\varphi_\psi: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2)$ is continuous.
- (2) $g \notin \tau^2$ implies $\varphi_\psi^{-1}(g) \notin \tau^1$.
- (3) $\varphi_\psi(cl(f)) \sqsubseteq cl(\varphi_\psi(f))$, for each $f \in (L^{X_1})^{E_1}$.
- (4) $cl(\varphi_\psi^{-1}(g)) \sqsubseteq \varphi_\psi^{-1}(cl(g))$, for each $g \in (L^{X_2})^{E_2}$.

Theorem 2.13. If (X, τ) is an L -soft topological space, the collection $\mathcal{C} = \{f \mid f' \in \tau\}$ constitutes an L -soft cotopological space (X, \mathcal{C}) . Additionally, $cl(f) = (int(f'))'$, for each $f \in (L^X)^E$.

Proof. Straightforward and therefore omitted.

3. Degrees of continuity, closedness and openness for soft mappings

3. Esnek dönüşümler için süreklilik, kapalılık ve açıklığın dereceleri

In this section, we define the degrees of continuity and closedness for a soft mapping between L -soft topological spaces with the help of the fuzzy soft inclusion. Later, we define the degree of openness for a given soft mapping with the help of the interior operator characterization. We investigate some properties and characteristics of the presented concepts.

Definition 3.1. Let $(X_1, \mathcal{C}^1), (X_2, \mathcal{C}^2)$ be two L -soft cotopological spaces. Then

(1) the degree of continuity for $\varphi_\psi: (X_1, \mathcal{C}^1) \rightarrow (X_2, \mathcal{C}^2)$ is defined by

$$Cont(\varphi_\psi) = \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))]$$

(2) the degree of closedness for $\varphi_\psi: (X_1, \mathcal{C}^1) \rightarrow (X_2, \mathcal{C}^2)$ is defined by

$$Close(\varphi_\psi) = \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl(\varphi_\psi(f)) \cong \varphi_\psi(cl(f))]$$

Remark 3.2. (1) If $Cont(\varphi_\psi) = 1_L$, then $\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))$ for each $f \in (L^X)^E$, which is an equivalent condition of the continuity of φ_ψ (see Theorem 2.12).

(2) If $Close(\varphi_\psi) = 1_L$, then $cl(\varphi_\psi(f)) \cong \varphi_\psi(cl(f))$ for each $f \in (L^X)^E$, which is the equivalent form of the closedness for the soft mapping φ_ψ defined between L -soft cotopological spaces.

Now, let us give some characterizations of the degree of continuity for a soft mapping.

Theorem 3.3. Let $(X_1, \mathcal{C}^1), (X_2, \mathcal{C}^2)$ be two L -soft cotopological spaces and φ_ψ be a soft mapping which is defined from (X_1, \mathcal{C}^1) to (X_2, \mathcal{C}^2) . Then the following is satisfied.

$$Cont(\varphi_\psi) = \bigwedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [\varphi_\psi(cl(\varphi_\psi^{-1}(g))) \cong cl(g)].$$

Proof. From Definition 3.1 (2), we have that

$$\begin{aligned} Cont(\varphi_\psi) &= \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))] \\ &\leq \bigwedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [\varphi_\psi(cl(\varphi_\psi^{-1}(g))) \cong cl(\varphi_\psi(\varphi_\psi^{-1}(g)))] \\ &\leq \bigwedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [\varphi_\psi(cl(\varphi_\psi^{-1}(g))) \cong cl(g)] \\ &\leq \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_\psi(cl(\varphi_\psi^{-1}(\varphi_\psi(f)))) \cong cl(\varphi_\psi(f))] \\ &\leq \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))]. \end{aligned}$$

The above implications gives the desired equality.

Theorem 3.4. Let $(X_1, \mathcal{C}^1), (X_2, \mathcal{C}^2)$ be two L -soft cotopological spaces and φ_ψ be a soft mapping which is defined from (X_1, \mathcal{C}^1) to (X_2, \mathcal{C}^2) . Then the following is satisfied.

$$Cont(\varphi_\psi) = \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl(f) \cong \varphi_\psi^{-1}(cl(\varphi_\psi(f)))].$$

Proof. First let us consider the fuzzy soft inclusion as follows:

$$[\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))] = \bigwedge_{y \in X_2} \bigwedge_{k \in E_2} (\varphi_\psi(cl(f))_k(y) \mapsto cl(\varphi_\psi(f))_k(y))$$

$$\begin{aligned}
 &= \bigwedge_{y \in X_2} \bigwedge_{k \in E_2} \left(\bigvee_{k=\psi(e)} \bigvee_{y=\varphi(x)} cl(f)_e(x) \mapsto cl(\varphi_\psi(f))_k(y) \right) \\
 &= \bigwedge_{y \in X_2} \bigwedge_{k \in E_2} \bigwedge_{k=\psi(e)} \bigwedge_{y=\varphi(x)} \left(cl(f)_e(x) \mapsto cl(\varphi_\psi(f))_{\psi(e)}(\varphi(x)) \right) \\
 &= \bigwedge_{y \in X_2} \bigwedge_{k \in E_2} \bigwedge_{k=\psi(e)} \bigwedge_{y=\varphi(x)} \left(cl(f)_e(x) \mapsto \varphi_\psi^{-1} \left(cl(\varphi_\psi(f)) \right)_e(x) \right) \\
 &= \bigwedge_{x \in X_1} \bigwedge_{e \in E_1} \left(cl(f)_e(x) \mapsto \varphi_\psi^{-1} \left(cl(\varphi_\psi(f)) \right)_e(x) \right) \\
 &= \left[cl(f) \cong \varphi_\psi^{-1} \left(cl(\varphi_\psi(f)) \right) \right].
 \end{aligned}$$

The observation given above and Definition 3.1 (1), imply the fact that

$$Cont(\varphi_\psi) = \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[cl(f) \cong \varphi_\psi^{-1} \left(cl(\varphi_\psi(f)) \right) \right]$$

as claimed.

Theorem 3.5. Let (X_1, \mathcal{C}^1) , (X_2, \mathcal{C}^2) be two L -soft cotopological spaces and φ_ψ , be a soft mapping which is defined from (X_1, \mathcal{C}^1) to (X_2, \mathcal{C}^2) . Then the following is satisfied.

$$Cont(\varphi_\psi) = \bigwedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[cl(\varphi_\psi^{-1}(g)) \cong \varphi_\psi^{-1}(cl(g)) \right].$$

Proof. By considering the soft mapping and fuzzy soft inclusion properties, we obtain the following implication

$$\begin{aligned}
 &\bigwedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[cl(\varphi_\psi^{-1}(g)) \cong \varphi_\psi^{-1}(cl(g)) \right] \\
 &\leq \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[cl(\varphi_\psi^{-1}(\varphi_\psi(f))) \cong \varphi_\psi^{-1} \left(cl(\varphi_\psi(f)) \right) \right] \\
 &\leq \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[cl(f) \cong \varphi_\psi^{-1} \left(cl(\varphi_\psi(f)) \right) \right] = Cont(\varphi_\psi), \text{ by Theorem 3.4.}
 \end{aligned}$$

In order to prove the converse implication, let us consider the following

$$\begin{aligned}
 &\left[cl(\varphi_\psi^{-1}(g)) \cong \varphi_\psi^{-1}(cl(g)) \right] = \bigwedge_{x \in X_1} \bigwedge_{e \in E_1} \left(cl(\varphi_\psi^{-1}(g))_e(x) \mapsto \varphi_\psi^{-1}(cl(g))_e(x) \right) \\
 &= \bigwedge_{x \in X_1} \bigwedge_{e \in E_1} \left(cl(\varphi_\psi^{-1}(g))_e(x) \mapsto cl(g)_{\psi(e)}(\varphi(x)) \right) \\
 &\geq \bigwedge_{y \in X_2} \bigwedge_{k \in E_2} \left(\bigvee_{y=\varphi(x)} \bigvee_{k=\psi(e)} cl(\varphi_\psi^{-1}(g))_e(x) \mapsto cl(g)_k(y) \right) \\
 &= \bigwedge_{y \in X_2} \bigwedge_{k \in E_2} \left(\varphi_\psi \left(cl(\varphi_\psi^{-1}(g)) \right)_k(y) \mapsto cl(g)_k(y) \right) \\
 &= \left[\varphi_\psi \left(cl(\varphi_\psi^{-1}(g)) \right) \cong cl(g) \right].
 \end{aligned}$$

By Theorem 3.3, this implies the fact that $\bigwedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[cl(\varphi_\psi^{-1}(g)) \cong \varphi_\psi^{-1}(cl(g)) \right] \geq Cont(\varphi_\psi)$.

This completes the proof.

Theorem 3.6. Let (X_1, \mathcal{C}^1) , (X_2, \mathcal{C}^2) and (X_3, \mathcal{C}^3) be the L -soft cotopological spaces. Then for the soft mappings $\varphi_\psi: (X_1, \mathcal{C}^1) \rightarrow (X_2, \mathcal{C}^2)$ and $\varphi_{\psi^*}: (X_2, \mathcal{C}^2) \rightarrow (X_3, \mathcal{C}^3)$, the following conditions are satisfied.

- (1) $Cont(\varphi_\psi) \wedge Cont(\varphi_{\psi^*}) \leq Cont(\varphi_{\psi^*} \circ \varphi_\psi)$.
- (2) $Close(\varphi_\psi) \wedge Close(\varphi_{\psi^*}) \leq Close(\varphi_{\psi^*} \circ \varphi_\psi)$.

Proof. We give only the proof of (1), since the second condition is proved by considering the similar observations.

$$\begin{aligned}
 & Cont(\varphi_\psi) \wedge Cont(\varphi_{\psi^*}^*) \\
 &= \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))] \wedge \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [\varphi_{\psi^*}^*(cl(g)) \cong cl(\varphi_{\psi^*}^*(g))] \\
 &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))] \wedge \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [cl(g) \cong (\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(cl(\varphi_{\psi^*}^*(g)))] \\
 &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left\{ [\varphi_\psi(cl(f)) \cong cl(\varphi_\psi(f))] \wedge [cl(\varphi_\psi(f)) \cong (\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(cl(\varphi_{\psi^*}^*(\varphi_\psi(f))))] \right\} \\
 &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_\psi(cl(f)) \cong (\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f)))] \\
 &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(cl(f)) \cong cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f))] \\
 &= Cont(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi).
 \end{aligned}$$

Theorem 3.7. Let $\varphi_\psi: (X_1, \mathcal{C}^1) \rightarrow (X_2, \mathcal{C}^2)$ and $\varphi_{\psi^*}^*: (X_2, \mathcal{C}^2) \rightarrow (X_3, \mathcal{C}^3)$ be two soft mappings between L -soft cotopological spaces, where $\varphi_{\psi^*}^*$ is injective. Then we have

$$Close(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi) \wedge Cont(\varphi_{\psi^*}^*) \leq Close(\varphi_\psi).$$

Proof. By the injectivity of the soft mapping $\varphi_{\psi^*}^*$, we have $(\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(\varphi_{\psi^*}^*(g)) = g$, for all $g \in (L^{X_2})^{E_2}$. Then from this fact, we gain the following implications

$$\begin{aligned}
 & Close(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi) \wedge Cont(\varphi_{\psi^*}^*) \\
 &= \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f)) \cong (\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(cl(f))] \wedge \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [\varphi_{\psi^*}^*(cl(g)) \cong cl(\varphi_{\psi^*}^*(g))] \\
 &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f)) \cong (\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(cl(f))] \wedge \\
 &\quad \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_{\psi^*}^*(cl(\varphi_\psi(f))) \cong cl(\varphi_{\psi^*}^*(\varphi_\psi(f)))] \\
 &= \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \{ [cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f)) \cong (\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(cl(f))] \wedge [\varphi_{\psi^*}^*(cl(\varphi_\psi(f))) \cong cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f))] \} \\
 &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [\varphi_{\psi^*}^*(cl(\varphi_\psi(f))) \cong (\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(cl(f))] \\
 &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl(\varphi_\psi(f)) \cong (\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(cl(f)))] \\
 &= \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl(\varphi_\psi(f)) \cong \varphi_\psi(cl(f))] = Close(\varphi_\psi).
 \end{aligned}$$

Hence, the proof is completed.

Theorem 3.8. Let $\varphi_\psi: (X_1, \mathcal{C}^1) \rightarrow (X_2, \mathcal{C}^2)$ and $\varphi_{\psi^*}^*: (X_2, \mathcal{C}^2) \rightarrow (X_3, \mathcal{C}^3)$ be two soft mappings between L -soft cotopological spaces, where φ_ψ is surjective. Then we have

$$Close(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi) \wedge Cont(\varphi_\psi) \leq Close(\varphi_{\psi^*}^*).$$

Proof. By the surjectivity of the soft mapping φ_ψ , we have $\varphi_\psi(\varphi_\psi^{-1}(g)) = g$, for all $g \in (L^{X_2})^{E_2}$. Then from this fact, we gain the following implications

$$\begin{aligned}
 & Close(\varphi_{\psi^*}^*) = \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [cl(\varphi_{\psi^*}^*(g)) \cong \varphi_{\psi^*}^*(cl(g))] \\
 &= \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [cl(\varphi_{\psi^*}^*(\varphi_\psi(\varphi_\psi^{-1}(g)))) \cong \varphi_{\psi^*}^*(cl(\varphi_\psi(\varphi_\psi^{-1}(g))))] \\
 &\geq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f)) \cong \varphi_{\psi^*}^*(cl(\varphi_\psi(f)))] \\
 &\geq \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} [cl(\varphi_{\psi^*}^*(g)) \cong \varphi_{\psi^*}^*(cl(g))] = Close(\varphi_{\psi^*}^*).
 \end{aligned}$$

This implies the following equality (*),

$$Close(\varphi_{\psi^*}^*) = \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} [cl((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_\psi)(f)) \cong \varphi_{\psi^*}^*(cl(\varphi_\psi(f)))] \tag{1}$$

We also have that

$$\begin{aligned}
 & \text{Close}(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi}) \wedge \text{Cont}(\varphi_{\psi}) \\
 &= \wedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\text{cl} \left((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f) \right) \cong (\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(\text{cl}(f)) \right] \wedge \wedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi}(\text{cl}(f)) \cong \text{cl} \left(\varphi_{\psi}(f) \right) \right] \\
 &\leq \wedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\text{cl} \left((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f) \right) \cong (\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(\text{cl}(f)) \right] \wedge \wedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\varphi_{\psi}(\text{cl}(f)) \right) \cong \varphi_{\psi^*}^* \left(\text{cl} \left(\varphi_{\psi}(f) \right) \right) \right] \\
 &\leq \wedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\text{cl} \left((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f) \right) \cong \varphi_{\psi^*}^* \left(\text{cl} \left(\varphi_{\psi}(f) \right) \right) \right] \quad (\text{From the equality (1)}) \\
 &= \wedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\text{cl} \left(\varphi_{\psi^*}^*(g) \right) \cong \varphi_{\psi^*}^*(\text{cl}(g)) \right] = \text{Close}(\varphi_{\psi^*}^*).
 \end{aligned}$$

Hence, the proof is completed.

The degree of continuity is computed not only for a soft mapping which is defined between L -soft cotopological spaces but also for a soft mapping which is defined between L -soft topological spaces. We mean that the degree to what extend the continuity of a soft mapping can also be defined by means of the interior operator. Analogously, the openness degree of a soft mapping is described in the following way.

Theorem 3.9. Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ be two L -soft topological spaces. Then the following is also true for the degree of continuity for the soft mapping $\varphi_{\psi}: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2)$

$$\text{Cont}(\varphi_{\psi}) = \bigwedge_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\varphi_{\psi}^{-1}(\text{int}(g)) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi}^{-1}(g) \right) \right]$$

Proof. The equivalence is obtained from Theorem 2.13 and Definition 3.1.

Definition 3.10. Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ be two L -soft topological spaces. Then the degree of openness for the soft mapping $\varphi_{\psi}: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2)$ is defined by

$$\text{Open}(\varphi_{\psi}) = \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi}(\text{int}(f)) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi}(f) \right) \right]$$

Remark 3.11. If $\text{Open}(\varphi_{\psi}) = 1_L$, then $\varphi_{\psi}(\text{int}(f)) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi}(f) \right)$ is valid for each $f \in (L^{X_1})^{E_1}$. This is exactly the equivalent form of the openness of a soft mapping defined between soft topological spaces.

Theorem 3.12. Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ and (X_3, τ^3) be L -soft topological spaces and $\varphi_{\psi}: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2), \varphi_{\psi^*}^*: (X_2, \tau^2) \rightarrow (X_3, \tau^3)$ be two soft mappings. The the following conditions are satisfied.

- (1) $\text{Cont}(\varphi_{\psi}) \wedge \text{Cont}(\varphi_{\psi^*}^*) \leq \text{Cont}(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})$.
- (2) $\text{Open}(\varphi_{\psi}) \wedge \text{Open}(\varphi_{\psi^*}^*) \leq \text{Open}(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})$.

Proof. One can see the proof similarly to that of Theorem 3.6.

Theorem 3.13. Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ and (X_3, τ^3) be L -soft topological spaces and $\varphi_{\psi}: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2), \varphi_{\psi^*}^*: (X_2, \tau^2) \rightarrow (X_3, \tau^3)$ be two soft mappings. If the soft mapping φ_{ψ} is surjective, then the following is obtained

$$\text{Open}(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi}) \wedge \text{Cont}(\varphi_{\psi}) \leq \text{Open}(\varphi_{\psi^*}^*).$$

Proof. Since the soft mapping φ_{ψ} is surjective, then $\varphi_{\psi} \left(\varphi_{\psi}^{-1}(g) \right) = g$, for each $g \in (L^{X_2})^{E_2}$. From this fact, we gain that

$$\begin{aligned}
 & \wedge_{h \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\varphi_{\psi^*}^*(\text{int}(h)) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi^*}^*(h) \right) \right] \\
 &= \wedge_{h \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int} \left(\varphi_{\psi} \left(\varphi_{\psi}^{-1}(h) \right) \right) \right) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi^*}^* \left(\varphi_{\psi} \left(\varphi_{\psi}^{-1}(h) \right) \right) \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\geq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int} \left(\varphi_{\psi} (f) \right) \right) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi^*}^* \left(\varphi_{\psi} (f) \right) \right) \right] \\ &\geq \Lambda_{h \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int} (h) \right) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi^*}^* (h) \right) \right] \end{aligned}$$

The above observation implies the following

$$\bigwedge_{h \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int} (h) \right) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi^*}^* (h) \right) \right] = \bigwedge_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int} \left(\varphi_{\psi} (f) \right) \right) \cong \text{int} \left(\varphi_{\psi^*}^* \left(\varphi_{\psi} (f) \right) \right) \right]$$

In order to get the proof, let us consider the above fact as follows:

$$\begin{aligned} &Open(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi}) \wedge Cont(\varphi_{\psi}) \\ &= \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(\text{int}(f)) \cong \text{int}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f)) \right] \wedge \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\varphi_{\psi}^{-1}(\text{int}(g)) \cong \text{int}(\varphi_{\psi}^{-1}(g)) \right] \\ &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(\text{int}(f)) \cong \text{int}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f)) \right] \\ &\wedge \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int}(\varphi_{\psi}(f)) \right) \cong (\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(\text{int}(f)) \right] \\ &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int}(\varphi_{\psi}(f)) \right) \cong \text{int}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f)) \right] \quad (\text{By the above equality}) \\ &= \Lambda_{g \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[\varphi_{\psi^*}^* \left(\text{int}(g) \right) \cong \text{int}(\varphi_{\psi^*}^*(g)) \right] = Open(\varphi_{\psi^*}^*). \end{aligned}$$

This completes the proof.

Theorem 3.14. Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ and (X_3, τ^3) be L -soft topological spaces and $\varphi_{\psi}: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2)$, $\varphi_{\psi^*}: (X_2, \tau^2) \rightarrow (X_3, \tau^3)$ be two soft mappings. If the soft mapping φ_{ψ^*} is injective, then we get the following

$$Open(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi}) \wedge Cont(\varphi_{\psi^*}^*) \leq Open(\varphi_{\psi}).$$

Proof. Since the soft mapping φ_{ψ^*} is injective, then $(\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(\varphi_{\psi^*}^*(g)) = g$, for each $g \in (L^{X_2})^{E_2}$. From this fact, it is seen that

$$\begin{aligned} &Open(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi}) \wedge Cont(\varphi_{\psi^*}^*) \\ &= \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(\text{int}(f)) \cong \text{int}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f)) \right] \\ &\wedge \Lambda_{h \in (L^{X_2})^{E_2}} \left[(\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(\text{int}(h)) \cong \text{int}((\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(h)) \right] \\ &\leq \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[(\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(\text{int}(f)) \cong (\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(\text{int}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f))) \right] \\ &\quad \wedge \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[(\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}(\text{int}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f))) \cong \text{int}((\varphi_{\psi^*}^*)^{-1}((\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})(f))) \right] \\ &= \Lambda_{f \in (L^{X_1})^{E_1}} \left[\varphi_{\psi}(\text{int}(f)) \cong \text{int}(\varphi_{\psi}(f)) \right] = Open(\varphi_{\psi}). \end{aligned}$$

This completes the proof.

Definition 3.15. Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ be two L -soft topological spaces and $\varphi_{\psi}: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2)$ be a bijective soft mapping. Then the degree $Hom(\varphi_{\psi})$ to which φ_{ψ} is a homeomorphism is defined by $Hom(\varphi_{\psi}) = Cont(\varphi_{\psi}) \wedge Open(\varphi_{\psi})$.

Under the light of the above discussions, one can infer the following results.

Corollary 3.16. Let $(X_1, \tau^1), (X_2, \tau^2)$ and (X_3, τ^3) be L -soft topological spaces and $\varphi_{\psi}: (X_1, \tau^1) \rightarrow (X_2, \tau^2)$, $\varphi_{\psi^*}: (X_2, \tau^2) \rightarrow (X_3, \tau^3)$ be two bijective soft mappings. Then the followings are satisfied.

- (1) $Hom(\varphi_{\psi}) \wedge Hom(\varphi_{\psi^*}^*) \leq Hom(\varphi_{\psi^*}^* \circ \varphi_{\psi})$.
- (2) $Hom(\varphi_{\psi}) = Cont(\varphi_{\psi}) \wedge Cont(\varphi_{\psi}^{-1}) = Cont(\varphi_{\psi}) \wedge Close(\varphi_{\psi})$.

4. Conclusion

4. Sonuç

In the present study, we proposed the gradation of continuity, closedness and openness for the soft mappings to some degrees. The perspective of gradation of the openness of sets, spaces and also mappings between some structured spaces yields researchers efficiently applications to the daily life modellings. Since (fuzzy) soft sets and (fuzzy) soft spaces are natural effective tools to reflect and model the real phenomena, we found it reasonable to investigate the degrees of soft mappings between graded soft topological spaces. For further research, we hope to investigate the relations and the properties of the graded soft mappings which are defined between compact, connected and separated soft topological spaces to some degrees. In addition, for future work, we aim to propose the parametric gradation of topological structures which are not defined so far, and the special mappings between the corresponding spaces such as graded mappings between soft bornological spaces, soft uniform spaces, soft proximity spaces and so on.

Acknowledgement

Teşekkür

We express our sincere to the referees for their careful reading and valuable comments.

Author contribution

Yazar katkısı

All authors contributed equally to this work. They all read and approved the last version of the manuscript.

Declaration of ethical code

Etik beyanı

The author of this article, declares that the material and the methods used in this study do not require ethical committee approval and/or special legal permission.

Conflicts of interest

Çıkar çatışması beyanı

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Kaynaklar

Ahmad, B., & Kharal, A. (2009). On fuzzy soft sets. *Advances in Fuzzy Systems*, 586507. <https://doi.org/10.1155/2009/586507>

Al-jarrah, H. H., Rawshdeh, A., & Al-shami, T. M. (2022). On soft compact and soft Lindelöf spaces via soft regular closed sets. *Afrika Matematika*, 33 (23) <https://doi.org/10.1007/s13370-021-00952-z>

Aygünoğlu, A., & Aygün, H. (2009). Introduction to fuzzy soft group. *Computers and Mathematics with Applications*, 58, 1279-1286. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.07.047>

Çetkin, V. (2014). Bulanık esnek topolojik yapılar [Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Çetkin, V., & Aygün, H. (2014). On fuzzy soft topogenous structure. *Journal of Intelligent and Fuzzy Ssystems*, 27, 247-255. <https://doi.org/10.3233/IFS-130993>

Çetkin, V., & Aygün, H. (2016). On L-soft merotopies. *Soft Computing*, 20, 4779-4790. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2037-x>

Çetkin, V. (2019). Parameterized degree of semi-precompactness in the fuzzy soft universe. *Journal of Intelligent and Fuzzy Ssystems*, 36, 3661–3670. <https://doi.org/10.3233/JIFS-181830>

Çetkin, V. (2022). Bornological spaces in the context of fuzzy soft sets. *Filomat*, 36(4), 1341-1350. <https://doi.org/10.2298/FIL2204341C>

Georgiou, D. N., Megaritis, A. C., & Petropoulos, V. I. (2013). On soft topological spaces, *Applied Mathematics and Information Sciences*, 7(5), 1889–1901. <https://doi.org/10.12785/amis/070527>

Gierz, G. et al., (1980). *A compendium of continuous lattices*, Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin.

Kharal, A., & Ahmad, B. (2009). Mappings on fuzzy soft classes. *Advances in Fuzzy Systems*, 407890. <https://doi.org/10.1155/2009/407890>

Kocinac, Lj.D.R., Al-shami, T., & Çetkin, V. (2021). Selection principles in the context of soft sets: Menger spaces. *Soft Computing*, 25, 12693-12702. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06069-6>

Liang, C.Y., & Shi, F. G. (2014). Degree of continuity for mappings of (L, M)-fuzzy topological spaces. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 27, 2665–2677. <https://doi.org/10.3233/IFS-141238>

Liu, Y. M., & Luo, M. K. (1997). *Fuzzy topology*, World Scientific Publication, Singapore.

Maji, P. K., Biswas, R., & Roy, A. R. (2001). Fuzzy soft sets. *Journal of Fuzzy Mathematics*, 9(3), 589-602.

- Molodtsov, D. (1999). Soft set theory-first results. *Computers and Mathematics with Applications*, 37 (4/5), 19-31.
- Pang, B. (2014). Degrees of continuous mappings, open mappings, and closed mappings in L-fuzzifying topological spaces. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 27, 805–816. <https://doi.org/10.3233/IFS-131038>
- Roy, A. R., & Maji, P. K. (2007). A fuzzy soft set theoretic approach to decision making problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 203, 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2006.04.008>
- Tanay, B., & Kandemir, M. B. (2011). Topological structure of fuzzy soft sets, *Computers and Mathematics with Applications*, 61, 2952-2957. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.03.056>
- Terepeta, M. (2019). On separating axioms and similarity of soft topological spaces. *Soft Computing*, 23, 1049-1057. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2824-z>
- Varol, B. P., & Aygün, H. (2012). Fuzzy soft topology. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 41 (3). 407–419.
- Xiu, Z., & Li, Q. (2019). Degrees of L-continuity for mappings between L-topological spaces. *Mathematics*, 7, 1013; <https://doi.org/10.3390/math7111013>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Ionic and covalent immobilization of glucose isomerase of thermophilic *Anoxybacillus gonensis* on DEAE-sepharose

Termofilik Anoxybacillus gonensis glukoz izomerazının DEAE-Sefaroz üzerine iyonik ve kovalent immobilizasyonu

Züleyha AKPINAR^{1,a}, Merve KIZAKLI YILDIRIM^{1, b}, Hakan KARAOĞLU^{*1,c}

¹Recep Tayyip Erdoğan University, Faculty of Fisheries and Aquatic Sciences, Department of Basic Sciences, 53100, Rize

• Geliş tarihi / Received: 26.11.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 25.03.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 19.04.2022

Abstract

High fructose corn syrup (HFCS), which is produced by the conversion of one sugar into another (glucose to fructose), has a marketing value. Hence, different glucose isomerases [(GI) (D-xylose ketol isomerase, EC 5.3.1.5)] isolated from different sources (macro- and microorganisms) were researched until today. In addition, the cost reduction of GI production for industrial applications has been investigated and applied with different techniques. Enzyme immobilization approaches have prominent features because they allow enzymes to be used repeatedly. In the current study, *Anoxybacillus gonensis* G2T glucose isomerase (AgoGI) (wild type) were immobilized with ionic and covalent binding on DEAE-sepharose matrix. Afterward, kinetic and biochemical parameters of the immobilized enzymes were evaluated. The pH and temperature parameters, in which the ionic and covalent immobilized enzymes showed the best activity, were determined as 6.50 and 85 °C, respectively. The kinetic data (Vmax and Km) of ionic bound AgoGI on DEAE-sepharose were 4.85±2.09 µmol/min/mg protein and 130,57±5,42 mM, as covalent immobilized AgoGI on the same matrix were 40.51± 0.81 µmol/min/mg protein µmol/min and 127,28±2,96 mM, respectively. Consequently, the usage of DEAE-sepharose for both covalent and ionic immobilization as immobilization matrix did not exhibit any negative effects on biochemical and kinetic parameters of glucose isomerase. Therefore, immobilized AgoGI on DEAE-sepharose was an excellent and promising tool for HFCS production.

Keywords: *Anoxybacillus gonensis*, DEAE-sepharose, Glucose isomerase, HFCS, Immobilization

Öz

Bir şekerin diğerine (glukozun fruktoza) dönüştürülmesiyle üretilen yüksek fruktozlu mısır şurubu (HFCS), pazarlama değerine sahiptir. Bu nedenle günümüze kadar farklı kaynaklardan (makro ve mikroorganizmalar) izole edilen farklı glukoz izomerazlar [(GI) (D-ksiloz ketol izomeraz, EC 5.3.1.5)] araştırılmıştır. Ayrıca endüstriyel uygulamalar için GI üretiminin maliyetinin düşürülmesi araştırılmış ve bunun için farklı teknikler uygulanmıştır. Enzim immobilizasyon yaklaşımları, enzimlerin tekrar tekrar kullanılmasına izin verdiği için öne çıkan özelliklere sahiptir. Bu çalışmada *Anoxybacillus gonensis* G2T (AgoGI) yabani tip enzimlerinin DEAE-sefaroz matriksi üzerinde immobilizasyonu (iyonik ve kovalent) gerçekleştirildi. Çalışmanın bir sonraki aşamasında elde edilen enzimlerin kinetik ve biyokimyasal özellikleri belirlendi. Immobilize enzimler için optimum sıcaklık ve pH değerleri sırasıyla 85 °C ve 6.50 olarak belirlendi. DEAE-sefaroz üzerinde iyonik bağlı AgoGI'nin kinetik verileri (Vmax ve Km) 4.85±2.09 µmol/dk/mg protein ve 130,57±5,42 mM, aynı matris üzerinde kovalent immobilize AgoGI 40.51± 0.81 µmol/dk/mg protein ve 127,28±2,96 mM'dır. Sonuç olarak, DEAE-sefarozun hem kovalent hem iyonik immobilizasyon için immobilizasyon matriksi olarak kullanılması, glukoz izomerazın biyokimyasal ve kinetik parametreleri üzerinde herhangi bir olumsuz etki göstermedi. Bu nedenle, DEAE-sefaroz üzerinde immobilize edilmiş AgoGI HFCS üretimi için mükemmel ve umut verici bir araçtır.

Anahtar kelimeler: *Anoxybacillus gonensis*, DEAE-sefaroz, Glukoz izomeraz, HFCS, Immobilizasyon

*c Hakan KARAOĞLU; hakan.karaoglu@erdogan.edu.tr; Tel: (0535) 595 722 48; 0000-0003-4615-1157

^a orcid.org/0000-003-0102-6651

^b orcid.org/0000-0002-2040-3881

1. Introduction

1. Giriş

Xylose isomerase (D-xylose ketol-isomerase E.C 5.3.1.5) (XI) catalyzes the conversion of D-xylose to D-xylulose (Bhosale et al., 1996; Yanmis et al., 2014). XI is a key enzyme for the process of bioethanol production. The enzyme is also called glucose isomerase (GI) because of its ability to convert glucose to fructose (Jin et al., 2017). GI is an important enzyme for food industry because of its necessity and utilization in high-fructose corn syrup (HFCS) production processes (Bandlish et al., 2002; Mbagwu et al., 2018; Nguyen & Tran, 2018). HFCS is a mixture containing an equal amount of fructose and glucose, which is 1.3 fold sweeter and cheaper compound than saccharose (Jin et al., 2017; Tükel & Alagöz, 2008). D-fructose exhibits no effect on the glucose concentration of blood, as it is absorbed gradually. Therefore, D-fructose and HFCS including fructose and glucose is good sweetener choice for diabetics (Bhosale et al., 1996; Parker et al., 2010). According to the literature, it is thought that the isomerization by GI at high temperature and lower pH is better to fulfill the desired content of fructose in the syrup production as reaction equilibrium is a shift to fructose in the isomerization reaction (Hartley et al., 2000; Neifar et al., 2019). In addition, GI is preferred due to its ability to be used recursively in industrial applications. For this purpose, there have been many researches about immobilization of GI on the different matrix by different methods (Chen, 2010; Ge et al., 1998; Demirel et al., 2006; Rhimi et al., 2007; Tumturk et al., 2007; Illeova & Polakovic, 2018). The enzyme immobilization is a widely-used method to achieve enzyme usage in a cost-effective manner (Bashir et al., 2020). Enzyme immobilization is a method particularly designed to limit the enzyme movement by making the enzyme physically confined in a matrix or linked to a matrix. By this means, the enzymes are supported by the matrix used in the immobilization process, and therefore the enzymes are not released into the solution (Hassan et al., 2016). According to the previous studies, an ideal matrix should have some properties including physical strength, renewability, stability, inertness, non-specific adsorption, being affordable, etc. (Datta et al., 2013). Some of the frequently used matrices are alginate (Flores-Maltos et al., 2011), chitosan and chitin (Chang & Juang, 2007), cellulose (Klein et al. 2011), gelatin (Shen et al., 2011), starch (Raafat et al., 2011). Among them ion exchange polymers such as DEAE-cellulose and DEAE-sephadex have been preferred because of having renewable

matrices with large surface area (Datta et al., 2013). A good deal of methods has been described for the immobilization of enzymes such as covalent bonding, adsorption, cross linking, entrapment, and encapsulation (Elnashar et al., 2014; Hassan et al., 2016; Marwa et al., 2020). In our previous study, the new GI gene of *Anoxybacillus gonensis* G2^T (AgoG2GI) was revealed, cloned into the expression vector. Then, the gene product was expressed, purified, and biochemically characterized (Karaoglu et al., 2013). The data of that mentioned research revealed that AgoG2GI had promising advantages including high catalytic activity (k_{cat}/K_m) high V_{max} and low K_m values for glucose, therefore, AgoG2GI seems to be a potential candidate enzyme compared to its counterpart used in the industry application. Taking into account these excellent properties of AgoG2GI, immobilization of this enzyme was investigated. In accordance with this purpose, we have performed ionic and covalent binding of *Anoxybacillus gonensis* G2^T enzyme (wild type) on DEAE-sepharose matrix. Afterwards, parameters as kinetic and biochemical of immobilized enzymes were evaluated.

2. Material and method

2. Materyal ve metot

2.1. Chemicals

2.1. Kimyasallar

The chemicals used in the current study were reagent grade and supplied from a variety of commercial companies (Merck, Sigma, Fluka, Acumedia and Aldrich).

2.2. Production of GI

2.2. GI'nin üretilmesi

In one of our previous studies, GI of *A. gonensis* G2^T (NCIMB 13933^T) was cloned into pET28a⁺ expression vector named pETG2GI (Karaoglu et al., 2013). In this study, the recombinant pETG2GI plasmid was transformed to *E. coli* BL21(DE) strains by standard calcium chloride transformation protocol (Bor et al., 1992; Karaoglu et al., 2013). To prepare pre-bacterial culture, the colonies containing pETG2GI were incubated at 37 °C in 10 mL of Luria-Bertani (LB) broth with kanamycin (0,05 mg/mL). After incubation, the new fresh bacterial culture was prepared as 0.1 optical density (OD₆₀₀) from pre-bacterial culture and was incubated under same conditions. As the OD of the bacterial culture came up to 0.8, 1 mM iso-propyl-d-thiogalactopyranoside (IPTG) was added to the medium to induce gene expression. The bacterial

culture was incubated for 4 h and then centrifuged at 11.000 rpm for 10 min. After removing supernatant, the harvested cells were solubilized in 50 mM of MOPS buffer and disrupted by a sonicator (0.6 cycle scale, 80% amplitude). The cell debris was removed by centrifugation (at 15.200 rpm for 15 min) of the extract and the supernatant was used as the crude extract (Karaoglu et al., 2013; Yanmis et al., 2014).

2.3. Purification of AgoGI

2.3 AgoGI'nin üretilmesi

2.3.1. Colon chromatography

2.3.1.1. Kolon kromatografisi

After the partial purification of crude extract by heat-shock application, the colon chromatographies (ion exchange and hydrophobic interaction) were applied for further purification (Karaoglu et al., 2013). The purification assays were performed using a Biologic Lp System (Bio-Rad) instrument. All the chromatography studies were performed by using a chromatography column (1.5×30 cm) at flow rate of 1 mL/min. The fractions were collected in a volume of 3 mL and the fractions having GI activity were collected. The collected fractions from both of the chromatography steps were used to determine GI activity, total protein concentration, and the volume to prepare the purification table. In order to calculate GI activity, the obtained fraction was diluted 5 times. One Unit of GI activity was defined as the amount of enzyme that released 1 µmol of fructose/minute under the reaction conditions.

i) Ion exchange chromatography (IEC)

i) İon değişim kromatografisi

DEAE-sepharose fast flow was used as column material for IEC. The soluble fraction obtained from heat-shock application was loaded on a column of DEAE-sepharose pre-equilibrated with reaction buffer (100 mM MOPS, pH 6.5, containing 1 mM CoCl₂ and 10 mM MgSO₄). The column was eluted with a linear gradient of (0–0.5 M) NaCl in the same buffer.

ii) Hydrophobic interaction colon chromatography (HIC)

ii) Hidrofobik etkileşim kolon kromatografisi

Phenyl-sepharose fast flow (Sigma) was used as the column material for HIC. At first, the column of phenyl-sepharose-6 (Sigma) was equilibrated with reaction buffer containing 1.3 M (NH₄)SO₄. The fractions obtained from IEC were saturated

with ammonium sulfate solution to give its final concentration of 1.3 M (NH₄)SO₄ and loaded on the column. Then, the column was eluted with a 100 mL linear gradient of 1.3–0 M (NH₄)SO₄ (Yanmis et al., 2014). The fractions with GI activity were collected and used for immobilization applications.

2.4. Covalent and ionic immobilization of GI

2.5. GI'nin kovalent ve iyonik immobilizasyonu

8000 µL DEAE-sepharose matrix was cleaned by washing 10 times with distilled water and equilibrated by washing 10 times with reaction buffer. After the excess reaction buffer was removed, 2.5 % glutaraldehyde [prepared in 100 mM MOPS buffer solution (pH 7.0)] was added to the mixture of matrix and the reaction buffer and incubated for 2 h at room temperature. Then, excess glutaraldehyde was removed by washing it 10 times with reaction buffer. After washing process, 4000 µL GI of *A. gonensis* (AgoGI) was incubated with glutaraldehyde-treated DEAE-sepharose matrix at room temperature for 16 h to perform covalent immobilization. Immobilized enzymes were stored +4 °C for further studies. Ionic immobilization of AgoGI on DEAE-sepharose matrix was performed according to the same procedure of covalent immobilization except adding glutaraldehyde (Singh et al., 2014).

2.5. Activity assay of immobilized GI

2.5 Immobilize GI'nin aktivite deneyleri

Glucose isomerase activity was measured by incubating 250 µL of the reaction mixture (0.2 M glucose and the enzyme) at 85 °C for 30 min. The reactions were stopped by incubating on ice. The enzyme reaction was measured by the cysteine–carbazole–sulphuric acid method. 40 µL of 1.5 % cysteine hydrochloride, 40 µL of 0.12 % carnosol and 1.2 mL of 70 % sulphuric acid were added into 100 µL of the reaction mixture. The activity of enzyme was spectrophotometrically measured at 560 nm absorbance for fructose. One unit of activity was defined as the amount of enzyme that released 1 µmol of fructose per minute under the reaction conditions (Karaoglu et al., 2013).

2.6. Determination of protein concentration

2.6. Protein konsantrasyonunun belirlenmesi

At all the purification steps, protein concentrations of the examples were measured by Bradford's method (1976). Bovine serum albumin (BSA) was the standard for the procedure (Bradford, 1976).

2.7. Effects of temperature and pH on immobilized GI's

2.7. Sıcaklık ve PH'nin immobilize GI'lar üzerine etkileri

To calculate optimum temperature and pH, the reaction series were carried out between 30 °C and 100 °C and between pH 5.0 and pH 10.0 in suitable buffers [(sodium acetate (pH 5.0–6.0), potassium phosphate (pH 6.0–7.0), Tris–HCl (pH 7.0–9.0), and glycine–NaOH buffer (pH 9.0–10.0)] as described in the activity assay, respectively (Karaoglu et al., 2013; Yanmis et al., 2014).

2.8. Determination of kinetic parameters of immobilized GI's

2.8. İmmobilize GI'ların kinetik parametrelerinin belirlenmesi

The kinetic parameters of the enzymes were calculated, due to a serial reaction performed at 85 °C and pH 6.50 by increasing the glucose concentration from 0 mM to 700 mM. The kinetic parameters V_{max} ($\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$), K_m (Michaelis-Menten constant, mM) were calculated from Michaelis–Menten plots by the OriginPro8.1 program (OriginLab Data Analysis and Graphing Software) (Karaoglu et al., 2013).

2.9. Reuse capability and storage stability of GI's

2.9. GI'ların tekrar kullanım kapasitesi ve depolama stabilitesi

Immobilized GI was used repeatedly to evaluate the enzyme capacity for reuse according the method described by Yu et al (2011). Immobilized enzymes were used 10-15 times and GI activity was measured with the carbazole–sulphuric acid method with the procedure (Karaoglu et al., 2013). After each usage, the immobilized enzymes were cleaned with 50 mM MOPS buffer (pH 6.50). Both of ionic immobilized enzyme and covalent immobilized enzyme were stored at 4 °C in 50 mM MOPS buffer (pH 6.50). The enzyme activities were determined every other day. Storage stability experiments were performed for 10 weeks (Yu et al., 2011).

3. Results and discussion

3. Sonuçlar ve tartışma

3.1. Purification of AgoGI

3.1. AgoGI'nin üretilmesi

In the current study, glucose isomerase from *A. gonensis* was produced by pET28a+/E. coli BL21(DE3) expression system and was successfully purified with heat shock application, ion-exchange, and hydrophobic column chromatography techniques. Biochemical parameters of purification steps are given in Table 1 and the SDS-PAGE image of the purifications steps is exhibited in Figure 1. The specific activity of the enzyme increased from 9.615 to 26.720 $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein, while the enzyme was purified 2.78 fold with 60 % yield at the end of the purification steps (Table 1).

Table 1. Purification Table for AgoGI

Tablo 1. AgoGI'nin saflaştırma tablosu

Purification Steps	Total Volume (ml)	Protein (mg/ml)	Total Protein (mg)	Activity ($\mu\text{mol}/\text{dk}/\mu\text{l}$)	Total Activity ($\mu\text{mol}/\text{dk}$)	Specific Activity ($\mu\text{mol}/\text{dk}/\text{mg}$ protein)	Yield	Fold
CE	16.3	9.36	152.57	0.090	1467.00	9.615	100	1
HSA	15.1	4.87	73.58	0.090	1359.00	18.471	92.6	1.92
IEC	16.5	2.60	42.91	0.066	1089.00	25.376	74.2	2.64
HIC	20	1.65	32.93	0.044	880.00	26.720	60.0	2.78

CE: Cell Extract, HSA: Heat-shock application, IEC: ion exchange colon chromatography, HIC: Hydrophobic interaction colon chromatography

3.2. Covalent and ionic immobilization of GI

3.2. GI'nin kovalent ve iyonik olarak immobilizasyonu

Ion-exchange material has been widely used for protein purification since twentieth century. Recently, Ion-exchange material such as DEAE-sepharose has been studied for enzyme immobilization. Since, the usage of DEAE-sepharose is simpler exceptionally simpler when

compared to other matrices. It basically involves electrostatic/ionic interactions of weak nature between protein and resin. These weak interactions generate minimal conformational changes, improving enzyme chemical and physical stabilities, and increases specificity, enzyme selectivity, and catalytic activities (Vaz & Filho, 2019). Therefore, in this study, DEAE-sepharose was preferred for immobilization process. The purified enzyme was separately immobilized

covalent and ionic on DEAE-sepharose matrix. After immobilization processes, the enzyme activities and the protein amounts were calculated for both of the liquid remained on the matrix (nonbinding enzyme) and immobilized enzymes. It was concluded that all enzymes were immobilized on the matrix because of the absence of GI activity and protein in the liquid. The total protein and unit

amount of the immobilized enzymes are given in Table 2. The total amount of enzyme added for covalent immobilization was 37.33 U, as the amount of enzyme added for ionic immobilization was 36.83 U. The enzymes were immobilized in the rate of 99.5 % and 99.2 % by covalent and ionic immobilization, respectively (Table 2).

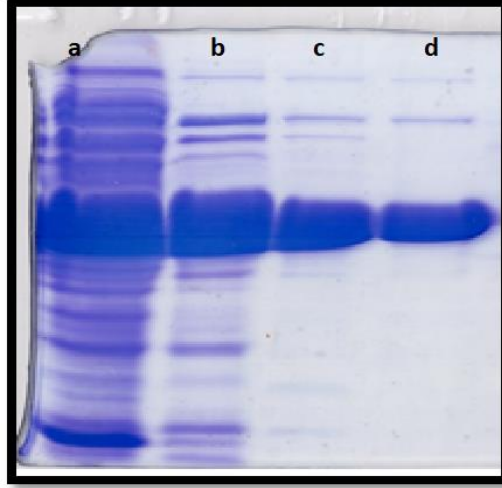


Figure 1. The SDS-PAGE imagination of purified wild-type GI for every purification steps. (a: Cell extract, b: Heat-shock application c: Ion-exchange chromatography, d: Hydrophobic-interaction chromatography)

Şekil 1. Saflaştırılan yaban tip GI için saflaştırma bas....amaklarına ait SDS-PAGE analizi (a: Kaba ekstrakt, b: Sıcak şoku uygulaması, c: İyon değişim kromatografisi, d: Hidrofobik etkileşim kromatografisi)

Table 2. Total unit of immobilized enzymes

Tablo 2. İmmobilize enzimlerin total protein ve ünite miktarları

	Unite($\mu\text{mol/dk}$)
Total amount of AgoGI added for covalent immobilization	37.33
The amount of AgoGI added for ionic immobilization	36.83
Unit amount of AgoGI covalent attached to the matrix	37.14
Unit amount of AgoGI that ionic binds to the matrix	36.54

AgoGI: glucose isomerase of *Anoxybacillus gonensis* G2^T

3.3. Temperature and pH effects on immobilized GI's

3.3. Sıcaklık ve pH'nın immobilize GI'lar üzerine etkileri

In addition, in this study, biochemical parameters of the immobilized enzymes were determined. The best temperature for the immobilized enzymes were determined as 85 °C (Fig 2). According to the report of Karaoglu et al. (2013), the optimum temperature of recombinantly produced *A. gonensis* GI was found to be 85 °C (Karaoglu et al., 2013). In this case, the optimum temperatures of immobilized enzymes and free enzyme are same. It is clear that immobilization applications cause no differences on the optimum temperatures. In this study, the maximum pH values of the immobilized enzymes were found to be 6.50 (Fig 3). Similarly,

according to the study performed by Karaoglu et al. (2013), the optimum pH value of free enzyme was 6.50. After immobilization of the enzymes on any matrix, different changes can occur on the surface of enzyme because of the different charge distribution of the matrix surface and the interaction of the enzyme with the matrix. These changes can cause differences between the optimum pH values of the immobilized enzymes and the free enzymes. In this study, immobilizations of the enzyme did not cause any changes in the optimum pH value. The obtained results indicated that the interaction between enzyme and DEAE-sepharose in both immobilization techniques did not generate significant conformational changes on AgoGI. According to the literature, the matrices with ion-exchange material such as DEAE produce a

minimal conformational changes (Vaz & Filho, 2019). Besides, there are many immobilization researches for GI, that the free and immobilized enzymes exhibited the same optimum pH and

temperature (Han & Juan 2000; Tunturk et al., 2007; Demirel et al., 2006). The results of optimum parameters were supported with previous studies.

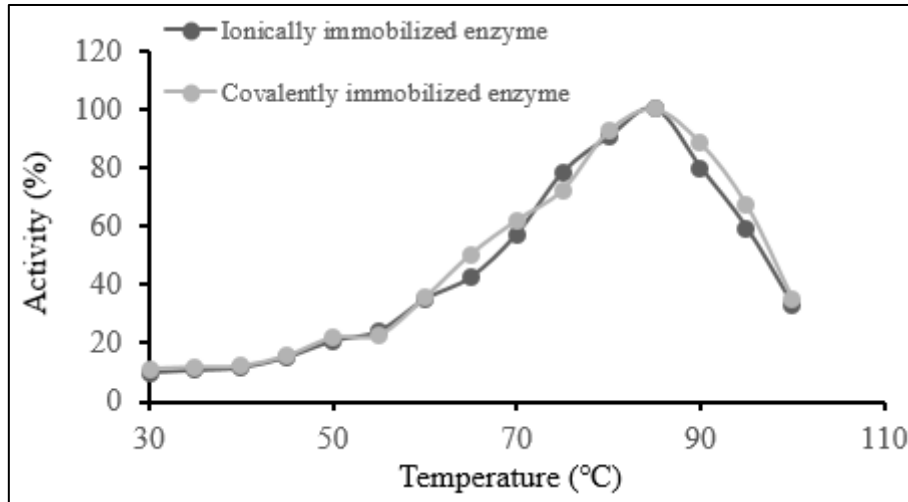


Figure 2. Temperature effect on immobilized AgoGI activity
Şekil 2. İmmobilize AgoGI'nin aktivitesine sıcaklığın etkisi

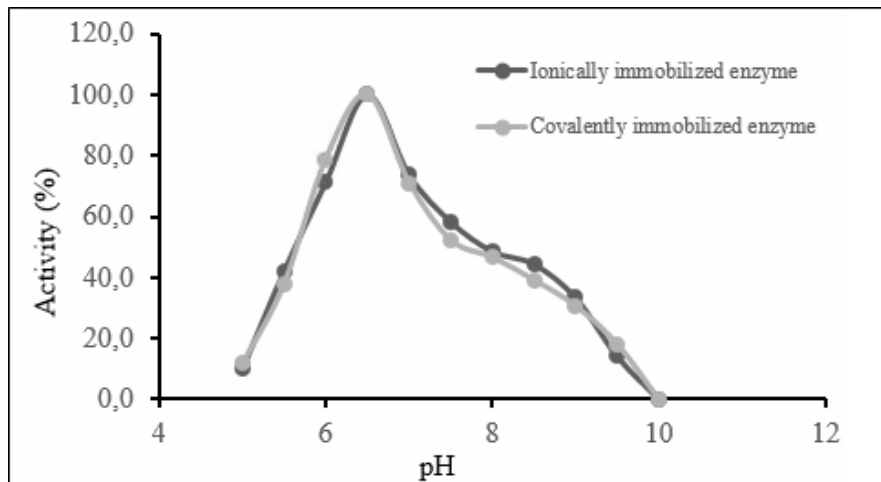


Figure 3. pH effect on immobilized AgoGI activity
Şekil 3. İmmobilize AgoGI'nin aktivitesine pH'nun etkisi

3.4. Kinetic parameters of immobilized GI's

3.4. İmmobilize GI'ların kinetik parametreleri

The K_m values and V_{max} values of the ionic immobilized and covalent immobilized enzyme were determined as 130.57 ± 5.42 mM, 44.85 ± 2.09 $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein and 127.28 ± 2.96 mM, 40.51 ± 0.81 $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein, respectively. The Michaelis-Menten curves drawn with the origin program are shown in Fig 4. K_m and V_{max} values of the free enzyme (wild type) were found as 138.37 mM and 40.51 $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein in our previous study (Karaoglu et al., 2013). Immobilization of enzymes often causes changes in the K_m and V_{max} values of the enzymes. However, a

significant change in the kinetic parameters of the immobilized enzymes did not occur. In other words, ionic and covalent immobilization of AgoGI has been achieved on DEAE-sepharose matrix without any significant change in kinetic parameters compared to its free counterpart (Table 3). According to the literature, K_m and V_{max} values generally exhibited differences for immobilized enzyme and free enzyme (Han & Juan 2000; Tunturk et al., 2007; Demirel et al., 2006). The results of kinetic parameters were not compatible with the literature. It could be explained with being use DEAE-sepharose for immobilization which generated insignificant changes in the structure of GI.

Table 3. Comparison of enzymes in terms of kinetic parameters**Tablo 3.** Enzimlerin kinetik parametrelerinin karşılaştırılması

Glucose Isomerase	K_m (mM)	V_{max} ($\mu\text{mol/dk/mg protein}$)	Reference
AgoG2GI-wt	146.08 \pm 9.50	43.72 \pm 1.01	Karaoğlu (2013)
AgoG2GI-rec	138.37 \pm 7.63	40.51 \pm 0.81	Karaoğlu (2013)
IIAgoGI	130.57 \pm 5.42	44.85 \pm 2.09	In this study
CIAgoGI	127.28 \pm 2.96	41.26 \pm 1.97	In this study

AgoG2GI-wt: *Anoxybacillus gonensis* G2^T glucose isomerase-wild type, AgoG2GI-rec: *Anoxybacillus gonensis* G2^T glucose isomerase recombinant, IIAgoGI: ionic immobilized *Anoxybacillus gonensis* G2^T glucose isomerase, CIAgoGI: covalent immobilized *Anoxybacillus gonensis* G2^T glucose isomerase

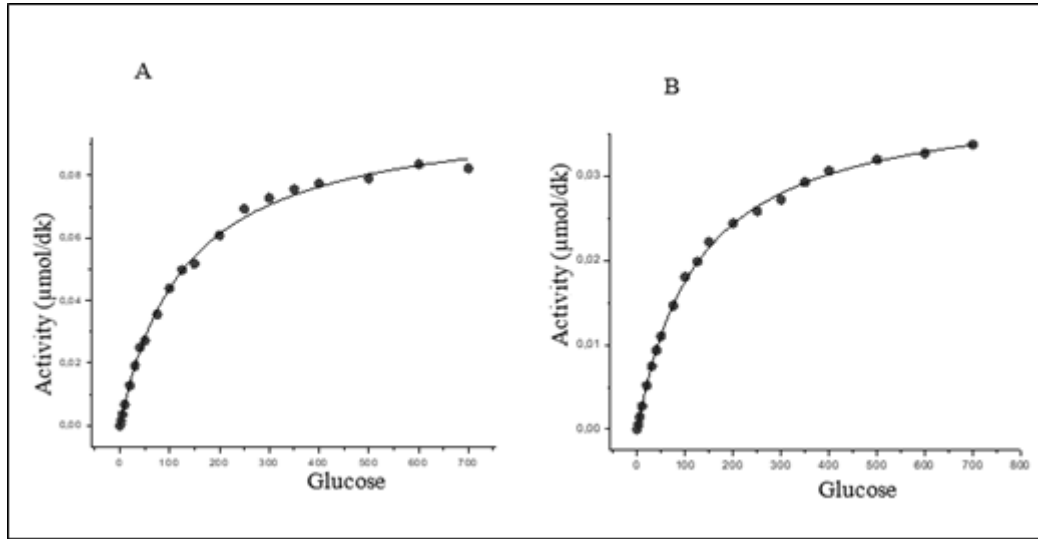


Figure 4. The Michaelis-Menten curves for immobilized enzymes (A: Ionic immobilized enzyme, B: Covalent immobilized enzyme)

Şekil 4. İmmobilize enzimlere ait Michaelis-Menten eğrisi enzimler (A: İyonik immobilize enzim, B: Kovalent immobilize enzim)

3.5. Reuse Capability and Storage Stability of GI

3.5. GI'nin tekrar kullanım kapasitesi ve depolama stabilitesi

Immobilized enzymes were used repeatedly to determine reuse capability. Ionic immobilized enzyme lost 50 % activity in its 5th utilization, while covalent immobilized enzyme lost 50 % activity in its 10th utilization. To determine of storage stability of immobilized GIs were incubated at + 4 °C. Both free enzyme and immobilized enzymes did not lose activity even after 75 days at + 4 °C.

4. Conclusion

4. Sonuç

Recombinant glucose isomerase of *Anoxybacillus gonensis* G2^T was effectively immobilized on DEAE-sepharose matrix by using covalent and ionic immobilization methods. The covalent and ionic immobilization did not exhibit a significant change in the values of biochemical and kinetic

parameters because of electrostatic/ionic interactions of weak nature between protein and matrix. Therefore, DEAE-sepharose is a good candidate to be used for GI immobilization in industrial applications. However, covalent immobilization of glucose isomerase on DEAE-sepharose was more efficient than ionic immobilization and had a great potential to be used for immobilization of glucose isomerase.

Acknowledgments

Teşekkür

This study was supported by Recep Tayyip Erdogan University [project no: 2014.103.01.03].

Author contribution

Yazar katkısı

Experiment performance (cloning of gene, expression and purification of protein, enzyme immobilization, and enzyme characterization) were performed by Zuleyha AKPINAR. Merve

KIZAKLI YILDIRIM was helped during the characterization of immobilized enzymes. Hakan KARAOGLU organized all the steps of the study, wrote the manuscript and performed revision of manuscript.

Declaration of ethical code

Etik beyanı

The authors declare that all of the rules stated to be followed within the scope of the “Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive” were followed, and none of the actions specified under the title of “Actions Contrary to Scientific Research and Publication Ethics” have been taken.

Conflict of interest

Çıkar çatışması beyanı

All authors declared that there is no conflict of interest.

References

Kaynaklar

- Bandlish, R.K., Hess, J.M., Epting, K.L., & Vieille, C. (2002). Glucose to fructose conversion at high temperatures with xylose (glucose) isomerases from *Streptomyces murinus* and to hyperthermophilic *Thermotoga* species. *Biotechnology and Bioengineering*, 80(2), 185-194. <http://dx.doi.org/10.1002/bit.10362>.
- Bashir, N., Sood, M., & Bandral, J.D. (2020). Enzyme immobilization and its applications in food processing: a review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(2), 254-261. <http://dx.doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2d.8779>.
- Bhosale, S.H., Rao, M.B., & Deshpande, V.V. (1996). Molecular and industrial aspects of glucose isomerase. *Microbiological Reviews*, 60(2), 280-300. <https://doi.org/10.1128/mr.60.2.280-300.1996>.
- Bor, Y.C., Moraes, C., Lee, S.P., Crosby, W.L., Sinskey, A.J., & Batt, C.A. (1992). Cloning and sequencing the *Lactobacillus brevis* gene encoding xylose isomerase. *Gene*, 114(1), 127-132. [https://doi.org/10.1016/0378-1119\(92\)90718-5](https://doi.org/10.1016/0378-1119(92)90718-5).
- Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254. <http://dx.doi.org/10.1006/abio.1976.9999>.
- Chang, M.Y., & Juang, R.S. (2007) Use of chitosan-clay composite as immobilization support for improved activity and stability of bglucosidase. *Biochemical Engineering Journal*, 35(1), 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.01.003>.
- Chen, L.F., Gong, C.S., & Tsao, T. (2010). Immobilized glucose isomerase on DEAE cellulose beads. *Starch Stärke*, 33(2), 58-63. <https://doi.org/10.1002/star.19810330207>.
- Datta, S., Christena, L.R., Rani, Y., & Rajaram, S. (1976). Enzyme immobilization: an overview on techniques and support materials. *3 Biotech*, 3, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1007/s13205-012-0071-7>.
- Demirel, G., Ozcetin, G., Sahin, F., Tunturk, H., Aksoy, S., & Hasirci, N. (2006). Semi-interpenetrating polymer networks (IPNs) for entrapment of glucose isomerase. *Reactive and Functional Polymers*, 66(4), 389-394. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2005.08.015>.
- Elnashar, M.M.M., Wahba, M.I., Amin, M.A., & Eldiwany, A.I. (2014) Application of Plackett-Burman screening design to the modeling of grafted alginate-carrageenan beads for the immobilization of penicillinG-acylase. *Journal of Applied Polymers Science*, 131 (11): 40295. <https://doi.org/10.1002/app.40295>.
- Flores-Maltos, A., Rodríguez-Durán, L.V., Renovato, J., Contreras, J.C., Rodríguez, R., & Aguilar, C.N. (2011) Catalytical properties of free and immobilized *Aspergillus niger* tannase. *Enzyme Research*. 2011, 1-6. <https://doi.org/10.4061/2011/768183>.
- Ge, Y.B., Zhou, H., Kong, W., Tong, Y., Wang, S.Y.i & L.W. (1998). Immobilization of glucose isomerase and its application in continuous production of high fructose syrup. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 69, 17-29. <https://doi.org/10.1007/BF02786018>.
- Han, S.L., & Juan, H. (2000). Kinetics of glucose isomerization to fructose by immobilized glucose isomerase: anomeric reactivity of D-glucose in kinetic model. *Journal of Biotechnology*, 84(2), 145-153. [https://doi.org/10.1016/S01681656\(00\)00354-0](https://doi.org/10.1016/S01681656(00)00354-0).
- Hartley, B.S., Hanlon, N., Jackson, R.J., & Rangarajan, M. (2000). Glucose isomerase: insights into protein engineering for increased thermostability. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure and Molecular Enzymology*, 1543(2), 294-335. [https://doi.org/10.1016/s0167-4838\(00\)00246-6](https://doi.org/10.1016/s0167-4838(00)00246-6).
- Hassan, M., Tamer, T., & Omer, A. (2016). Methods of enzyme immobilization. *International Journal*

- Current Pharmaceutical Research, 7(6), 385-392. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.08.002>.
- Illeova, V., & Polakovic, M. (2018). Design of operational temperature for immobilized glucose isomerase using an accelerated inactivation method. *Acta Chimica Slovaca*, 11(2), 157-162. <https://doi.org/10.2478/acs-2018-0022>.
- Jin, L.Q., Xu, Q., Liu, Z.Q., Jia, D.X., Liao, C.J., Chen, D.S., & Zheng, Y.G. (2017). Immobilization of recombinant glucose isomerase for efficient production of high fructose corn syrup. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 183, 293-306. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2445-0>.
- Karaoglu, H., Yanmis, D., Sal, F.A., Celik, A., Canakci, S., & Belduz, A.O. (2013). Biochemical characterization of a novel glucose isomerase from *Anoxybacillus gonensis* G2T that displays a high level of activity and thermal stability. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 97, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2013.08.019>.
- Klein, M.P., Scheeren, C.W., Lorenzoni, A.S.G., Dupont, J., & Frazzon, Hertz, P.F. (2011). Ionic liquid-cellulose film for enzyme immobilization. *Process Biochemistry*, 46(6), 1375-1379. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.02.021>.
- Marwa, I.W., Mohamed, E.H., & Korany, A.A. (2021). Chitosan-glutaraldehyde activated carrageenan-alginate beads for β -D-galactosidase covalent immobilization. *Biocatalysis and Biotransformation*, 39(2), 138-151. <https://doi.org/10.1080/10242422.2020.1832476>.
- Mbagwu, M.C., Egong, E.J., & Akan, O.D. (2018). Production, characterization and optimal performance studies of glucose isomerase by *Achromobacter xylooxidans* mck-4 isolated from starch milling wastes. *International Journal of Microbiology Research*, 25(1), 1-17. <https://doi.org/10.9734/MRJI/2018/43139>.
- Neifar, S., Hlima, H.B., Mhiri, S., Mezghani, M., Bouacem, K., Ibrahim, A.H., Jaouadi, B., Bouanane-Darenfed, A., & Bejar, S. (2019). A novel thermostable and efficient Class II glucose isomerase from the thermophilic *Caldicoprobacter algeriensis*: biochemical characterization, molecular investigation, and application in high fructose syrup production. *International Journal of Biological Macromolecules*, 15 (129), 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.150>.
- Nguyen, H.Y.T., & Tran, G.B. (2018). Optimization of fermentation conditions and media for production of glucose isomerase from *Bacillus megaterium* using response surface methodology. *Hindawi Scientifica*, 2011, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/6842843>.
- Parker, K., Salas, M., & Nwosu, V.C. (2010). High fructose corn syrup: production, uses and public health concerns. *Biotechnology and Molecular Biology Reviews*, 5(5), 71-78. <https://doi.org/10.5897/BMBR2010.0009>.
- Raafat, A.I., Araby, E., & Lotfy, S. (2011). Enhancement of fibrinolytic enzyme production from *Bacillus subtilis* via immobilization process onto radiation synthesized starch/dimethylaminoethyl methacrylate hydrogel. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1369-1374. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.029>.
- Rhimi, M., Messaoud, E.B., Borgi, M.A., Khadra, K.B., & Bejar, S. (2007). Co-expression of L-arabinose isomerase and D-glucose isomerase in *E. coli* and development of an efficient process producing simultaneously D-tagatose and D-fructose. *Enzyme Microbial Technology*, 40(6), 1531-1537. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.10.032>.
- Shen, Q., Yang, R., Hua, X., Ye, F., Zhang, W., & Zhao, W. (2011). Gelatin templated biomimetic calcification for β -galactosidase immobilization. *Process Biochemistry*, 46(8), 1565-1571. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.04.010>.
- Singh, K., & Kayastha, A.M. (2014). Optimal immobilization of α -amylase from wheat (*Triticum aestivum*) onto DEAE-cellulose using response surface methodology and its characterization *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 104, 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2014.03.014>.
- Tükel, S.S., & Alagöz, D. (2008). Catalytic efficiency of immobilized glucose isomerase in isomerization of glucose to fructose. *Food Chemistry*, 111(3), 658-662. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.035>.
- Tumturk, H., Demirel, G., Altınok, H., Aksoy, S., & Hasırcı, N. (2007). Immobilization of Glucose Isomerase in Surface-Modified Alginate gel beads. *Journal of Food Biochemistry*, 32(2), 234-246. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2008.00171.x>.
- Vaz, R.P., & Filho, E.X.F. (2019). Ion exchange chromatography for enzyme immobilization. In book: *Applications of Ion Exchange Materials in Biomedical Industries*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-06082-4-2>.
- Yanmis, D., Karaoglu, H., Colak, D.N., Sal, F.A., Canakci, S., & Belduz, A.O. (2014). Characterization of a novel xylose isomerase

from *Anoxybacillus gonensis* G2T. Turkish Journal of Biology, 38, 586-592. <https://doi.org/10.3906/biy-1403-76>.

Yu, H., Guo, Y., Wu, D., Zhan, W., & Lu, G. (2011). Immobilization of glucose isomerase onto

GAMM support for isomerization of glucose to fructose. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 72(2011), 73-76. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2011.05.006>.

Değirmendere, Yomra ve Galanima akarsu havzalarında (Trabzon) askıda katı madde taşınımının incelenmesi ve değerlendirilmesi

Monitoring and assessing of total suspended solids transport in the Değirmendere, Yomra, and Galanima stream watersheds (Trabzon Province, NE Turkey)

Betül METE^{*1,a}, Osman Tuğrul BAKI^{2,b}, Adem BAYRAM^{1,c}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 17.09.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 11.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 22.04.2022

Öz

Ülkemiz akarsularında sediment gözlemleri 1961 yılında başlatılmış olup Devlet Su İşleri tarafından yürütülmektedir. Yayımlanan süspansediment yıllıklarından, Trabzon'un Fol Deresi, Değirmendere ve Karadere havzalarında ve her bir havzada bir istasyonda aylık olarak askıda katı madde (AKM) takibinin yapıldığı bilinmektedir. Bu çalışmanın amacı, Değirmendere Havzası'nın yanı sıra AKM takibinin yapılmadığı komşu havzalarda (Yomra ve Galanima) da AKM taşınımını incelemek ve değerlendirmektir. Her bir havzada dört, toplam 12 AKM gözlem istasyonundan, Eylül (2019)-Şubat (2020) döneminde ayda iki kez olacak şekilde su örnekleri toplanmış ve AKM (mg/L) belirlenmiştir. Değirmendere ile Galanima havzalarında işletilen Öğütlü ve Şinik isimli akım gözlem istasyonlarında seviye okumaları yapılarak ilgili kesitlerden geçen debiler belirlenmiş ve AKM yükleri de hesaplanmıştır. Aylık ortalama AKM değerlerinin membada 10.80-124.50 mg/L mansapta ise 62.30-541.20 mg/L arasında değişim gösterdiği Değirmendere Havzası'nda, ortalama debi ve AKM yükünün sonbaharda sırasıyla 489.335 m³/gün ile 32.73 ton/gün ve kışın 506.592 m³/gün ile 12.25 ton/gün oldukları hesaplanmıştır. Aylık ortalama AKM değerlerinin membada 11.80-94.10 mg/L mansapta ise 21.10-158.20 mg/L arasında değişim gösterdiği Galanima Havzası'nda, ortalama debi ve AKM yükünün sonbaharda sırasıyla 148.867 m³/gün ile 4.46 ton/gün ve kışın 259.632 m³/gün ile 18.31 ton/gün oldukları hesaplanmıştır. Altı çalışmanın mevcut olduğu Yomra Deresi Havzası'nda, aylık ortalama AKM değerlerinin membada 33.60-1.209.00 mg/L mansapta ise 145.60-435.90 mg/L arasında değiştiği belirlenmiştir. Çalışma kapsamında AKM takibi yapılan havzalarda en az taşınımın Galanima Havzası'nda olduğu tespit edilmiştir. Membeda Maçka ile mansabında Ortahisar ilçelerinin yer aldığı ve insani faaliyetlerin kıyasla daha yoğun olduğu Değirmendere'nin diğer iki akarsuya kıyasla daha fazla AKM taşıdığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Askıda katı madde, Debi, Değirmendere, Doğu Karadeniz Havzası, Galanima Deresi, Yomra Deresi.

Abstract

In Turkish rivers and streams, the sediment monitoring studies were commenced in 1961 and have been conducted by the State Hydraulic Works (DSİ). It is known from the suspended sediment data published annually by DSİ that the sediment monitoring studies are limited to only three sediment gauging stations, on the Fol Stream (Vakfıkebir Town), the Değirmendere Stream (Maçka Town), and the Karadere Stream (Araklı Town) in Trabzon Province. This study aims to monitor and assess the total suspended sediment (TSS) transport in the Değirmendere Stream and the adjacent stream watersheds, namely Yomra and Galanima. The stream water sampling studies were conducted two times a month for six months from September 2019 to February 2020, on a sum of 12 TSS monitoring stations, four stations in each watershed. Water depth monitoring studies were also conducted at two gauging stations, Öğütlü and Şinik, operated in the Değirmendere and Galanima stream watersheds, respectively. TSS loads were computed with the help of the average daily flowrate values and TSS concentrations in the relevant sections. In the Değirmendere Stream watershed, the average monthly TSS values ranged from 10.80 to 124.50 mg/L upstream station and 62.30 to 541.20 mg/L downstream station. The average daily flowrate values and TSS loads were computed as 489.335 m³ and 32.73 tons in the autumn and 506.592 m³ and 12.25 tons in the winter, respectively, for the TSS monitoring and gauging station. In the Galanima Stream watershed, the average monthly TSS values ranged from 11.80 to 94.10 mg/L upstream station and 21.10 to 158.20 mg/L downstream station. The average daily flowrate values and TSS loads were computed as 148.867 m³ and 4.46 tons in the autumn and 259.632 m³ and 18.31 tons in the winter, respectively, for the TSS monitoring and gauging station. In the Yomra Stream watershed, where the last six field studies are available, the average monthly TSS values ranged from

*a Betül METE; betulmete@ktu.edu.tr, Tel: (0462) 377 26 06, orcid.org/0000-0002-3689-6430

^b orcid.org/0000-0001-8694-0543

^c orcid.org/0000-0003-4359-9183

33.60 to 1.209.00 mg/L upstream station and 145.60 to 435.90 mg/L downstream station. It has been determined that the Galanima Stream watershed has the least transport among the watersheds monitored TSS concentration. The TSS load transported to the Black Sea is higher in the Değirmendere Stream watershed, where the city of Maçka is situated upstream and the city of Ortahisar is situated downstream due to intensive anthropogenic activities in the watershed.

Keywords: Total suspended solids, Flowrate, Değirmendere Stream, Eastern Black Sea Basin, Galanima Stream, Yomra Stream.

1. Giriş

1. Introduction

Akarsulardaki katı maddeler, akarsu debisine ve dane çapına bağlı olarak askıda veya sürüntü maddesi olarak taşınır. Taşınan askıda katı madde (AKM) miktarının akarsuyun taşıdığı toplam katı maddenin yaklaşık %75-95'ini oluşturduğu bilinmektedir (Yang, 1996; Ülke vd., 2011). Akarsuların taşıdığı AKM yükünün bilinmesi su kaynaklarının kontrolü ve yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Su kaynaklarının sağlıklı ve verimli kullanılabilmesi için akarsuların taşınım dinamiklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bir akarsu üzerinde ölçüm ve gözlem verilerinin var olması o akarsudan daha verimli faydalanılmasına olanak sağlamaktadır. Başka bir deyişle, akarsudan faydalanma veya akarsu kaynaklı zararları öngörebilme o akarsu üzerinde sürekli olarak ölçüm ve gözlem yapılması ile gerçekleştirilebilir. İhtiyaç anında eldeki sağlıklı ve uzun süreli veriler duyulan ihtiyacın zaman kaybı yaşanmadan kolaylıkla giderilebilmesine olanak sağlamaktadır. İhtiyaç duyulması anından sonra başlanan ölçüm ve gözlemler zaman kaybı yaratacağı için çözümün de gecikmesine neden olmaktadır (Bayram, 2011).

Akarsu üzerinde yapılacak düzenlemeler (ıslah çalışmaları, sulama, ulaşım vb.) akarsuyun doğada uyduğu kurallar dikkate alındığında daha uzun ömürlü sonuçlar sunabilir. Akarsuların profilleri, kesitleri ve izledikleri yol taşıdığı sediment miktarına göre şekillenmektedir. Taşkın kontrolü, akarsularda ulaşım, erozyonun önlenmesi, sulama kanallarının tasarımı, akarsuların kirlenmesi, akarsularda canlıların yaşamı, çevre estetiği, barajların etkisinde kalan akarsuların yatak değişimlerinin belirlenmesi, hidroelektrik tesislerinde akarsudan su alma ve giren taneleri çökeltmek ayırma, rekreasyon gibi konularla ilgili çeşitli problemleri çözmek için akarsuyun debi-seviye ilişkisinin ve belli bir debide taşınacak sediment miktarının bilinmesi gerekmektedir (Bayazit & Avcı, 2010).

AKM yükünün belirlenmesi akarsuyun morfolojisinin anlaşılmasında, içme ve kullanma suyu temininde, havza yönetimi çalışmalarında ve barajların projelendirilmesinde önemli rol

oynamaktadır. Akarsu bünyesinde bulunan kirleticiler AKM daneciklerine yapışarak hareket ettiği için akarsu ve baraj haznelinde kirlilik seviyesinin belirlenmesinde de AKM kullanılmaktadır (Sivakumar, 2006).

Su kalitesi değişkeni olarak AKM bazı araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Sayın (2000), Değirmendere Havzası'nda üretim gerçekleştiren bazı tesislerin akarsuya etkisinin olup olmadığını belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Belirlediği gözlem istasyonlarından Eylül 1998-Şubat 1999 tarihleri arasında aldığı su örnekleri ile akarsuyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelemiştir. Bazı tesislerin deşarj ettikleri atıksuların akarsudaki AKM miktarını arttırdığını belirlemiştir. Boran vd. (2004), Eylül 1998-Şubat 1999 tarihleri arasında Değirmendere Havzası'nda yer alan işletmelerin akarsu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Havzada bulunan kimi tesislerin kontrolsüz deşarj sonucunda akarsuyun kalitesinin bozulduğunu saptamışlardır. Celep (2009), Trabzon ili Akhisar, Foldere, İskefiye, Galanima, Sera, Beşirli, Değirmendere, İkisü, Yomra, Yanbolu, Karadere, Solaklı ve Baltacı akarsularında anakol ve yan kollar üzerinde yerüstü ve yeraltı suyu kalitesini incelemiştir. Sularda bulunan kirleticilerin çevresel atıklardan kaynaklandığını tespit etmiştir. Satılmış (2015), Değirmendere Havzası'nda, yerüstü su kalitesinin mekana ve zamana bağlı değişimini Ocak-Aralık 2014 tarihleri arasında 15 günlük periyotla takip etmiştir. Yerleşimin yerlerinin ve sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgede bulunan gözlem istasyonundan elde ettiği kirlilik yüklerinin diğer istasyonlara kıyasla daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. AKM konsantrasyonunun akarsu düzenleme ve yol genişletme çalışmaları gibi akarsulara doğrudan yapılan müdahaleler sonucunda büyük miktarda arttığını tespit etmiştir. Serdar (2015), 2013 yılında mevsimsel periyotlarla Doğu Karadeniz Havzası'nda Melet, Pazarsuyu, Aksu, Harşit, Değirmendere, Solaklı, İyidere, Büyükdere, Fırtına, Çağlayan ve Kapistre akarsularının çıkış noktalarında fiziko-kimyasal su kalitesini mevsimsel olarak belirlemiştir. En yüksek AKM değerlerinin Büyükdere ve Değirmendere akarsularında olduğunu gözlemlemiştir. Mutlu & Verap (2018), Nisan 2016-Mart 2017 tarihleri arasında Doğu Karadeniz

Bölgesi'nde bulunan Melet, Aksu, Değirmendere, İyidere, Salarha, Büyükdere, Fırtına ve Hopa akarsularının çıkış noktalarında suyun fiziko-kimyasal özellikleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. AKM konsantrasyonlarının ilgili akarsularda 0.3 ile 604.1 mg/L arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları ilgili akarsularda yapılan önceki çalışmalar ile karşılaştırdıklarında tarımsal ve küçük ölçekli endüstriyel faaliyetler ile evsel atık suların su kirliliğinin artmasında etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. [Erdoğan \(2019\)](#), Doğu Karadeniz Havzası'nda Fırtına, İyidere, Solaklı, Karadere, Söğütlü ve Aksu akarsularında gerçekleştirdiği çalışmada 2016 ilkbahar-2019 yaz mevsimleri periyodunda mevsimsel olarak su kalitesini ve AKM konsantrasyonunun değişimini incelemiştir. Doğrudan ölçümler, AKM konsantrasyonlarını belirlemede kullanılan en güvenilir yöntemlerinden biridir. Ülkemiz akarsularında Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yürütülen sediment takibi çalışmalarına 1961 yılında iki istasyonla başlanmıştır. Ölçüm istasyonları kurmak ve uzun süre veri toplamak zahmetli ve maliyetli olduğundan her bir akarsu için AKM verileri mevcut değildir. DSİ tarafından yayımlanan sediment gözlem yıllıkları ([DSİ 2019](#)) incelendiğinde, Trabzon'da 2006 ve 2012 yılları arasında sadece üç istasyonda (Değirmendere, Karadere ve Fol akarsuları) AKM konsantrasyonlarının aylık olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Değirmendere ve Galanima akarsu havzalarında AKM ve debi takibi, Yomra Deresi Havzası'nda ise sadece AKM takibi gerçekleştirilmiştir. Değirmendere Havzası'nda DSİ tarafından aylık periyotlarla yürütülen AKM gözlemlerinin 2012 yılından sonra sürdürülemediği olması, Galanima ve Yomra akarsu havzalarında ise bu gözlemlerin hiç yapılmamış olması bu çalışmanın motivasyon sebepleri arasındadır. AKM takibi Değirmendere ve Galanima akarsuları için Eylül 2019-Şubat 2020 tarihleri ve Yomra Deresi için Aralık 2019-Şubat 2020 tarihleri arasında 15 günlük periyotlarla gerçekleştirilmiş olup sonuçlar aylık ortalamalar şeklinde sunulmuştur. Havzaların AKM değerleri ve akım gözlem istasyonlarının bulunduğu kesitlerde AKM yükleri hesaplanarak karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

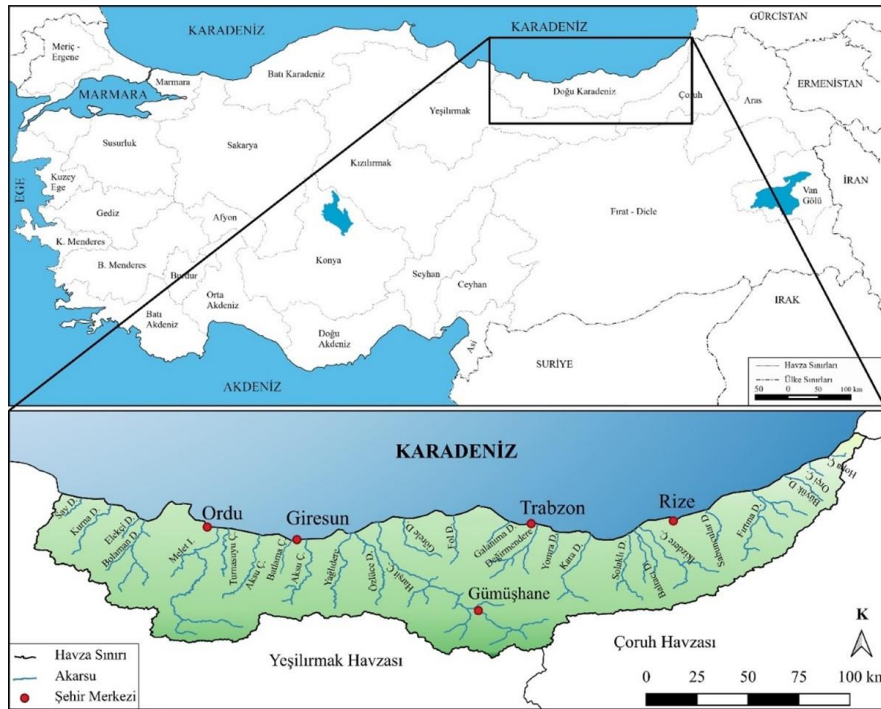
2. Materyal ve yöntem

2. Material and method

2.1. Çalışma alanı

2.1. Study area

Su kaynaklarının tespiti, geliştirilmesi ve kullanılması amacıyla ülkemiz hidrolojik olarak 25 havzaya ayrılmıştır. Bu havzalardan 22.'si Doğu Karadeniz Havzası (Şekil 1) olup 24,077 km²'lik yağış alanına ve 16.46×10⁹ m³'lük yerüstü su potansiyeline sahiptir ([DSİ, 2019](#)).



Şekil 1. Doğu Karadeniz Havzası
Figure 1. The Eastern Black Sea Basin

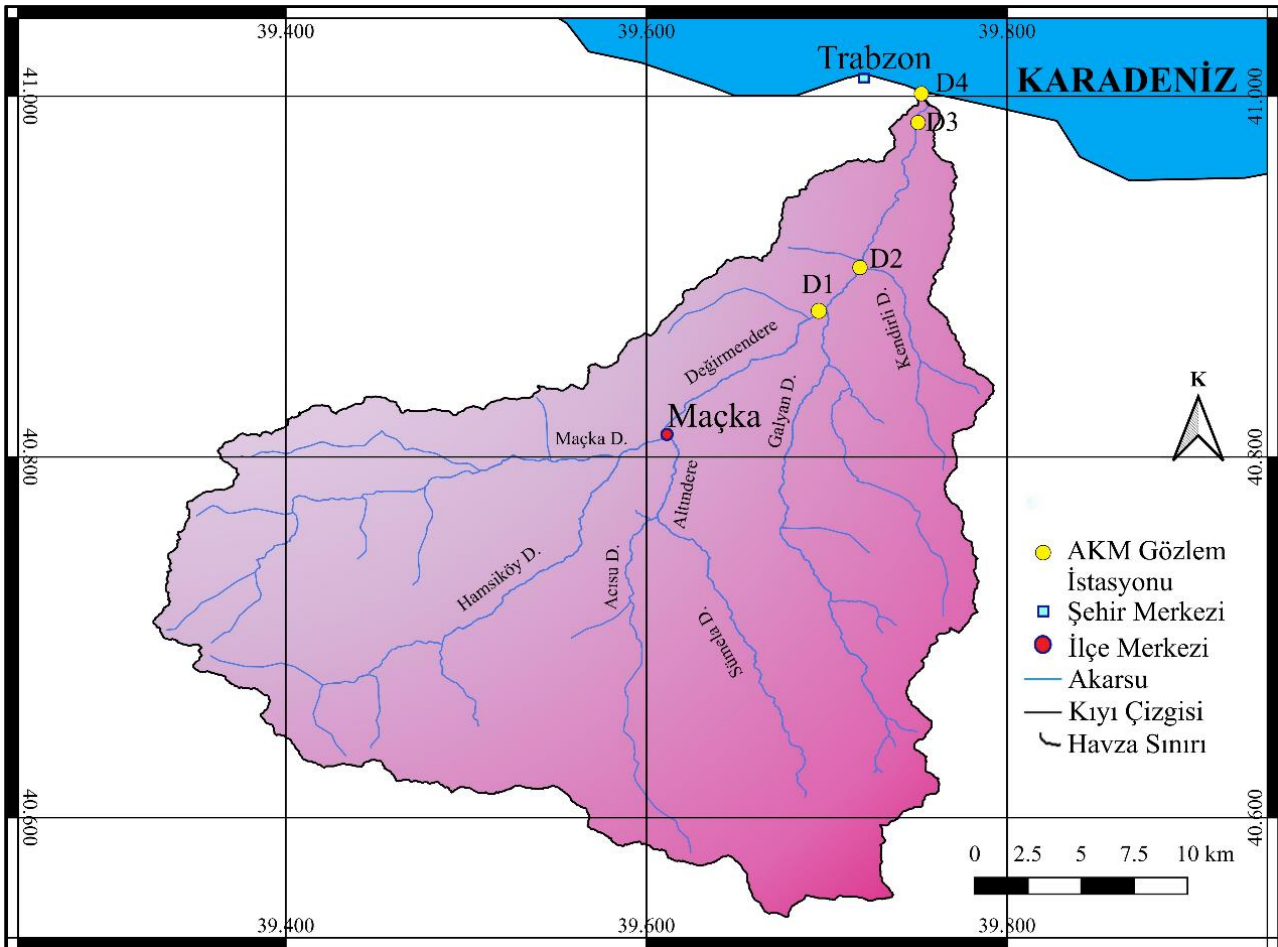
Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2021 yılı nüfus verilerine göre, toplamda 811,901 nüfusa sahip olan Trabzon, Doğu Karadeniz Havzası'nın en yoğun yerleşim yerlerinden biridir. Trabzon ili 4,664 km²'lik yüzey alanına sahip olup başta Ağasar, Fol, Galanima, Değirmendere, Yomra, Karadere ve Solaklı akarsu havzaları olmak üzere birçok alt havzayı kapsamaktadır (TÜİK, 2021). Yüksek eğime, yoğun bitki örtüsüne, yoğun nüfusa, sık ormanlara ve yağışlı geçen mevsimlere sahip olan Trabzon ili, akarsular bakımından Doğu Karadeniz Havzası'nın zengin illeri arasındadır. Yerleşim yerlerinin akarsu çevresinde yoğunlaşması, ulaşım, endüstri ve turizm gibi faaliyetler ile akarsular üzerine olan etkiler artmaktadır.

2.1.1. Değirmendere Havzası

2.1.1.1. The Değirmendere Stream Watershed

Değirmendere Havzası Trabzon il merkezinin yaklaşık olarak 4 km doğusunda yer almaktadır. Havza güneyden Kalkanlı ve Zigana dağlarından

kaynak alıp kuzeyde Karadeniz'e kavuşmaktadır. Akarsu ağı, Değirmendere anakolu ile onu besleyen Hamsiköy, Acısu, Sümela, Altındere, Maçka, Galyan, Kuşul ve Kendirli dereleri gibi birçok önemli yan kolun katılımıyla oluşmaktadır (Şekil 2). Gümüşhane il sınırı içinden kaynak alan havzanın drenaj alanı 1,042 km² olup havzanın büyük kısmı Trabzon il sınırları içerisinde bulunmaktadır. Havza içerisinde birçok yerleşim yeri, beton üretim santrali, oto tamirhanesi, akaryakıt dolum istasyonu, kömür işletmesi ve soğuk hava deposunun yanı sıra taş kırma ve eleme, alabalık yetiştirme, sanayi, lastik kaplama ve mermer işleme tesisleri bulunmaktadır (Trabzon İÇDR, 2020). Trabzon ilinin içme ve kullanma suyu ihtiyacının temin edildiği Atası Barajı ve arıtımın gerçekleştirildiği Esiroğlu İçme Suyu Arıtma Tesisi bu havza içerisinde yer almaktadır (Satılmış, 2015). Ayrıca havzada aktif olarak çalışan 11 adet hidroelektrik santral (HES) bulunmakta ve bu tesislerde yaklaşık olarak 220.43 GWh/yıl enerji üretimi gerçekleştirilmektedir (Trabzon İÇDR, 2020).



Şekil 2. Değirmendere Havzası (Trabzon) akarsu ağı

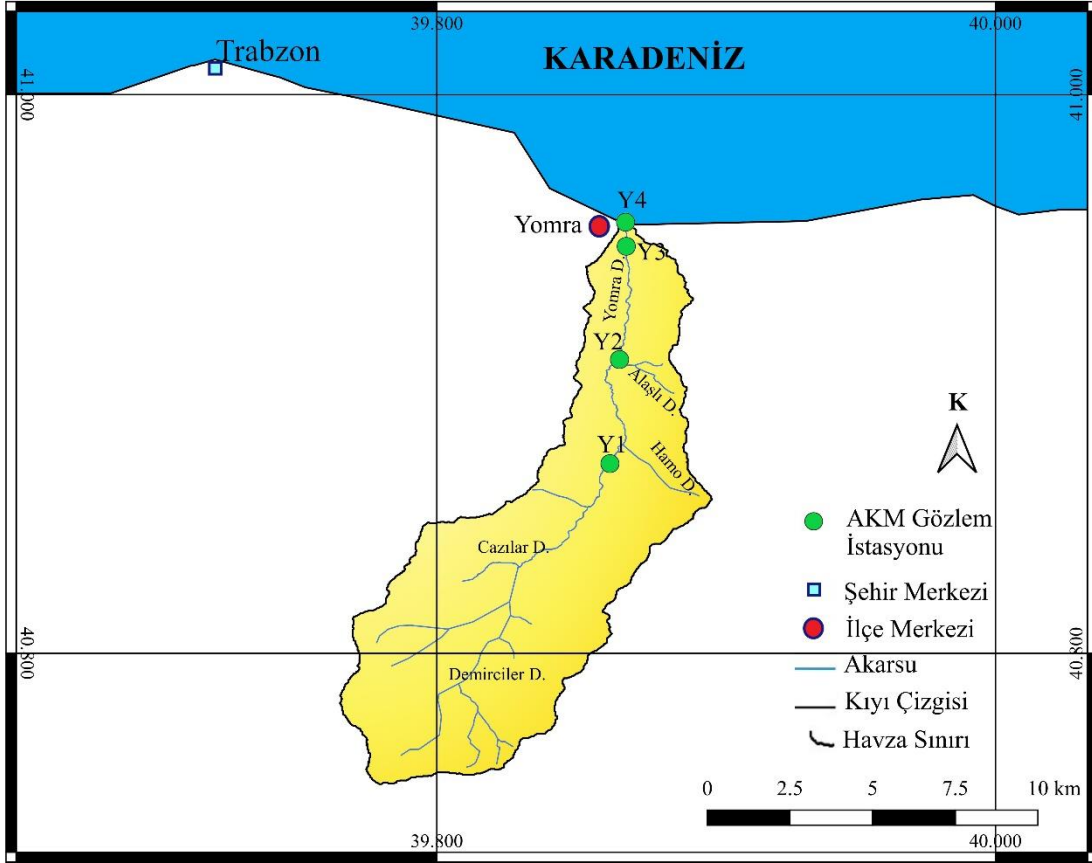
Figure 2. The stream network of the Değirmendere Watershed (Trabzon)

2.1.2. Yomra Deresi Havzası

2.1.2. The Yomra Stream Watershed

Yomra Deresi Havzası, Trabzon il merkezinin yaklaşık olarak 15 km doğusunda yer almaktadır. Havza güneyden Seslikaya Tepesi'nden kaynak alıp kuzeyde Karadeniz'e kavuşmaktadır. Akarsu ağı, Yomra Deresi anakolu ile Demirciler, Cazılar, Hamo ve Alaşlı isimli yan kolların katılımıyla oluşmaktadır (Şekil 3). Tamamı Trabzon il sınırları içerisinde yer alan havza 10.40 km²'lik bir yüzey

alanına sahiptir. Havza içerisinde yerleşim yerlerinin yanı sıra kömür işletmeleri, beton üretim santralleri, depolama sahalarına ek olarak taş kırma ve eleme, alabalık yetiştirme, mermer işleme fındık işleme, spor tesisleri gibi birçok tesis bulunmaktadır (Makul, 2015). Havzada ana kol üzerinde iki adet tersip bendi ve bir adet 2.34 MW kurulu güce sahip nehir tipi HES bulunmaktadır. Bu tesiste yaklaşık olarak 11.24 GWh/yıl enerji üretimi gerçekleştirilmektedir (Trabzon İÇDR, 2020).



Şekil 3. Yomra Deresi Havzası (Trabzon) akarsu ağı

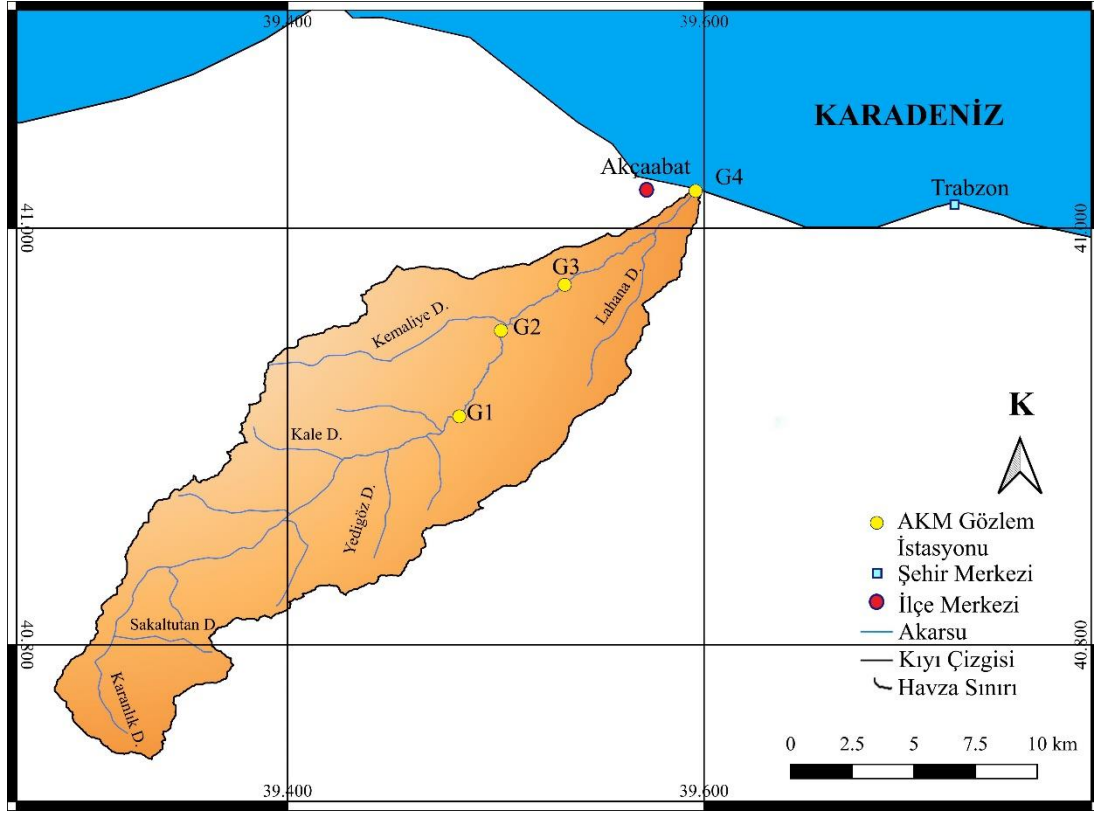
Figure 3. The stream network of the Yomra Watershed (Trabzon)

2.1.3. Galanima Deresi Havzası

2.1.3. The Galanima Stream Watershed

Galanima Deresi Havzası, Trabzon il merkezinin yaklaşık olarak 13 km batısında yer almaktadır. Havza güneyden Kumanandoz Yaylası'ndan kaynak alıp kuzeyde Karadeniz'e kavuşmaktadır (Atmaca, 2005). Akarsu ağı, Karanlık, Sakaltutan, Kale, Yedigöz, Kemaliye ve Lahana derelerinin birleşmesi ile meydana gelmektedir (Şekil 4). 272.78 km² drenaj alanına sahip olan havzanın tamamı Trabzon il sınırları içerisinde kalmaktadır

(Celep, 2009). Havzada taş ocağı, hazır beton üretim santrali, su değirmeni, sağlık kurumları, akaryakıt dolum istasyonları, oto tamirhaneleri, spor tesisleri ve et kombine tesisi olmak üzere birçok işletme ve sanayi tesisi bulunmaktadır. Havzada bir adet 1.04 MW kurulu güce sahip Türkiye'nin ilk depolamasız nehir tipi HES'i olan Işıklar (Visera) HES bulunmaktadır. Bu tesiste yaklaşık olarak 9.11 GWh/yıl enerji üretimi gerçekleştirilmektedir (Trabzon İÇDR, 2020).



Şekil 4. Galanima Deresi Havzası (Trabzon) akarsu ağı
Figure 4. The stream network of the Galanima Watershed (Trabzon)

2.2. Askıda katı madde ve akım gözlem istasyonları

2.2. Total suspended solids monitoring and gauging stations

Havzalarda gerçekleştirilen teknik geziler sonucu AKM takibinin yapılacağı istasyonlar için uygun

yer seçimi yapılmıştır. AKM yükünü etkileyebileceği düşünülen durumlar göz önünde bulundurularak her bir havzada dört ve toplamda 12 adet AKM gözlem istasyonu belirlenmiştir. Gözlem istasyonlarına ait konum bilgileri, kuş uçuşu mesafeler ve istasyonlar arası eğimler Tablo 1 ve 2’de özetlenmektedir.

Tablo 1. Askıda katı madde gözlem istasyonlarının konum bilgileri
Table 1. Location information of total suspended solids monitoring stations

Akarsu havzası	Gözlem istasyonu	K koordinatı	D koordinatı	Kot (m)
Değirmendere	D1 (membra)	40°51'50.04"	39°40'57.71"	182
	D2	40°54'19.08"	39°43'06.23"	111
	D3	40°59'07.85"	39°45'01.19"	21
	D4 (mansap)	41°00'06.48"	39°45'25.92"	3
Yomra	Y1 (membra)	40°52'07.02"	39°51'42.57"	340
	Y2	40°54'22.63"	39°51'54.94"	130
	Y3	40°56'46.32"	39°52'04.80"	21
	Y4 (mansap)	40°57'15.12"	39°52'03.72"	9
Galanima	G1 (membra)	40°54'35.64"	39°28'58.44"	280
	G2	40°57'03.96"	39°30'08.64"	176
	G3	40°58'22.44"	39°32'00.60"	109
	G4 (mansap)	41°01'05.88"	39°35'45.96"	2

Tablo 2. Askıda katı madde gözlem istasyonlarının birbirlerine göre durum bilgileri

Table 2. Location information of total suspended solids monitoring stations compared to each other

Akarsu havzası	Gözlem istasyonu	Kot farkı (m)	Mesafe (m)	Eğim
Değirmendere	D1-D2 (membra)	71	5,494	0.0129
	D2-D3	90	9,306	0.0097
	D3-D4 (mansap)	18	1,895	0.0095
Yomra	Y1-Y2 (membra)	210	4,194	0.0500
	Y2-Y3	109	4,440	0.0245
	Y3-Y4 (mansap)	12	888	0.0135
Galanima	G1-G2 (membra)	104	4,858	0.0214
	G2-G3	67	3,567	0.0187
	G3-G4 (mansap)	107	7,304	0.0146

AKM takibinin yapıldığı havzalarda DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından işletilen akım gözlem istasyonlarının (AGİ) konum bilgileri sırasıyla şöyledir: Değirmendere Havzası'nda Trabzon-Gümüşhane karayolunun (D885) 18. km'sinde seçilen D1 istasyonunun hemen membaında yer alan D22A086 no'lu Öğütlü AGİ (40°51'50.20" K-39°40'57.60" D), Yomra Deresi Havzası'nda Yomra-Özdil karayolunun 12. km'sinde seçilen Y1 istasyonunun membaında yer alan D22A133 no'lu Taşdelen AGİ (40°51'14.40" K-39°51'23.00" D) ve Galanima Deresi Havzası'nda Akçaabat-Düzköy karayolunun 11. km'sinde seçilen G2 istasyonunun hemen membaında yer alan D22A154 no'lu Şinik AGİ (40°57'04.00" K-39°30'09.00" D). Yomra Deresi Havzası'nda 20 Haziran 2019 tarihinde gerçekleşen aşırı yağışlar sebebiyle meydana gelen taşkın ve heyelan sonucu havzada bulunan yerleşim yerleri ile köy yollarında yapısal hasarlar oluşmuştur. Söz konusu taşkın esnasında havzada bulunan D22A133 no'lu Taşdelen AGİ'de taşkın ve heyelan sonucu taşınan malzemenin birikmesi sebebiyle kullanılamaz hale gelmiştir.

2.3. Askıda katı madde ve debi verilerinin elde edilmesi

2.3. Determination of total suspended solids and flowrate data

Akarsu örneklerinin alınması, muhafaza edilmesi ve laboratuvara ulaştırılmasını kapsayan süreç [APHA \(1992\)](#) yöntemleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen örnekleme istasyonlarında, akarsu kesitinin orta noktasında ve numune kabının içerisinde hava boşluğu kalmayacak şekilde kapağı kapatılarak örnekleme yapılmıştır. Alınan numuneler buz kasetleri ile donatılmış taşıma kapları ile laboratuvara taşınmıştır. AKM tayini TS EN 872 ([TSE, 2007](#)) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Su örneklerinin süzülmesi cam elyaf filtreler

filtrasyon işleminden önce saf suda bekletilmiş ve filtrasyon öncesinde bir saat, filtrasyon sonrasında dört saat olacak şekilde etüvde 105±2 °C'de tutularak kurutulmuştur. Son ağırlıktan ilk ağırlık çıkarılarak elde edilen fark örnek hacmine bölünerek mg/L cinsinden AKM konsantrasyonu tayin edilmiştir.

Eylül 2019 tarihi itibarıyla Değirmendere ve Galanima akarsu havzalarında bulunan AGİ'lerden seviye okumaları yapılmış ve kaydedilmiştir. Kaydedilen su yükseklikleri DSİ tarafından havzalara özel oluşturulan anahtar eğrilerinde kullanılarak günlük debi miktarları hesap edilmiştir.

Belirlenen istasyonlarda su örneği toplama ve seviye okuma çalışmaları Değirmendere ve Galanima akarsu havzalarında Eylül 2019, Yomra Deresi Havzası'nda ise Aralık 2019 tarihi itibarıyla başlatılmış ve çalışmalar Şubat 2020 tarihine kadar 15 günlük periyotlarla yürütülmüştür. Diğer bir deyişle, Değirmendere ve Galanima akarsu havzalarında 12, Yomra Deresi Havzası'nda ise 6 arazi çalışması gerçekleştirilmiştir.

2.4. Askıda katı madde verileri korelasyon analizi

2.4. Correlation analysis of total suspended solids data

Korelasyon katsayısı değişkenler arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde kullanılan bir ölçüdür. IBM SPSS Statistics 23 bilgisayar programı kullanılarak AKM gözlem istasyonlarından elde edilen AKM verileri arasında Spearman korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

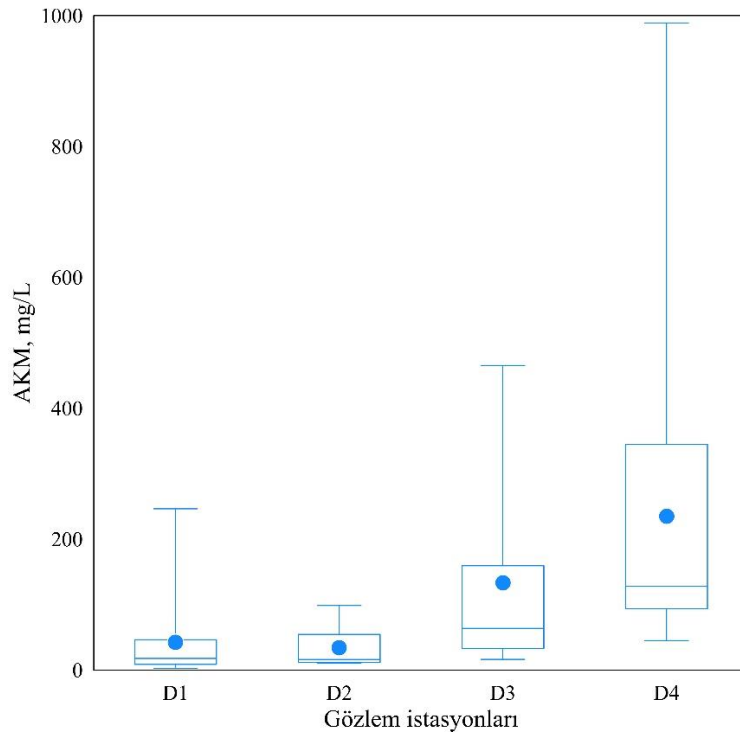
3. Bulgular ve irdeleme

3. Results and discussion

Çalışmanın bu kısmında Değirmendere, Yomra ve Galanima akarsu havzalarında seçilen AKM gözlem istasyonlarından alınan akarsu örneklerine ait aylık ve mevsimsel ortalama değerler üzerinden AKM taşınımı irdelenmiştir. Çalışmadan elde edilen AKM (mg/L) verileri için kutu grafikler hazırlanmış ve her bir havza için sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7’de sunulmuştur.

Değirmendere Havzası’ndan elde edilen AKM değerleri ile hazırlanan kutu grafik (Şekil 5) incelendiğinde; mansap (D4) istasyonunun değer

aralığı diğer istasyonlarınkinden daha geniş olduğu görülmektedir. AKM değerleri bütün istasyonlarda üst çeyrekte yığılmıştır. Bu durum istasyonlardan elde edilen AKM değerlerinin yüksek olması ile açıklanabilir. Aylık ortalama AKM değerleri ve kutu grafik (Şekil 5) incelendiğinde havza genelinde mambadan mansaba gidildikçe ortalama AKM değerinin artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum havzada bulunan yerleşim yerleri ve çeşitli sanayi tesislerinin etkisiyle olduğu söylenebilir. D4 istasyonuna gelindiğinde yatak eğiminin düşmesine rağmen yerleşim yerlerinin yoğunluğunun ve sanayi faaliyetlerinin artması sonucunda AKM konsantrasyonu artmaktadır.



Şekil 5. Değirmendere Havzası’nda (Trabzon) AKM değerlerinin kutu grafiği
Figure 5. Box plot of TSS values in the Değirmendere Stream Watershed (Trabzon)

Değirmendere Havzası’nda seçilen AKM gözlem istasyonlarından elde edilen verilere ait istatistiksel değerler Tablo 3’te sunulmaktadır. Değirmendere Havzası için en yüksek AKM konsantrasyonu Aralık 2019 tarihinde gerçekleştirilen ilk çalışmada

mansap (D4) istasyonunda 988.70 mg/L, en düşük AKM konsantrasyonu ise Ekim 2019 tarihinde gerçekleştirilen ilk çalışmada mamba (D1) istasyonunda 2.50 mg/L olarak belirlenmiştir.

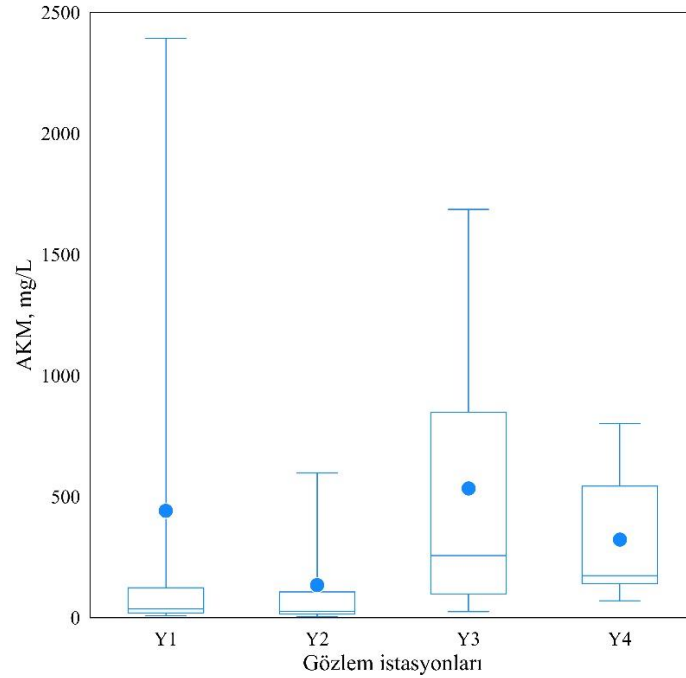
Tablo 3. Değirmendere Havzası (Trabzon) askıda katı madde (mg/L) istatistikleri (Mete, 2020)

Table 3. Total suspended solids (mg/L) statistics in the Değirmendere Stream Watershed (Trabzon) (Mete, 2020)

Gözlem istasyonu	Min.	Ort.	Maks.	Medyan	SS.
D1 (mamba)	2.50	40.18	246.50	35.09	67.94
D2	10.30	31.91	98.67	19.41	28.54
D3	16.30	131.14	465.50	93.28	148.75
D4 (mansap)	45.17	232.77	988.70	162.70	273.05

Yomra Deresi Havzası'nda elde edilen AKM değerleri ile hazırlanan kutu grafik (Şekil 6) incelendiğinde Y1 ve Y3 istasyonlarına ait grafiklerin boyu Y2 ve Y4 istasyonlarından daha uzun olduğu görülmektedir. AKM değerlerinin bütün istasyonlarda üst aşırı ve medyan değerleri arasında yığıldığı

gözlemlenmiştir. Fazla yayılım görülen istasyonlarda havzadaki beşeri faaliyetler ile yol ve istinat duvarı inşaat çalışmaları sonucu AKM konsantrasyonunun yüksek değerlere ulaştığı düşünülmektedir. Bu grafikten (Şekil 6) AKM değerlerinin çoğunlukla yüksek değerleri içerdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Yomra Deresi Havzası'nda (Trabzon) AKM değerlerinin kutu grafiği
Figure 6. Box plot of TSS values in the Yomra Stream Watershed (Trabzon)

Yomra Deresi Havza'sında seçilen AKM gözlem istasyonlarından elde edilen verilere ait istatistikler Tablo 4'te verilmektedir. Havzada en yüksek AKM konsantrasyonu Ocak 2020'de gerçekleştirilen ikinci çalışmada memba (Y1) istasyonunda 2.393.70 mg/L ve en düşük AKM konsantrasyonu ise yine Ocak 2020'de gerçekleştirilen ikinci çalışmada Y2 istasyonunda 3.80 mg/L olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Memba istasyonunda gözlemlenen en yüksek AKM konsantrasyonunun örnekleme öncesinde gerçekleştirilen yol ve istinat duvarı çalışmaları sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir. İstasyonlardan elde edilen aylık AKM konsantrasyonlarının ortalamaları dikkate alındığında Y1 ve Y2 istasyonları arasındaki konsantrasyon düşmektedir. Bu durum ana kol

üzerinde bulunan HES'in akarsudan almış olduğu işletme suyunu çöktürüp yeniden ana kola vermesi Y2 istasyon verilerinde düşüklüğe, tesisin çalışmadığı günlerde ise Y2 istasyonu AKM değerlerinde artışa neden olduğu anlaşılmıştır.

AKM konsantrasyonlarının Y3 istasyonunda Y2 istasyonundan daha yüksek olmasında Y2 ve Y3 istasyonları arasında bulunan yerleşim yerleri, kömür işletmeleri, beton üretim santrali, mermer işleme ve fındık işleme tesisleri etkili olmuştur. Mansap (Y4) istasyonunda gözlemlenen AKM konsantrasyonları yatak eğiminin düşmesi ve kesit genişliğinin artması sebebiyle Y3 istasyona kıyasla düşüş göstermiştir.

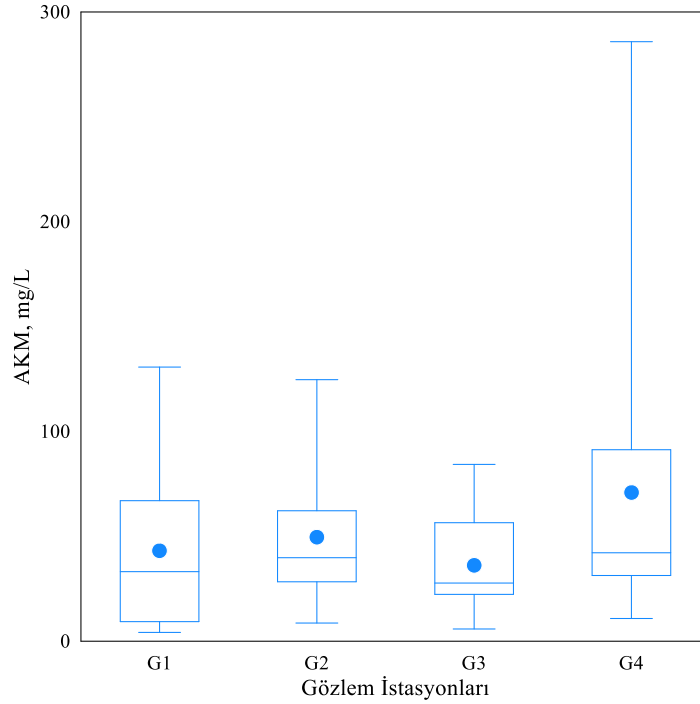
Tablo 4. Yomra Deresi Havzası (Trabzon) askıda katı madde (mg/L) istatistikleri

Table 4. Total suspended solids (mg/L) statistics in the Yomra Stream Watershed (Trabzon) (Mete, 2020)

Gözlem istasyonu	Min.	Ort.	Maks.	Medyan	SS.
Y1 (memba)	7.80	436.20	2,393.70	489.38	959.88
Y2	3.80	129.25	597.30	117.01	232.21
Y3	25.00	528.45	1,686.80	369.40	643.41
Y4 (mansap)	70.20	317.37	801.50	177.52	289.77

Galanima Deresi Havzası'nda elde edilen AKM verileri ile hazırlanan kutu grafik (Şekil 7) incelendiğinde mansap (G4) istasyonuna ait grafik boyunun diğer istasyonlarınkinden daha uzun olduğu ve bu istasyonda AKM değeri diğer istasyonlara kıyasla daha fazla değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Elde edilen AKM verilerinin bütün istasyonlarda medyan ile üst çeyrek değerleri arasında yığıldığı gözlemlenmiştir. G1, G2 ve G3 istasyonlarından elde edilen AKM konsantrasyonlarının birbirlerine yakın değerlerde oldukları belirlenmiştir. Aylık ortalama AKM

konsantrasyonları ile kutu grafik (Şekil 7) dikkate alındığında memba (G1) istasyonundan G2 istasyonuna gelindiğinde AKM konsantrasyonunda bir miktar artış söz konusudur. Bu durumun iki istasyon arasında yer alan taş ocağı ve asfalt şantiyesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. G3 istasyonuna gelindiğinde eğimin düşüp, kesitin genişlemesi ve seyrek yerleşim sebebiyle ortalama AKM konsantrasyonu nispeten düşmektedir. Mansap (G4) istasyonunda ise sanayi ve yerleşim yerleri etkisiyle AKM konsantrasyonu artış göstermektedir.



Şekil 7. Galanima Deresi Havzası'nda (Trabzon) AKM değerlerinin kutu grafiği
Figure 7. Box plot of TSS values in the Galanima Stream Watershed (Trabzon)

Havza içerisinde seçilen istasyonlardan elde edilen verilere ait istatistikler Tablo 5'te verilmektedir. Galanima Deresi Havzası'nda en yüksek AKM değeri Kasım 2019'da gerçekleştirilen ilk

çalışmada mansap (G4) istasyonunda 285.83 mg/L, en düşük AKM değeri ise Aralık 2019'da gerçekleştirilen ikinci çalışmada memba (G1) istasyonunda 4.20 mg/L olarak elde edilmiştir.

Tablo 5. Galanima Deresi Havzası (Trabzon) askıda katı madde (mg/L) istatistikleri (Mete, 2020)

Table 5. Total suspended solids (mg/L) statistics in the Galanima Stream Watershed (Trabzon) (Mete, 2020)

Gözlem istasyonu	Min.	Ort.	Maks.	Medyan	SS.
G1 (memba)	4.20	42.45	130.70	27.29	39.09
G2	8.67	48.92	124.70	22.07	36.12
G3	5.83	35.50	84.30	17.22	25.54
G4 (mansap)	10.83	70.22	285.83	42.30	74.73

AKM takibinin yapıldığı havzalarda akarsu debileri ve AKM verileri kullanılarak AKM yükleri hesaplanmıştır (Tablo 6). Değirmendere ve Galanima Deresi havzalarında en yüksek günlük ortalama debi değerleri Şubat 2020'de meydana

gelmiştir. Bu durum söz konusu tarihlere yağışların fazla olması ile açıklanabilir. Taşman AKM yükleri Değirmendere Havzası'nda debinin ikinci en yüksek olduğu Eylül 2019'da 89.39 ton/gün; Galanima Deresi Havzası'nda debi

değerinin en yüksek olduğu Şubat 2020’de 32.42 ton/gün olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan mevsimsel en yüksek debi değerleri Değirmendere Havzası için sonbahar, Galanima Deresi Havzası için kış mevsiminde meydana gelmiştir (Tablo 6).

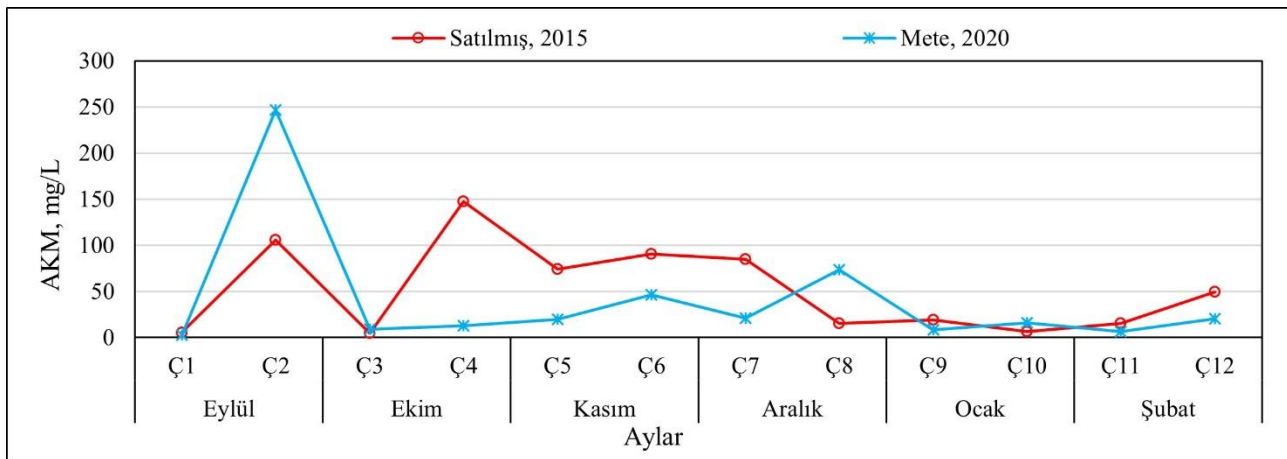
İlgili zaman diliminde havzalarda taşınan AKM yükü Değirmendere Havzası için 36.54 ton/gün, Galanima Deresi Havzası için 18.97 ton/gün olarak hesap edilmiştir.

Tablo 6. Akım gözlem istasyonlarından geçen günlük debiler ve askıda katı madde yükleri
Table 6. Daily flowrates and total suspended solids loads passing through the gauging stations

Aylar	Değirmendere (Öğütlü AGİ)			Galanima (Şinik AGİ)		
	Debi (m ³ /gün)	AKM (mg/L/gün)	AKM (ton/gün)	Debi (m ³ /gün)	AKM (mg/L/gün)	AKM (ton/gün)
Eylül	717,984	124.50	89.39	102,816	21.50	2.21
Ekim	388,584	10.83	4.21	102,643	28.83	2.96
Kasım	474,336	33.17	16.01	192,672	31.58	6.09
Aralık	269,352	47.08	12.68	192,672	39.17	7.55
Ocak	498,528	12.00	5.98	200,016	84.75	16.95
Şubat	729,864	13.50	9.85	369,792	87.67	32.42
Ortalama	513,108	40.18	23.02	193,435	48.92	11.36
Mevsimler						
Sonbahar	526,968	56.17	36.54	132,710	27.31	3.75
Kış	499,248	24.19	9.51	254,160	70.53	18.97

Satılmış (2015) tarafından Değirmendere Havzası’nda yürütülen yerüstü su kalitesine yönelik çalışmada, AKM takibinin yürütüldüğü D08, D12 ve D14 gözlem istasyonlarının bu çalışmadaki D1, D2 ve D4 gözlem istasyonlarına

karşılık geldiği tespit edilmiştir. Söz konusu istasyonlara ait AKM verileri (Satılmış 2015; Mete 2020) istasyon bazında Şekil 8, 9 ve 10’da karşılaştırılmıştır.



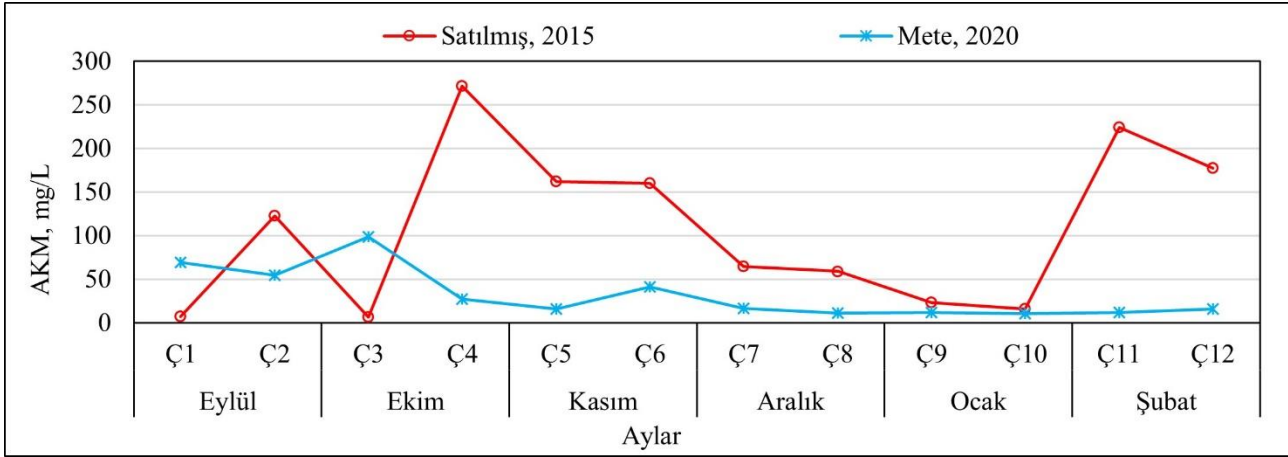
Şekil 8. Değirmendere Havzası (Trabzon) D1 gözlem istasyonunda AKM verilerinin karşılaştırılması
Figure 8. Comparison of TSS data at D1 monitoring station, the Değirmendere Stream Watershed (Trabzon)

Satılmış (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Değirmendere Havzası’nda memba (D1) istasyonuna karşılık gelen D08 istasyonunda en yüksek AKM konsantrasyonu Ekim 2014’te 147.50 mg/L ve en düşük AKM konsantrasyonu Eylül 2014’te 5.50 mg/L olarak elde edilmiştir (Şekil 8). Her iki çalışma için de en düşük AKM konsantrasyonlarının eylül ayında elde edilirken en yüksek AKM konsantrasyonlarının aynı dönem

içerisinde gözlemlenmemiştir. İki çalışmadan elde edilen aylık ortalama AKM konsantrasyonları arasında gerçekleştirilen korelasyon analizi sonucunda veriler arasındaki korelasyon katsayısının 0.580 (P=0.048) olduğu belirlenmiştir. Akım gözlem yıllıkları incelendiğinde 2014 yılı Eylül, Ekim ve Kasım ayları için DSİ tarafından ölçüm alınamadığı görülmüştür. Bu sebeple ilgili aylarda debi ve AKM yükleri hesaplanamamıştır.

Ancak, Aralık, Ocak ve Şubat aylarına ait ortalama debi değerleri sırasıyla 12.84, 2.34 ve 4.77 m³/s olarak elde edilmiştir. Aynı dönemdeki AKM

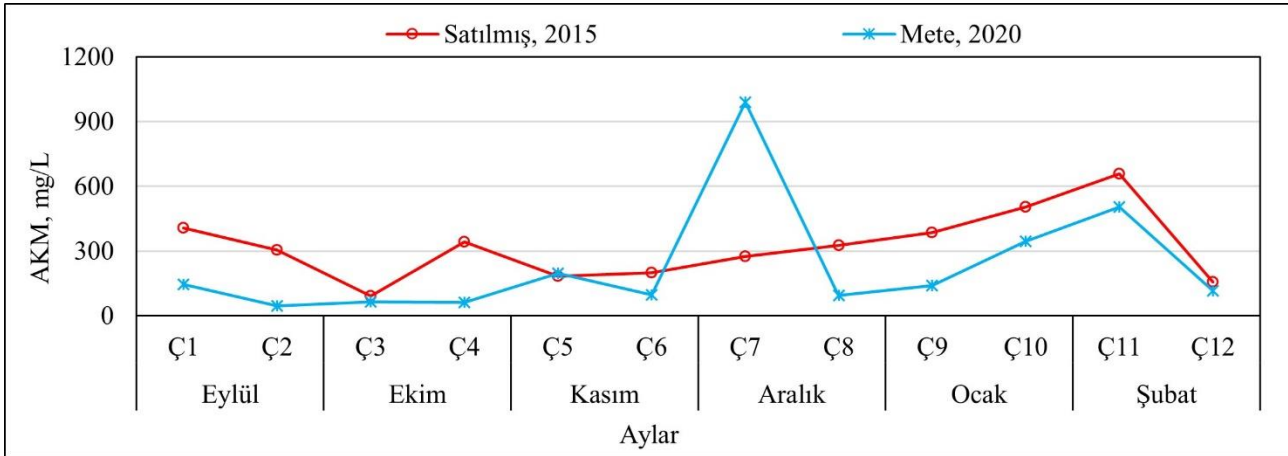
yükleri ise 55.70, 2.64 ve 13.28 ton/gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Değirmendere Havzası (Trabzon) D2 gözlem istasyonunda AKM verilerinin karşılaştırılması
Figure 9. Comparison of TSS data at D2 monitoring station, the Değirmendere Stream Watershed (Trabzon)

Satılmış (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Değirmendere Havzası'nda D2 istasyonuna karşılık gelen D12 istasyonunda en yüksek AKM konsantrasyonu Ekim 2014'te

271.60 mg/L ve en düşük AKM konsantrasyonu Ekim 2014'te 6.40 mg/L olarak elde edilmiştir (Şekil 9). İstasyona ait AKM konsantrasyonları arasında anlamlı bir korelasyona rastlanmamıştır.



Şekil 10. Değirmendere Havzası (Trabzon) D4 gözlem istasyonunda AKM verilerinin karşılaştırılması
Figure 10. Comparison of TSS data at D4 monitoring station, the Değirmendere Stream Watershed (Trabzon)

Satılmış (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Değirmendere Havzası'nda D4 istasyonuna karşılık gelen D14 istasyonunda en yüksek AKM konsantrasyonu Şubat 2015'te 657.00 mg/L ve en düşük AKM konsantrasyonu Ekim 2014'te 90.00 mg/L olarak elde edilmiştir (Şekil 10). İstasyona ait AKM konsantrasyonları arasında anlamlı bir korelasyona rastlanmamıştır.

gözlem istasyonunun bu çalışmadaki G3 gözlem istasyonuna karşılık geldiği tespit edilmiştir. Çalışmada sonbahar ve kış mevsimlerini temsilen Eylül ve Aralık ayları seçilmiştir. İlgili aylara ait ortalama AKM değerleri sırasıyla 7.67 ve 109.00 mg/L olarak verilmiştir. Bu çalışmada G3 istasyonunda ortalama AKM değerleri sonbahar için 16.80 mg/L ve kış için 54.20 mg/L olarak hesaplanmıştır. Eylül ve Aralık ayları için ortalama AKM değerleri ise 16.20 ve 34.90 mg/L olarak belirlenmiştir. Mevsimsel olarak karşılaştırıldığında her iki çalışmada da kış mevsiminde AKM değerlerinin sonbahara kıyasla

Erdoğan (2019) tarafından Söğütlü (Galanima) Havzası'nda 2016 ilkbaharı ile 2019 yazı arasında mevsimsel olarak yürütülen yerüstü su kalitesine yönelik çalışmada, AKM takibinin yürütüldüğü

daha yüksek olduğu görülmektedir. [Erdoğan \(2019\)](#) tarafından gerçekleştirilen çalışmada mevsimsel olarak tek bir örnekleme yapılması sebebiyle veriler arasında bir karşılaştırma yapmanın çok sağlıklı olamayacağı düşünülmektedir.

Değirmendere, Galanima ve Yomra akarsu havzalarında belirlenen AKM gözlem istasyonlarına ait AKM değerleri kullanılarak elde edilen Spearman korelasyon matrisleri Tablo 7’de verilmektedir. Tablo 7 incelendiğinde Değirmendere Havzası’ndaki hiçbir istasyonun birbiri ile anlamlı düzeyde korelasyon göstermediği anlaşılmaktadır. Bu durumun bütün havzayı etki altına alan yerleşim yerleri ve sanayi tesisleri kaynaklı faaliyetlerden oluşan bir durum

olduğu düşünülmektedir. Yomra Deresi Havzası’nda seçilen istasyonlardan sadece Y3 ve Y4 arasında çok yüksek korelasyon bulunduğu, diğer istasyonların birbirleri ile anlamlı düzeyde korelasyon göstermediği anlaşılmaktadır (Tablo 7). Bu durum havzadaki insan kaynaklı faaliyetlerin AKM değerlerini etkilemesi sonucu ortaya çıkan bir durumdur. Galanima Deresi Havzası’nda ise G3 ve G4 istasyonları birbirleri ile anlamlı düzeyde korelasyon göstermezken, bu istasyonlar haricindeki bütün istasyonların kendi aralarında anlamlı ilişki kurdukları görülmüştür. G3 ve G4 arasındaki bu durumun G4’ü etkisi altında bırakan yerleşim yerleri ve sanayi tesisi kaynaklı faaliyetlerden dolayı oluşan bir durum olduğu düşünülmektedir.

Tablo 7. Askıda katı madde verileri için Spearman korelasyon matrisleri

Table 7. Spearman correlation matrices for total suspended solids data

Gözlem istasyonu	D2	D3	D4	Y2	Y3	Y4	G2	G3	G4	
D1	-.049	-.224	-.343	Y1	-.257	.600	G1	.949**	.867**	.615*
	.880	.484	.276		.623	.208		.000	.000	.000
D2		.503	-.448	Y2	-.714	-.714	G2	.946**	.648*	
		.095	.145		.111	.111		.000	.023	
D3			.014	Y3		1.000**	G3			.566*
			.966			.000				.055

* Korelasyon 0.05 düzeyinde anlamlıdır.

** Korelasyon 0.01 düzeyinde anlamlıdır.

4. Sonuçlar ve öneriler

4. Conclusions and recommendations

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi Trabzon il sınırları içerisinde yer alan Değirmendere, Yomra ve Galanima akarsu havzalarının taşıdığı askıda katı madde (AKM) miktarı incelenmiştir. Değirmendere ve Galanima Deresi havzaları için Eylül 2019-Şubat 2020, Yomra Deresi Havzası için Aralık 2019-Şubat 2020 tarihleri arasında 15 günlük periyotlarla gerçekleştirilen ölçümler aylık ortalamalar üzerinden yorumlanmıştır.

Altı aylık sürede Değirmendere ve Galanima akarsu havzalarında taşınan ortalama AKM konsantrasyonları sırasıyla 49.27 ve 109.00 mg/L, üç aylık sürede Yomra Deresi Havzası’nda taşınan ortalama AKM konsantrasyonu ise 352.82 mg/L olarak hesap edilmiştir.

Altı aylık çalışma kapsamında Değirmendere Havzası’nda en düşük ve en yüksek akım sırasıyla Aralık 2019 ve Şubat 2020’de; Galanima Deresi Havzası’nda ise Eylül 2019’da ve Şubat 2020’de gerçekleşmiştir.

Akım gözlemlerinin gerçekleştirildiği Değirmendere ve Galanima akarsu havzalarında akım değerlerinin minimum olduğu dönemlerde AKM yükü Değirmendere Havzası’nda 4.22 ton/gün ve Galanima Deresi Havzası’nda ise 2.21 ton/gün olarak hesap edilmiştir. AKM yüklerinin maksimum olduğu değerler Değirmendere Havzası’nda 89.38 ton/gün ve Galanima Deresi Havzası’nda ise 33.26 ton/gün olarak hesap edilmiştir.

Altı aylık gözlem süresince Değirmendere Havzası’ndan ortalama 20.77 ton/gün ve Galanima Deresi Havzası’ndan ise ortalama 9.80 ton/gün AKM taşınımı olduğu hesap edilmiştir. Değirmendere Havzası’nda taşınan AKM yükünün Galanima Deresi Havzası’nda taşınan AKM yüküne kıyasla iki katından fazla değere ulaştığı anlaşılmıştır. Hem maksimum hem de aylık ortalama AKM yükleri dikkate alınırsa Galanima Deresi Havzası’na kıyasla Değirmendere Havzası’nda daha yoğun katı madde taşınımı olduğu görülmektedir.

AKM konsantrasyonu yerleşim yerlerinden dışarı edilen atıksu, tarımsal faaliyetler, erozyon, yağış, sanayi faaliyetleri ve akarsu yatağında yapılan düzenleme çalışmaları gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Ülkemiz havzalarında AKM takibini konu alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, sunulan çalışmanın söz konusu havzaların planlanması bakımından yararlı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada akım gözlem istasyonu mevkiilerinde seçilmiş AKM gözlem istasyonları hariç diğer istasyonlardan geçen debi değerleri bilinmemekte dolayısıyla da AKM yükleri hesap edilememektedir. Bu nedenle AKM yüklerinin havza genelinde bilinebilmesi için aynı zamanda diğer istasyonlardaki debi miktarını da belirleme çalışmalarına başvurulabilir.

Çalışma kapsamında AKM ve akım takibi yapılmış olup gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda diğer parametreler (bulanıklık, elektriksel iletkenlik vb.) de çalışılabilir.

AKM takibine yönelik literatür incelendiğinde yüzey suyu örneklemelerinin mevsimsel, aylık, 15 günlük ve haftalık olarak ilgili gün ve istasyonlarda tek bir örnekleme ile yapıldığı görülmektedir. Özellikle insani müdahalenin yoğun olduğu akarsularda örnekleme sıklığı ve gün içerisindeki örnekleme sayısının artırılmasının (sabah ve akşam olacak şekilde günde iki defa) AKM taşınımının anlaşılmasında faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Betül METE: çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, analizi ve yorumlama, makalenin yazılması ve gerekli düzeltmelerin yapılması. Osman Tuğrul BAKİ: veri toplama, makalenin yazılması ve gerekli düzeltmelerin yapılması. Adem BAYRAM: çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makalenin yazılması ve gerekli düzeltmelerin yapılması.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

Kaynaklar

References

- APHA (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th ed., American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), Washington (DC).
- Atmaca, M. (2005). *Tarih içinde Tonya*. Tonya Belediyesi Yayınları.
- Bayazıt, M. & Avcı, İ. (2010). *Akarsularda akım ve sediment taşınımı*. Birsen Yayınevi.
- Bayram, A. (2011). *Harşit Çayı su kalitesinin mevsimsel değişiminin incelenmesi ve askı madde konsantrasyonunun yapay sinir ağları yöntemi ile tahmin edilmesi*. [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Boran, M., Karaçam, H. & Sayın, A. (2004). Değirmendere Havzasında (Trabzon, Türkiye) bulunan bazı işletmelere ait atık suların özelliklerinin incelenmesi ve dere suyundaki kirleticilerin düzey ve dağılımlarının belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 21(1), 17-21.
- Celep, S. (2009). *Trabzon İli yeraltı ve yerüstü sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal incelenmesi ve su kalitesinin izlenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- DSİ, (2019). *2019 yılı haritalı istatistik bülteni*. (2021, 15 Kasım). <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/769>
- Erdoğan, İ. (2019). *Doğu Karadeniz Havzası akarsularında su kalitesinin incelenmesi ve askıda katı madde konsantrasyonunun tahmin edilmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Makul, O. (2015). *Havza yönetimine yönelik coğrafi veritabanı tasarımı: Trabzon Yomra Özdil Havzası örneği*. [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Mete, B. (2020). *Tersip bentlerinin askıda katı madde taşınımına etkilerinin incelenmesi: Sera Deresi Havzası (Trabzon) örneği*. [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Mutlu, T. & Verep, B. (2018). The water quality of streams flowing into South Eastern Black Sea Coasts in terms of physico-chemical properties. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(5A), 3752-3758.
- Satılmış, U. (2015). *Değirmendere Havzası (Trabzon) yerüstü su kalitesinin mekâna ve zamana bağlı değişiminin incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Sayın, A. (2000). *Değirmendere Havzasında bazı kirleticilerin düzeyleri ve ortama etkileri*. [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Serdar, S. (2015). *Doğu Karadeniz Havzası akarsularının fiziko-kimyasal su kalitesi mevsimsel değişimlerinin belirlenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Sivakumar, B. (2006). Suspended Sediment load estimation and the problem of inadequate data sampling: a fractal view. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(4), 414-427. <https://doi.org/10.1002/esp.1273>
- Trabzon İÇDR (2020). *Trabzon ili 2019 yılı çevre durum raporu*. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü.
- TSE (2007). *Su kalitesi-askıdaki katı maddelerin tayin-i cam elyaf süzgeçler kullanılarak süzme yöntemi (TS EN 872)*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TÜİK (2021). *Türkiye İstatistik Kurumu, coğrafi istatistik portalı*. (2021, 15 Kasım). <https://cip.tuik.gov.tr/>
- Ülke, A., Özkul, S. & Tayfur, G. (2011). Ampirik yöntemlerle Gediz Nehri için askıda katı madde yükü tahmini. *İMO Teknik Dergi*, 22(107), 5387-5407.
- Yang, C.T. (1996). *Sediment transport theory and practice*. McGraw-Hill.

***Ophrys mammosa* subsp. *mammosa* Desf.'nin stolon anatomisi**

Stolon anatomy on Ophrys mammosa subsp. mammosa Desf.

Mehmet AYBEKE*^{1,a}

¹Trakya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Balkan Yerleşkesi, Merkez, Edirne, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 06.01.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 08.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 13.05.2022

Öz

Yapılan detaylı literatür incelemeleri neticesinde orkidelerin stolon anatomisine yönelik sınırlı sayıda çalışmanın bulunduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma ile Türkiye’de yayılış gösteren *Ophrys mammosa* subsp. *mammosa* taksonunun stolon anatomisi incelenerek cinsin yumru ontogenisinin açıklanmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır. Materyal olarak *O. mammosa* subsp. *mammosa* stolonlarında historesin kiti ile gömme preparatlardan mikrotom kesitleri alınmış ve toluidin blue ile boyanmıştır. Anatomik kesitlerden; stolonun orta kısmının boşluklu ve meristele düzeni iletim demetlerinin asimetrik olarak dağıldığı ve alt tarafında statosit hücrelerinin varlığı, en dışta bir sıra velamen ve altında birkaç sıralı ekzodermisin varlığı, içte parankimatik bir geniş korteksin olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; orkide stolon anatomisinin, ileride gelişecek olan yumruya kısmen benzediği vurgulanmış ve bulguların yumru biyolojisi açısından önemi tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Anatomi, *Ophrys*, Orkide, Stolon

Abstract

As a result of the detailed literature reviews, it has been determined that there are a limited number of studies on the stolon anatomy of orchids. In this study, *Ophrys mammosa* subsp. *mammosa* taxon by examining the stolon anatomy of the, it is aimed to contribute to the explanation of the tuber ontogeny of the genus. As material, microtome sections were taken from the embedding preparations with historesin kit in *Ophrys mammosa* subsp. *mammosa* stolons and stained with toluidin blue. From anatomical sections; It was determined that the vascular bundles in the middle part of the stolon are spaced and meristele distributed asymmetrically and the presence of statocyte cells in the lower part, the presence of a velamen in the outermost and several rows of exodermis under it, and an inner parenchymatic wide cortex. As a result; It has been emphasized that the anatomy of the orchid stolon is partially similar to the tuber that will develop in the future, and the importance of the findings in terms of tuber biology is discussed.

Keywords: Anatomy, *Ophrys*, Orchid, Stolon

*a Mehmet Aybeke; mehmetaybeke@trakya.edu.tr, Tel: (0284) 2352824, orcid.org/0000-0001-9512-5313

1. Giriş

1. Introduction

Bitkilerin en büyük ailesi olarak kabul edilen Orchidaceae, 25.000–35.000 türden oluşur (Attri vd., 2020). Buna göre, Türkiye'deki Orchidaceae üyelerinin sayısı, kaynaklara göre değişmektedir. Bu rakam, Boissier (1884)'e göre 15 cins 60 tür, Keller & Schlechter (1928)'e göre 10 cins 69 tür, Renz & Taubenheim (1984)'a göre 24 cins 103 tür, Sezik (1967)'e göre ya 18 cins 87 tür, ya da 24 cins 73 tür (Sezik, 1984) veya 24 cins 90 türdür (Sezik, 1982). Kreutz (2000) ise kendi çalışmasında kullandığı değişik sinonimlerle ve tanıttığı yeni türlerle birlikte, Türkiye orkidelerine 49 takson daha ilâve etmiştir. Güncel verilere göre Orchidaceae familyası Türkiye'de 24 cins ve bu cinslere ait 180'in üzerinde tür, alttür ya da varyete ile temsil edilmektedir (Güner vd., 2012). Türkiye Orchidaceae üyeleri içerisinde takson sayısı bakımından en geniş cinslerden birisi olan *Ophrys* L. (Arısalebi) ülkemizde 54 tür ile temsil edilmektedir (Güner vd., 2012). Yumrulu Orchidaceae cinsleri arasında yer alan *Ophrys* üyeleri salep elde edilmişinde kullanılmaktadır (Sezik, 1984).

Araştırma konusu olan *Ophrys mammosa* Desf. türü Türkiye'de subsp. *leucophthalma* (Devillers-Tersch. & Devillers) Kreutz, subsp. *mammosa* Desf. ve subsp. *posteria* B.Baumann & H.Baumann olmak üzere üç alttür ile temsil edilmektedir (Güner vd., 2012). Bu çalışmada *O. mammosa* subsp. *mammosa* (Kedikulağı) alttürünün stolon anatomisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu takson, 20-50 cm, 3-6(-9) dikdörtgenimsi-ovat veya lanseolat yaprakları rozet halindedir. Spika 1-2 ya da çok çiçeklidir. Sepaller yeşil, 14 mm'ye kadar uzunlukta, ovat-lanseolat şeklindedir. Petaller ovat-lanseolat veya ligulate, 9 mm'ye kadar uzunlukta, tüysüz, kırmızımsı veya çok ince tüylü, sarımsı veya kahverengimsi-yeşildir. Labellum yuvarlak veya oval, genellikle ± düz veya hafif bükülmüş, 16 x 16 mm boyutlarında, genelde tam yapılı (bölünmemiş ya da küçük çentikli), uçta çok küçük mukronat şekilde biterken, tabana yakın iki yuvarlak çıkıntılıdır. Çıkıntılar genellikle dış kısımları villoz, koyu kestane rengi ile siyahımsı-kahverengi kadifemsidir. Spekulum az çok H şeklinde, soluk mavimsi, tüysüzdür. Çiçeklenme 3-5. aylar arasındadır (Renz & Taubenheim, 1984).

Türkiye ve yakın coğrafyadaki orkideler karasal özelliktedir ve bu orkideler üzerinde değişik anatomik çalışma yapılmıştır. Örneğin Kasaplıgil (1961), Orta Anadolu'dan topladığı *Orchis*

mascula (L.) L. yaprak örnekleri ile İtalya'daki aynı taksona ait örnekleri anatomik olarak karşılaştırmış ve yapraklarda epidermis, stoma ve mezofil dokularında önemli bulguları tespit etmiştir. Özellikle Stern (1997), karasal orkidelerde anatomik ve taksonomik ekseninde önemli bulgulara ulaşmıştır. Araştırmacı çalışmasında, değişik Akdeniz ülkelerinden elde ettiği orkideleri (*Ophrys*, *Orchis* Tourn. ex L., *Platanthera* Rich., *Serapias* L., *Aceras* R.Br., *Anacamptis* Rich., *Barlia* Parl., *Dactylorhiza* Neck. ex Nevski taksonları) yaprak, kök ve yumru anatomisine göre incelemiştir. Prete & Miceli (1999), *Orchis mascula* ve *O. provincialis* Balb. ex Lam. & DC. gruplarının taksonomik ve sistematik problemlerini, yaprak ve gövde anatomisi ile çözümlenmişlerdir. Bir başka çalışmada; Aybeke vd. (2010) 27 farklı *Ophrys*, *Orchis* ve *Dactylorhiza* taksonunda kök, gövde, yaprak, yumru anatomisini ayrıntılı olarak incelemiş ve taksonların tanımlayıcı ve diagnostik anatomik karakterlerini ortaya koymuşlardır. Yine Aybeke (2012) yaptığı çalışmada 13 farklı tuberli / rizomlu taksonda (*Cephalanthera* Rich., *Epipactis* Zinn, *Limodorum* Ludw. ex Kuntze, *Spiranthes* Rich., *Platanthera*, *Serapias*, *Himantoglossum* Spreng., *Anacamptis*) detaylı anatomik karakterlerle taksonların tuber veya rizoma bağlı olarak anatomik tablo anahtarlarını oluşturmuştur. Aynı araştırmacı tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada Türkiye'de bulunan orkide alt familyaları, (karasal Orchidoideae, Epidendroideae) trake özelliklerine göre taksonomik ayırımını sağlamıştır (Aybeke, 2017). Bir başka çalışmada Süngü Şeker vd. (2021) bazı orkide taksonlarında (*Cephalanthera*, *Coeloglossum* Hartm., *Dactylorhiza*, *Gymnadenia* R.Br., *Himantoglossum*, *Limodorum*, *Orchis*, *Platanthera*, *Serapias*, *Spiranthes*, *Stevieniella* Schltr. spp.) damar morfometrisi ve topolojisi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kolcu (2014) tarafından yapılan bir yüksek lisans tezinde Ordu ilinde yayılış gösteren bazı *Cephalanthera*. taksonlarının kök, gövde ve yaprak anatomileri incelenmiş ve ayırt edici anatomik karakterler tespit edilmiştir. Akbulut vd. (2017), farklı ekolojik koşullardaki *Spiranthes* örneklerinde yaprak stoma boyut ve özelliklerindeki farklılıklarını, buldukları ortam özelliklerine göre değerlendirmişlerdir. Öztürk (2020), Eskişehir ilinde yayılış gösteren *Orchis simia* Lam. örneklerinde anatomik özellikleri incelemiştir. Bir başka çalışmada *Stevieniella satyrioides* (Spreng.) Schltr.'in detaylı anatomik özellikleri tespit edilmiştir (Akbulut vd., 2019).

Yukarıda verilen literatür özeti ışığında birçok karasal orkide taksonunda yapılan anatomik çalışmaların oldukça faydalı sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur. Dış morfolojik karakterler kadar, iç morfolojik (anatomik) karakterlerin de orkide taksonomisinin ve anatomisinin aydınlatılmasına katkı sağlayacağı önemli bir husustur (Prete & Miceli 1999; Kocyan & Endrens 2001; Stpiczynska 2001). Orkideler üzerinde yapılan araştırmalara rağmen stolon üzerinde çalışmaların sınırlı ve yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Örneğin; Diurideae tribusunda (Orchidaceae) stolonlarda epidermis, velamen-eksodermis, parankima, iletim dokusu özellikleri incelenmiştir (Pridgeon & Chase, 1995). Bir başka çalışmada Rodrigues vd. (2017), farklı *Utricularia* L. (Lentibulariaceae) taksonlarında stolonların dış ortam koşullarına bağlı olarak kurak koşullarda su depo etme özelliğine sahip olduğunu, orkide stolonlarında ise epifit taksonlarda stolonun fotosentez yeteneğine sahip olduğunu belirtmiştir. Stolon, orkidelerde yumru oluşumu öncesi görülen bir metamorfoze organdır ve ileride yumru ontogenesisine doğrudan katılacaktır. Orkide yumrusu, salep elde edilmesinde ve ilaç olarak oldukça önemlidir (Sezik, 1984). Ayrıca ülkemizde orkidenin tarla tarımında ekimi gerçekleştirilmekte ve tarımsal kalkınmaya katkı sağlamaktadır (Salep Eylem Planı, 2014). Esas hedef; yumru biyolojisinin detaylı olarak ortaya çıkarılmasıdır. Çünkü yumru biyolojisi, tarımsal ekonomi açısından oldukça önemli olup birçok çiftçiye getirisi vardır ve yumru gelişiminin ilk basamağı olan stolonun anatomisi hakkında bilgiler çok az veya yetersizdir. Ayrıca *Ophrys mammosa*'da

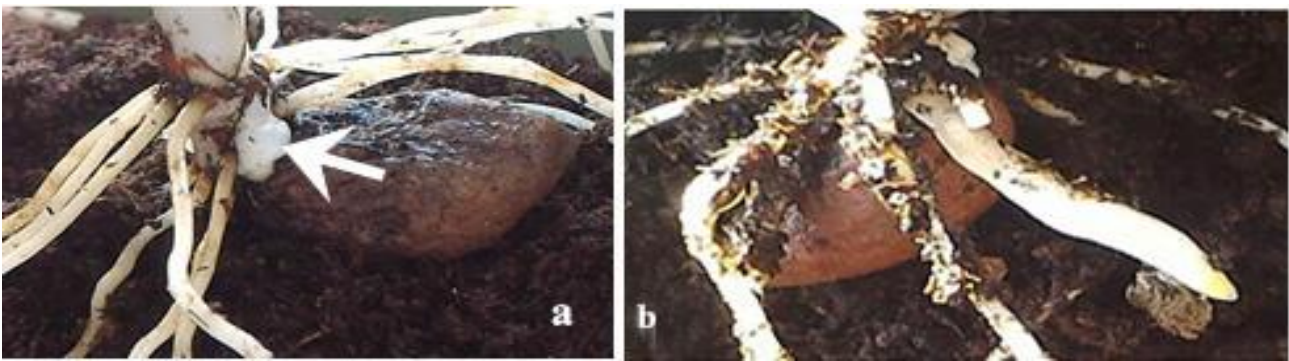
stolon anatomisi hiç çalışılmamıştır. Dolayısıyla bu hedefe yönelik olarak, bu çalışmada *Ophrys mammosa* subsp. *mammosa*'da stolon anatomisi araştırılmıştır. Bu anatomik özelliklerin tespit edilmesi makalenin özgün değerini de artırmaktadır.

2. Gereç ve yöntem

2.1. Material and method

Çalışmada *Ophrys mammosa* subsp. *mammosa* (Orchidaceae)'nın araziden toplanan örnekleri (A1, Merkez, Edirne (Türkiye), çamlık alan, 18. 04. 2001), bir sonraki yıl saksıda ekilerek stolon gelişmeleri takip edilmiştir. Toplanan örneklerin bir kısmı, EDTU 8206 numara ile herbaryumda (Trakya Üniversitesi Herbaryumu) muhafaza edilmiştir.

Örnekler, saksıdan çıkarılma sonrasında carnoy fiksatifinde (3: alkol %96, 1: glasiyal asetik asit) ile fikse edilip sonrasında %96 alkol ile yıkayıp, %70 alkolde saklanmıştır. Materyal sırayla 1'er gece alkol serilerinde (%70, %80, %90, %96, absolu alkol) geçirildikten sonra 1:1 absolu-alkol: resin - aktivatör karışımında 1 gece bekletildi. Sonrasında saf resin aktivatör karışımında en az 1 gece bekletilip doğrudan özel Merck gömme kalıplarında saf basic resin aktivatör-hardener karışımında gömülmüştür (O'Brien vd., 1964). Kesitler, 5µ kalınlığında Leica RM 2235 mikrotom ile alınmıştır. Kesitler O'Brien vd. (1964) metoduna göre toluidin blue ile boyanıp, entellan ile daimi preperat haline getirilmiştir. Fotoğraflar, Olympus CX-21 Fotomikroskop ile çekilmiştir.



Şekil 1. a. Stolonun ana gövdeden çıkışı (ok), **b.** gelişmiş stolon,
Figure 1. a. The exit of the stolon from the stem (arrow), **b.** advanced stolon,

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Results and discussion

Stolonun, ana gövdeden yeni çıkışı Şekil 1a'da gösterilmektedir. Gelişmiş stolon ise Şekil 1b'dedir. Stolonun öz kısmı boşlukludur (Şekil 2a). Ana gövdeden iletim demetlerinden gelişen bir

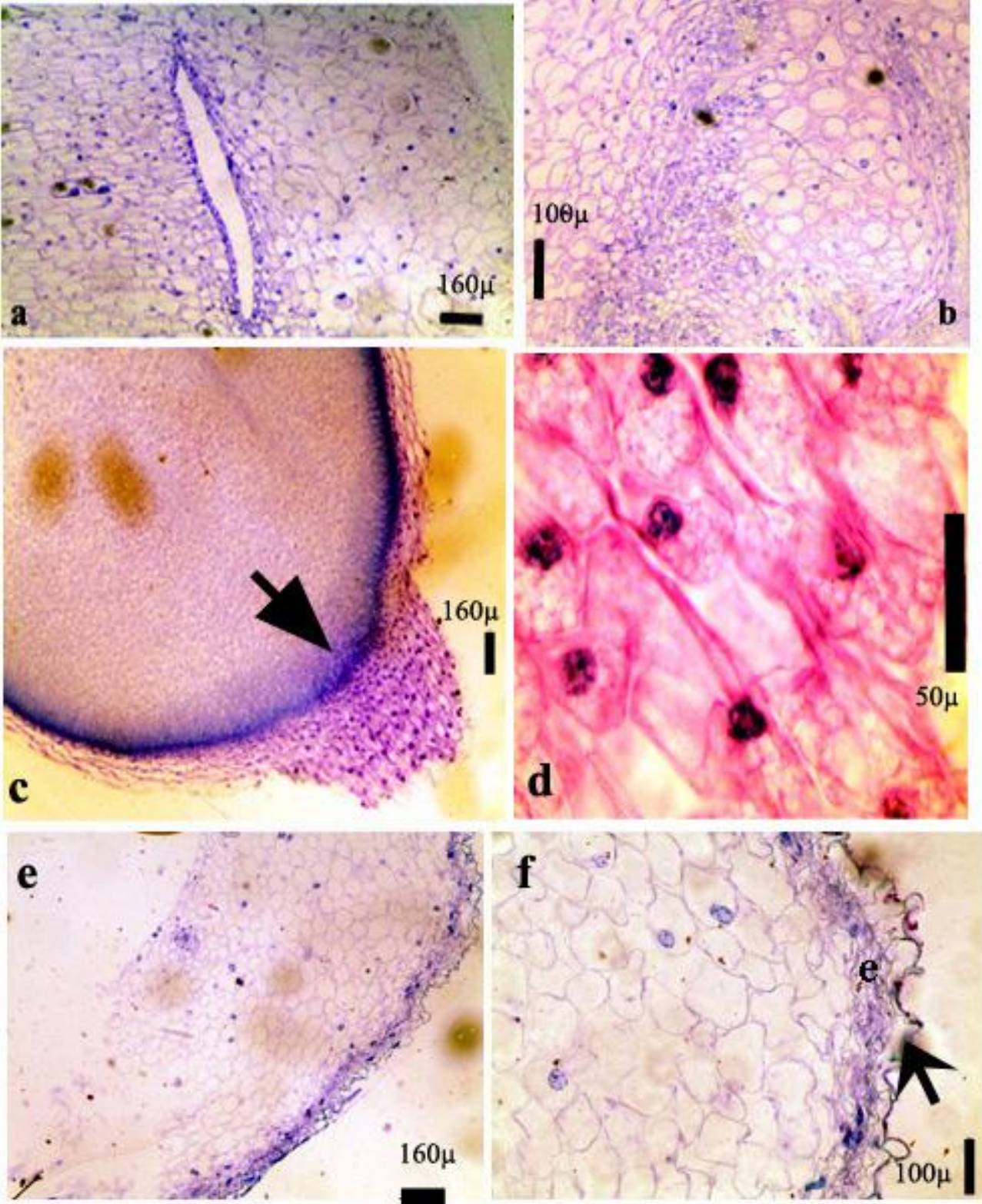
grup iletim demeti lateral olarak ve üzerinde bir grup parankima hücresi ile birlikte dışarı doğru çıkış oluşturmaktadır (Şekil 1b). Stolon ucunda meristem dokuları ve statosit hücreleri vardır (Şekil 2c-d).

Gelişmiş stolonunda, en dışta 1 sıralı büyük velamen hücreleri ve altında birkaç sıralı ezik ekzodermis

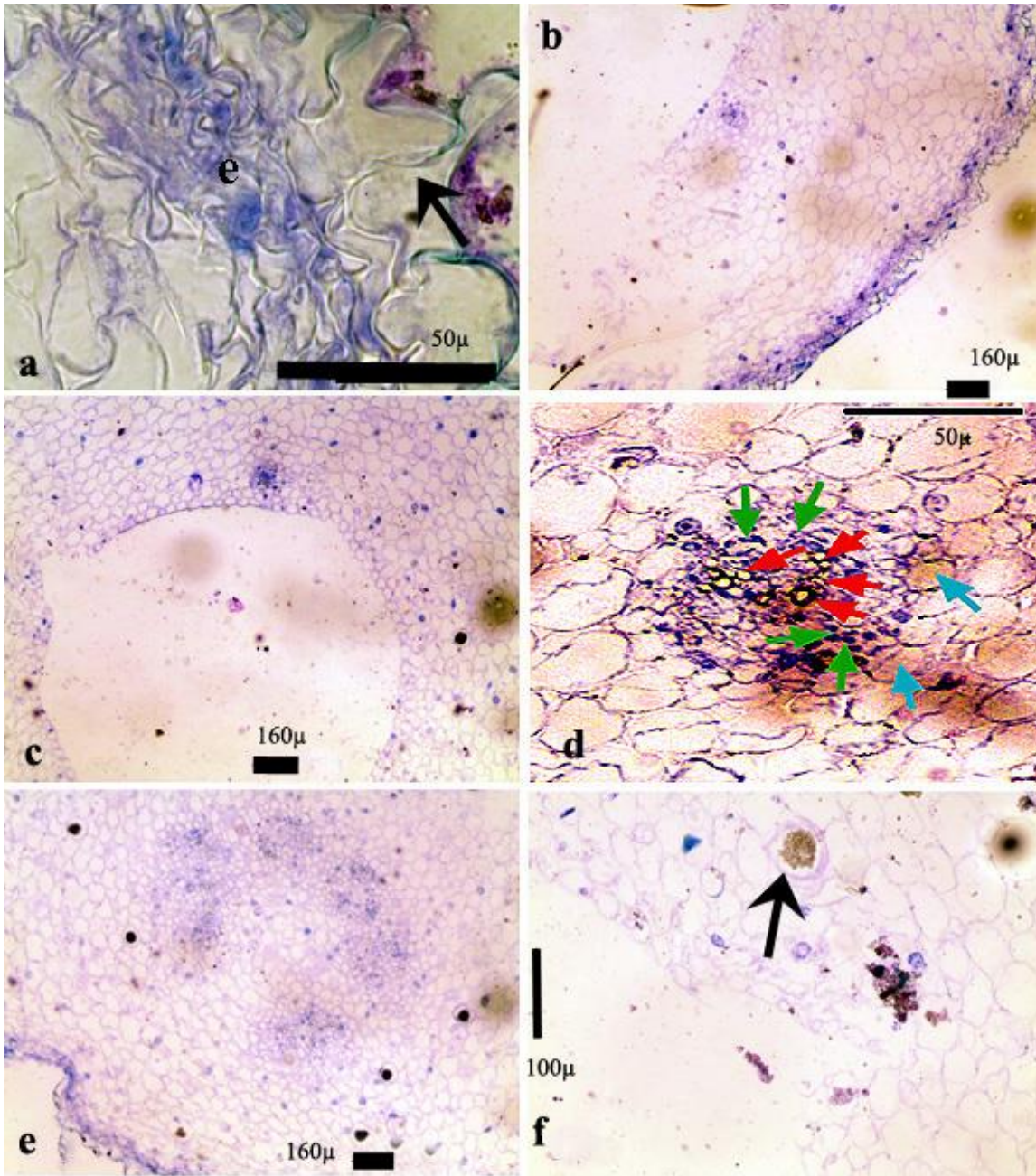
hücreleri vardır (Şekil 2f, 3a). Velamen hücreleri, ekzodermise göre daha büyüktür ve hücreler girintili-çıkıntılı çeperlidir. Stolonun iç kısmında geniş parankimatik bir temel doku bulunur ve ortası boşluklu dairesel yapılıdır (Şekil 3b-c). Parankima hücreleri geniş vakuollüdür. İletim demeti meristele yapısındadır ve stolonun bir tarafında meristeleler birkaç adetken, diğer tarafında ise 1 tanedir (Şekil 3d-e). Meristele yapısında ksilem trakeleri parçalı olarak bulunurken, etrafında floem dokusu gruplar halinde bulunmaktadır ve her meristele bir endodermis ile sarılıdır (Şekil 3d). Stolon iç boşluğu saran epidermal hücreler muntazam bir sıra halindedir ve bunun altındaki parankimatik dokuda seyrek rafid kristalleri bulunur (Şekil 3f).

Orkide stolon anatomisi hakkında literatür taramasında sadece bir çalışmaya rastlanmıştır. Orkidelerde yapılan bir çalışmada; dropper (stolon benzeri sürgün) ve stolonoid köklerde velamen ve ekzodermis olsa da incelenen taksona bağlı olarak çok hücreli veya tek hücreli tüyler tespit edilmiştir. Ayrıca bu tüylerin mikoriza ile alakalı olduğu da belirtilmiştir. Çok hücreli trikolar Caladeniinae, Acianthinae, *Pterostylis* R.Br. ve *Prasophyllum* R.Br. taksonları dropper ve stolonoid köklerinde bulunmuştur (Pridgeon & Chase, 1995). İlâveten bu çalışmada (Pridgeon & Chase, 1995), dropper ve stolonoid köklerin basit bir epidermisle çevrili iken, *Corybas recurvus* D.L.Jones, *Cyanicula gemmata* (Lindl.) Hopper & A.P.Br.'da ise dropper ve stolonoid köklerin velamen ve ekzodermis ile çevrildiği açıklanmıştır. Velamenli bu taksonlarda eksodermis tek sıralı olup hücreleri eliptik, dikdörtgenimsi ya da poligonaldır. Dış periklinal ve radyal çeperlerin daha kalınlaştığı görülmüştür. Velamenin bulunduğu yerde katman sayısı taksona bağlı olarak bir ile üç arasında değişmiştir. Velamen hücreleri eliptikten poligonaldır ve genellikle periklinal olarak basık olup, hücre çeperleri çeşitli şekillerde suberizedir. Ancak süberinizasyon, genellikle sadece en dış velamen tabakasının dış periklinal çeperlerinde görülmüştür. İlâveten; stomalar, basit epidermis veya velamende nadiren görülse de stoma beççi hücrelerinin işlevsiz olduğu tespit edilmiştir (Pridgeon & Chase, 1995). Korteks parankimasında mikorizal infeksiyon hifleri ve pelotonlar, rafid kristalleri ve nişasta taneleri görülmüştür. İletim dokusu kollateral demetler şeklinde olup, her demet floem ve en dıştan periskl ile çevrili olduğu belirtilmiştir (Pridgeon & Chase, 1995).

Orkide dışı diğer stolon çalışmaları ile ilgili tespit edilen bulgular şöyledir: Örneğin; *Dioscorea alata* L.'da iç kortikal bölgedeki hücrelerin yeniden meristem özelliğine geçmesi ile stolonun gelişmeye başladığı ve yeni kökün demetlerinin, bir grup depo parankiması ile ana gövde iletim demetlerine bağlantılı olduğu belirtilmiştir (Wickham vd., 1981). Bir başka çalışmada; stolon yapısının su depo özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu özelliğe sahip stolonların anatomisi *Utricularia reniformis* A.St.-Hil. ve *U. nelumbifolia*'da incelenmiştir. Çalışmada stolon etrafında epidermis, parankimatik korteks, floemle çevrili merkezi bir silindir görülmüştür. Epidermiste trikomlara rastlanmıştır. *U. nelumbifolia* Gardner stolon kesitlerinde, korteksde çok sayıda lakünler, geniş vakuollü parankima hücreleri tespit edilmiştir. Ayrıca yazarlar, stolonların, ışığa maruz kaldığında fotosentez yaptığı belirtmiştir (Rodrigues vd., 2017). Bir başka çalışmada stolonun büyüme eksenine dik yönde ortaya çıktığı ve stolon büyümesinin, yumru başladıktan sonra durduğu belirtilmiştir (Aksenova vd., 2012). Bromeliaceae üyelerinde stolon anatomisinde belirgin korteks, parankimatik bir öz bölgesi, ataktoste iletim demet yapısı ve suberize hücrelere sahip çok katmanlı koruyucu doku tespit edilmiştir (Silva vd., 2018). Bu çalışmada ise Kedikulağı orkidesinde stolon iletim demet yapısı meristele tipde olup, stolonun öz kısmında boşluk vardır. Stolonun bir tarafında tek meristele varken, diğer tarafında ise birkaç adet meristele vardır. Bizim düşüncemize göre; çok meristeleli olan stolon bölgesi ileride orkide yumrusunun kökenini oluşturacaktır. Ayrıca stolon dış tabakalarında yumru anatomisine benzer bir velamen ve ekzoderma bulunması, bu düşüncüyü desteklemektedir (Stern, 1997; Aybeke vd., 2010; Aybeke, 2012). Dolayısıyla bu çalışma bulgularının, gerek orkide gerekse orkide dışı diğer stolon bulgularından farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu farklılığın çevre koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim diğer çalışmalarda (Pridgeon & Chase, 1995) incelenen orkideler epifitken bu çalışmada incelenen Kedikulağı orkidesi (*Ophrys mammosa* subsp. *mammosa*) ise karasaldır. Nitekim Rodrigues vd. (2017) de stolonların dış ortam koşullarına bağlı olarak kurak koşullarda su depo etme özelliğine sahip olduğunu, epifit orkidelerde ise fotosentez yeteneğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. İlâveten; bulgularımızda stolonda herhangi bir kök tüyü bulunmamıştır. Muhtemelen iletim demetleri olan meristele ile ana gövdeden iletim yapıldığı düşünülmektedir. Velamen hakkında değişik görüşler vardır:



Şekil 2. a. Stolonun öz boşluğu, b. stolonun ana gövdeden bir grup iletim demeti ile çıkışı, c. stolon ucu meristem (ok), d. statosit hücrelerinde nişasta, e. stolonun yanal duvarı, f. velamen (ok) ve ekzodermis (e).
Figure 2. a. The medullar space of the stolon, b. exit of the stolon from the stem with a group of vascular bundles, c. stolon tip meristem (arrow), d. starch in statocyte cells, e. lateral wall of stolon, f. velamen (arrow) and exodermis (e).



Şekil 3. a. Stolon anatomik kesitleri. Velamen (ok) ve ekzodermal hücreler (e), **b.** parankimatik doku, **c.** stolon öz boşluğu, **d.** meristele (yeşil oklar floemi, kırmızı oklar ksilemi, mavi oklar endodermisi gösterir), **f.** druz kristali (ok).

Figure 3. a. Stolon anatomical sections. Velamen (arrow) and exodermal cells (e), **b.** parenchymatous tissue, **c.** stolon medullar space, **d.** meristele (green arrows indicate phloem, red arrows show xylem, blue arrows indicate endodermis), **f.** raffide crystal (arrow).

Velamen, yumruda veya köklerde sünger gibi bir işleve sahiptir ve su geçişini sağlamaktadır (Haberlandt, 1914; Dycus & Knudson 1957; Benzing vd., 1976). Bu nedenle velamenleri en kalın olan türler, kurak orman koşullarına uyum sağlamış türler olarak kabul edilmektedir (Sanford, 1973). Bu düşünceler, epifit olan orman ağaçları üzerinde yaşayan tropikal orkideler için geçerlidir. Zira bu gruplarda, akan yağmur sularının velamen tarafından bir iç basınç ile bitkiye kazandırıldığı ve bu basınç sırasında hücrede bir katlanmanın

olmaması için çeperlerde kalınlık olduğu belirtilmiştir (Noel, 1974). Tersine, karasal orkidelerde velamen çeperlerinde süberin ve ligninin bulunması (Aybeke vd., 2010), 4-5 sıralı ve değişik şekillerde çeperlere (ezilmiş, girintili-çukuntulu, poligonal vb) sahip olması nedeniyle velamenin sağlam bir doku olduğu ve toprakta büyüme ve ilerleme sırasında iç dokuları örterek koruduğu düşünülmektedir. Hatta velamen kalınlığının, taksonlar arasında bile farklı bir karakter olduğu tespit edilmiştir (Aybeke vd.,

2010). Buna göre velamen Kedikulağı orkidesinde 3 sıralı ve yaklaşık 80 π kadardır. Keza, ekzodermisde görülen ezik hücrelerin, velamene ilaveten bir “tampon” görevi gördüğü tahmin edilmektedir. Bu çalışmada görülen stolon velameninin, ileride oluşacak olan yumru velamenine çeper özellikleri nedeniyle benzerlik gösterdiği görülmüştür.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Sonuç olarak; stolonda velamen, ekzodermis, temel doku ve meristele özellikleri ile yeni gelişecek olan yumruya oldukça benzediği tespit edilmiştir. Yumru anatomisinde de 3 sıralı velamen, ekzodermis, nişasta ve müsilaj içeren temel doku ve meristele bulunmaktadır (Aybeke, 2004, 2012; Aybeke vd., 2010). Yumru ontogenisi sürecinde stolondan yumruya dönüşümün tespiti için detaylı anatomik çalışmalar gereklidir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu konuda yürütülecektir. Çalışma bulguları, hem genel stolon anatomisi hem de özelde orkide stolonu açısından özgün niteliklere sahiptir. Sonuçların orkide yumru biyolojisine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “TÜBAP 2020-94” kodlu proje ile desteklenmiştir.

Yazar katkısı

Yazar, tüm çalışmayı kendi yapmıştır.

Etik beyanı

Yazar, tüm çalışmayı kendi yapmıştır. Çalışmanın etik herhangi bir kusuru yoktur.

Çıkar çatışması beyanı

Tüm çalışma, yazarın kendi özgün araştırması olup, herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Kaynaklar

References

Akbulut, M. K., Süngü Şeker, Ş. & Şenel, G. (2017). Farklı ekolojik koşullarda yetişen *Spiranthes spiralis*'in (Orchidaceae) yaprak stoma özellikleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 372-376. <https://doi.org/10.5578/fmbd.58663>

Akbulut, M. K., Süngü Şeker, Ş. & Şenel, G. (2019). Monotipik *Steveniella satyrioides* türünün anatomik morfolojik ve mikromorfolojik özellikleri. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 573-584. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.603395>

Aksenova, N.P., Konstantinova, T.N., Golyanovskaya, S.A., Sergeeva, L. I. & Romanov, G.A. (2012). Hormonal regulation of tuber formation in potato plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 59 (4), 451-466. <https://doi.org/10.1134/S1021443712040024>

Attri, L.K., Bhanwra, R.K. & Nayyar, H. (2020). Pollination induced embryology studies in *Aerides multiflora* (ROXB.). *International Journal of Botanical Studies*, 5(4), 211-215.

Aybeke, M. (2004). *Trakya Bölgesi'nde Yetişen Bazı Orkide Türleri Üzerinde Anatomik Araştırmalar* [Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Aybeke, M. (2012). Comparative anatomy of selected rhizomatous and tuberous taxa of subfamilies Orchidoideae and Epidendroideae (Orchidaceae) as an aid to identification. *Plant Systematic and Evolution*, 298(9), 1643-1658. <https://doi.org/10.1007/s00606-012-0666-9>

Aybeke, M., Sezik, E. & Olgun, G. (2010). Vegetative anatomy of some *Ophrys*, *Orchis* and *Dactylorhiza* (Orchidaceae) taxa in Trakya region of Turkey. *Flora*, 205(2), 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2008.11.009>

Aybeke, M. (2017). Vessel anatomy studies in orchids (Orchidaceae). *Acta Biologica Turcica*, 30(4), 89-93.

Benzing, D. H., Henderson, K., Kessle, B. & Sulak, J. (1976). The absorptive capacities of bromeliad trichomes. *American Journal of Botany*, 63, 1009-1014.

Boissier, E. (1884). Flora Orientalis sive enumeratio plantarum in oriente a Graecia Et Aegyptia and Indiae. *Fines Hucusque Observatorum Auctore, Monocotyledonearum*. 5, 74-80, Cenevre.

Dycus, A. M. & Knudson, L. (1957). The role of the velamen of the aerial roots of orchids. *Botanical Gazette*, 119, 78-87.

Güner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M. ve Babaç, M.T. (2012). *Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)*. Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği yayımı.

Haberlandt, G. F. J. (1914). *Physiological plant anatomy*. Macmillan Co.

- Kasaplıgil, B. (1961). Foliar xeromorphy of certain geophytic monocotyledons. *Madrono*, 16, 43-70.
- Keller, G. & Schlechter, R. (1928). *Monographie und Iconographie der orchideen europas und mittelmeergebietes, 1, repert. specierum nov. regni vegetabilis. Sonderbeiheft A*. Verlag Dei Repertorium.
- Kocyan, A. & Endress, P. K. (2001). Floral structure and development of Apostasia and Neuwiedia (Apostasioideae) and their relationships to other Orchidaceae. *International Journal of Plant Sciences*, 162(4), 847-867.
- Kolcu, S. S. (2014). *Ordu yöresinde yayılış gösteren bazı Cephalanthera L.C.M. Richard (Orchidaceae) türleri üzerinde morfolojik, mikromorfolojik ve anatomik bir araştırma* [Yüksek lisans tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Kreutz, V.J.A. (2000), Orchidaceae. In: Güner, A., Özhatay, N., Ekim, T. & Başer, K.H.C. (Eds.), *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*. (Supplement 2), pp. 274-305, Edinburg Univ. Press.
- Noel, A. R. A. (1974). Aspects of cell wall structure and development of the velamen in *Ansellia gigantea* Reichb.f. *Annales of Botany*, 38, 495-504.
- O'Brien T. P., Feder, N. & McCully, M. E. (1964). Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. *Protoplasma*, 59, 368-373. <https://doi.org/10.1007/BF01248568>
- Öztürk, D. (2020). Morphological, anatomical and ecological studies on *Orchis simia* (Orchidaceae) taxon of Eskişehir, Turkey. *Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3(2), 110-115. <https://doi.org/10.46239/ejbc.729798>
- Prete, C. D. & Miceli, P. (1999). Histoanatomical and taxonomical observations on some central mediterranean entities of *Orchis* sect. *Labellotrilobatae* P.Vermeul. subsections *Masculae* Newski and *Provinciales* Newski (Orchidee). *Caesiana, Quaderno 12*, 21-44.
- Pridgeon, A. M. & Chase, M. W. (1995). Subterranean axes in tribe Diurideae (Orchidaceae): morphology, anatomy, and systematic significance. *American Journal of Botany*, 82(12), 1473-1495.
- Renz, J. & Taubenheim, G. (1984), Orchidaceae. In: Davis, P.H. (Ed.), *The flora of Turkey and the East Aegean Islands*, Vol.8. pp. 450-552, Edinburg Univ. Press.
- Rodrigues, F. G., Marulanda, N. F., Silva, S. R., Plachno, B. J., Adamec, L. & Miranda, V. F. O. (2017), Phylogeny of the 'orchid-like' bladderworts (gen. *Utricularia* sect. *Orchidioides* and *Iperua*: Lentibulariaceae) with remarks on the stolon-tuber system. *Annals of Botany*, 120, 709-723. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx056>
- Salep Eylem Planı. (2014). *Salep Eylem Planı 2014-2018*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü. <https://web.ogm.gov.tr/ekutuphane/Yayinlar/Salep%20Eylem%20Plan%C4%B1.pdf>
- Sanford, W. W. (1973). The ecology of orchids. In Withner, C. L. (ed). *The Orchids: A Scientific Survey* (Vol. 2, ss. 1-100). Ronald Press Co.
- Sezik, E. (1984). *Orkidelerimiz, Türkiye'nin Orkideleri*. Sandoz Kültür Yayınları.
- Sezik, E. (1967). *Türkiye'nin Salepgilleri, Ticari Salep Çeşitleri ve Özellikle Muğla Salebi Üzerinde Araştırmalar* [Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Sezik, E. (1982). Türkiye'de Orchidaceae familyası. *IV. Bitkisel İlaç Hammaddeleri Toplantısı* (ss 77-83), Eskişehir.
- Stern, W. L. (1997). Vegetative anatomy of subtribe Orchidinae (Orchidaceae). *Botanical Journal of Linnean Society*, 124, 121-136. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1997.tb01786.x>
- Silva, K. R., Versieux, L. M. & Oriani, A. (2018). Anatomy of vegetative organs, inflorescence axis and pedicel in the *Neoregelia bahiana* complex (Bromeliaceae): taxonomic and ecological importance. *Nordic Journal of Botany*, e01800. <https://doi.org/10.1111/njb.01800>
- Stpiczynska, M. P. (2001). Osmophores of the fragrant orchid, *Gymnadenia conopsea* L. (Orchidaceae). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 70(2), 91-96. <https://doi.org/10.5586/asbp.2001.012>
- Süngü Şeker, Ş., Şenel, G. & Akbulut, M.K. (2021). Comparative vascular anatomies of some orchid species. *Anatolian Journal of Botany*, 5(2), 84-90. <https://doi.org/10.30616/ajb.905956>
- Wickham, L. D., Wilson, L. A. & Passam, H. C. (1981). Tuber Germination and Early Growth in Four Edible Dioscorea Species. *Annals of Botany*, 47(1), 87-95. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086003>

Sıkıştırma oranının dizel motorun emisyon ve performans karakteristiklerine etkisinin Diesel RK yazılımı kullanılarak incelenmesi

Investigation of the effect of compression ratio on the emission and performance characteristics of diesel engines with using Diesel RK software

Fikret POLAT^{*1,a}

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce

• Geliş tarihi / Received: 11.10.2021

• Düzeltilek geliş tarihi / Received in revised form: 13.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 23.05.2022

Öz

Bu çalışmanın temel amacı, dizel yakıtta metanol ve Al₂O₃ nanopartikül ilavesiyle elde edilen yakıtlarla çalışan tek silindirli bir dizel motorun performans ve emisyon özellikleri üzerinde sıkıştırma oranının (SO) etkilerini gözlemlemektir. Bu amaçla Diesel RK yazılımı kullanılmış ve simülasyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyon modeli daha önce yapılan deneysel çalışma ile doğrulanmış ve maksimum %6.5'lik hata elde edilmiştir. Model doğrulandıktan sonra 16.5, 17.5 ve 18.5 olmak üzere farklı sıkıştırma oranlarında analizler yapılmıştır. Analizler 1500 rpm sabit motor devrinde ve tam yükte gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, tüm test yakıtları için sıkıştırma oranı arttıkça özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ve NOx değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Minimum ÖYT değeri 16.5 sıkıştırma oranında 219 g/kWh olarak dizel yakıtta elde edilmiştir. Minimum NOx değeri 16.5 sıkıştırma oranında 651 ppm olarak M15A100 (hacimce %15 metanol, %85 dizel yakıttan oluşan ve M15 olarak adlandırılan test yakıtına 100 ppm Alüminyum oksit nanoparçacık katılarak elde edilen test yakıtı) yakıtında elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Diesel RK, Emisyon, Performans, Sıkıştırma oranı

Abstract

The main purpose of this study is to observe the effects of compression ratio (CR) on the performance and emission characteristics of a single-cylinder diesel engine operating with fuels obtained by adding methanol and Al₂O₃ nanoparticles to diesel fuel. For this purpose, Diesel RK software was used and a simulation model was created. The simulation model created was verified with the previous experimental study and a maximum error of 6.5% was obtained. After the model was validated, analyses were performed at different compression ratios as 16.5, 17.5 and 18.5. Analyses were carried out at 1500 rpm constant engine speed and full load. In the results, it was observed that the brake specific fuel consumption (BSFC) and NOx values increased as the compression ratio increased for all test fuels. The minimum BSFC value was obtained in diesel fuel as 219 g/kWh at a compression ratio of 16.5. The minimum NOx value was obtained in M15A100 (test fuel obtained by adding 100 ppm Aluminium oxide nanoparticles to the test fuel called M15, which consists of 15% methanol, 85% diesel fuel by volume) fuel as 651 ppm at a compression ratio of 16.5.

Keywords: Diesel RK, Emission, Performance, Compression ratio

*a Fikret POLAT; fikretpolat@duzce.edu.tr, Tel: (0541) 205 50 24, orcid.org/ 0000-0003-3767-3156

1. Giriş

1. Introduction

Dünyanın varoluşundan beri, mevcut olan doğal kaynaklar bilim ve teknoloji alanında çok geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur. İster ürün imal etsin isterse de hizmet sağlasın, tüm firmalar doğal kaynakları kullanmış ve günümüzde de kullanmaya devam etmektedirler. Örneğin kömür, ham petrol vb. doğal kaynakların bir kısmı enerji santrallerinde, kazanlarda ve taşımacılık sektöründe kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra doğal kaynaklar birincil enerji kaynağıdır ve insanoğlu yaşamının hemen her anında enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla enerjinin güvenliği ve halk için kullanılabilirliği politika yapıcılar için öncelik teşkil etmektedir. Dünya genelinde enerji tüketimi son yıllarda katlanarak artmaya devam etmektedir. 1995 yılında 8.588,9 milyon ton (mt) iken 2015 yılında 13147.3 mt'ye yükselmiştir (Ahmad & Zhang, 2020; Dong vd., 2020). Büyük ölçekte baktığımızda ise ülkelerarası savaşların temel sebepleri arasında enerjiye duyulan bu ihtiyaç yatmakta ve ülkeler enerji ihtiyacı kapsamında dışa bağımlılıklarını azaltma ve enerji kaynaklarını efektif kullanma konusunda çeşitli stratejiler benimsemektedirler (Bahadır vd., 2016). Son yıllarda artan dünya nüfusu, endüstriyelleşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç daha da artmış ve doğal kaynaklar tükenme tehlikesiyle yüzleşmek durumunda kalmıştır (Çeçen vd., 2022; Çilgin, 2021). Özellikle petrol kaynaklı enerji kaynaklarının tükenme tehlikesi yakıt fiyatlarında da dalgalanmalara sebebiyet vermiştir. Bunlara ek olarak taşımacılık sektöründen kaynaklanan hava kirliliği de eklenince petrol kaynaklı tükenebilir enerji kaynaklarına alternatif olarak yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek mecburi hale gelmiştir. The International Energy Outlook'tan elde edilen verilere göre, 2010'dan 2040'a kadar küresel yakıt tüketiminde sadece ulaşım sektörünün %63'lük önemli bir artış göstereceği öngörülmektedir (Mahmudul vd., 2017; Ağbulut vd., 2021). Ulaşım sektörü ağırlıklı olarak fosil yakıtlara, özellikle de benzinli motorlarla kıyaslandığında yakıt verimliliği ve düşük CO₂ emisyonu gibi avantajlara sahip olan dizel motorlara bağımlıdır. Dizel motorların yüksek oranda tercih edilmesine rağmen çevre kirliliği açısından kullanımını kısıtlayan sahip olduğu bazı dezavantajlar da mevcuttur. Bunlardan en önemlisi dizel motorların yanma süresince yüksek NOx emisyonlarına neden olmalarıdır (Özener, 2019). Bu sebeple, birçok yakıt araştırmacısı çalışmalarında söz konusu emisyonları azaltmak ve dizel motoru kullanımındaki çevresel kaygıları

bertaraf etmek için geleneksel dizel yakıtı, oksijenli katkı maddeleriyle beraber kullanmayı amaçlamışlardır. Bu amaç kapsamında da biyodizel, biyoalkol (etanol, metanol, pentanol, heksanol, dekanol, bütanol) gibi biyoyakıtların dizel yakıtla karışımlarının motorun yanma, performans ve emsiyon değerlerine etkilerini inceleyen bir dizi çalışma yapmışlardır (Balan vd., 2019; Saridemir vd., 2016; Devaraj vd., 2021; Atmanlı & Yılmaz, 2020; Emiroğlu & Şen, 2018; Joy vd., 2020; Karagöz, 2020; Fidan & Alkan, 2014). Paul ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dizel-biyodizel yakıt karışımlarının yanma özelliklerinin etanol ilavesiyle önemli ölçüde iyileştirilebileceği gözlemlemiştir (Paul vd., 2017). Bir diğer çalışmada Singh ve arkadaşları bütanol ilavesinin NOx emisyonunda azalma sağladığını rapor etmişlerdir (Singh vd., 2020). Nguyen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada balık yağı biyodizelinin kullanımının motor performansı, yakıt püskürtme ve emisyon özelliklerine etkisini araştırmışlar ve deney çıktısı olarak dizele göre daha düşük emisyon değerleri sağladığından dolayı balık yağı biyodizelin dizel motorda yakıt ikamesi olarak kullanılmasının mümkün olduğunu rapor etmişlerdir (Nguyen vd., 2020).

NOx emisyonlarını azaltmak için son yıllarda hem teknolojiye hızlı gelişmeler hem de nano boyutlu parçacıkların üretilebilirliğinin mümkün hale gelmesi sayesinde nanoparçacıkların kullanımı yaygınlaşmıştır. Nanopartiküller sahip oldukları geniş yüzey alanının etkisiyle aynı anda daha fazla kimyasalın katalizör ile etkileşime girmesine izin verir. Nanopartiküllerin eklenmesi, yakıtın termal iletkenlik, buharlaşma hızı, setan sayısı, ısıtma değeri ve tutuşma gecikmesi gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirir. Geniş yüzey alanı ve yüksek enerji seviyeleri, katalitik performansın artmasına neden olur. Literatür taraması yapıldığında birçok araştırmacının nanopartikül, biyodizel ve karışımlarının dizel motorların performans, emisyon ve yanma özellikleri üzerindeki etkisine odaklandığı görülmüştür (Ağbulut vd., 2021; Venu vd., 2021; Manigandan vd., 2020; Dhalad vd., 2020; Soudagar vd., 2021; Saijith vd., 2010). Sıkıştırma oranı (SO), enjeksiyon zamanlaması (EZ), püskürtme basıncı (PB) vb. gibi motor çalışma parametrelerinin değiştirilmesi konusunda ise çok fazla çalışma yapılmamıştır. Banapurmath ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, enjeksiyon zamanlaması, enjeksiyon basıncı, akış hızları vb. diğer tüm çalışma parametrelerini sabit tutup, sıkıştırma oranını 15'ten 17.5'e değiştirerek sıkıştırma oranının motor performansına olan etkisini

gözlemlenmek istemişler ve sıkıştırma oranını artırmanın daha yüksek silindir basıncı ve ısı yayılım oranları ile sonuçlandığını ve bunun da fren termal verimliliğinde iyileşmeler (%1.4) sağladığını bildirmişlerdir. Ayrıca, HC ve CO emisyonları önemli ölçüde azalırken, NOx emisyonlarının bir miktar arttığını çalışma çıktısı olarak sunmuşlardır (Banapurmath vd., 2014). Bir diğer çalışmada ise Jaichandar ve arkadaşları sıkıştırma oranını 17.5'ten 18.5'e artırarak testlerini yapmışlar ve biyodizel yakıtlı motorda sıkıştırma oranının artırılmasıyla termal verimlilik, NOx emisyonu ve ısı yayılım oranının arttığını, buna karşılık özgül yakıt tüketimi, CO ve HC emisyonlarının azaldığını bildirmişlerdir (Jaichandar vd., 2014).

Sıkıştırma oranı gibi motor çalışma parametrelerinin motor performans, yanma ve emisyon özelliklerine etkisi konusunda çok fazla deneysel çalışma yapılmamış olmasının nedenleri araştırıldığında sıkıştırma oranının değiştirilmesinin zorluğunun deneysel çalışmayı zorlaştırdığı gerçeği öne çıkmaktadır. Bununla birlikte deneysel çalışmaların maliyetli, oldukça yorucu ve zaman alıcı süreçler olduğu da açıktır. Günümüzde bilgisayar teknolojisi alanındaki gelişmeler birçok problemin sayısal çözümünü mümkün kılmakta ve bu konuda çeşitli yazılımlar kullanılmaya ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Diesel RK yazılımı, bir, iki ve dört zamanlı içten yanmalı motorların çalışma süreçlerini taklit etmek ve optimize etmek için tasarlanmış ve son zamanlarda sıkça kullanılan yazılımlardan biridir. Hesaplama süresinin kısa olması bu programı benzer programlardan daha avantajlı kılmaktadır. Şimşek ve arkadaşları Diesel RK yazılımı ile yaptıkları çalışmada 3 farklı alkol türünü (Butanol, Metanol ve Propanol), dizel yakıt ile %5, %10 ve %15 oranlarında karıştırmış ve tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motorlarda kullanılmasını modellemişlerdir. Bu yakıtları maksimum yükte tutuşma gecikmesi ve yanma süresi açısından dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Aynı motor devrinde modellenen yakıtların tutuşma gecikmelerinde, butanol, propanol ve metanolün dizel yakıtına karışım oranı arttıkça tutuşma gecikmelerinin de arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca metanolün tüm oranlarında diğer alkollere göre yanma süresinin arttığını ifade etmişlerdir (Şimşek vd., 2017). Bir diğer çalışmada, dizel ve farklı Soya Metil Ester (SME) karışımları ile çalışan tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu dizel motorun performansı ve

emisyonları Diesel-RK simülasyon yazılımı kullanılarak teorik olarak incelenmiştir. SME'nin tüm karışımlarının, saf dizel yakıtla karşılaştırıldığında %28'den fazla NOx emisyonu elde edildiğini ifade etmişlerdir. Enjeksiyon zamanlamasının geciktirilmesinin NOx emisyonlarındaki artışı büyük ölçüde azaltabileceği gözlemlenmiştir. Test edilen tüm yakıtlar arasında, saf dizel çalışmasına kıyasla emisyonlarda iyi bir azalma ile aynı performans sonuçlarını veren en iyi test yakıtının hacimce %20 SME katılan test yakıtı olduğunu belirtmişlerdir (Al-Dawody & Bhatti 2011). Bir diğer çalışmada Rajak ve arkadaşları, optimum sıkıştırma oranı 17.5 olan test motoru üzerinde tam yük koşullarında deneyler yapmış ve sonuçları sayısal model ile karşılaştırmışlardır. Sayısal sonuçların, deneysel sonuçlara %6 civarında yaklaştığını belirtmişlerdir. Simülasyon, %100 yük durumunda sabit motor devrinde, silindir basıncı, egzoz gazı sıcaklığı, fren ısı verimi, özgül yakıt tüketimi ile karbondioksit, nitrojen oksit, partikül madde emisyonları gibi parametreleri tahmin etmek için yapılmıştır. Sonuçlar, AB100 (yosun biyodizel) kullanımının fren termal verimliliğini %2.73, torku %6.66, egzoz gazı sıcaklığını %1.6, karbondioksiti %6.1, nitrojen oksidi %0.5 ve partikül maddeyi %60 azalttığını ifade etmişlerdir (Rajak vd., 2019).

Bu çalışmada ise farklı sıkıştırma oranlarının dizel motorun performans ve emisyon özelliklerine etkisi, Diesel RK yazılımında hazırlanan ve daha önce yapılmış bir deneysel çalışma (Soni & Gupta, 2017) ile doğruluğu ispatlanan model kullanılarak araştırılmıştır.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1. Test yakıtları ve test motoru

2.1. Test fuels and test engine

Bu çalışmada 3 farklı test yakıtı tasarlanmıştır. Bunlar DF olarak adlandırılan saf dizel yakıt, M15 olarak adlandırılan hacimce %15 metanol, %85 dizel yakıttan oluşan yakıt ve M15 yakıtına 100 ppm Alüminyum oksit katılarak elde edilen M15A100 olarak adlandırılan test yakıtlarıdır. Test yakıtlarının bazı temel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Alınan bu değerler daha önce yapılan deneysel çalışmanın verilerinden elde edilmiş (Wei vd., 2021) ve Diesel RK yazılımına da bu değerler girilerek yakıtlar oluşturulmuştur.

Tablo 1. Test yakıtlarının temel özellikleri
Table 1. Main characteristics of test fuels

Özellik	DF	M15	M15A100
Yoğunluk (kg/m ³ ; 15 °C)	830	824	826
Alt ısı değeri (MJ/kg)	42.80	39.55	39.65
Viskozite (cSt @40 °C)	3.35	2.93	3.14
Setan sayısı	50.5	37.1	37.8

Diesel RK programı vasıtasıyla doğal emişli ve hava soğutmalı tek silindri Kiroloskar TV-1 marka dizel motorunun verileri alınarak düzenek hazırlanmış ve testler yapılmıştır. Ayrıca deneyler boyunca test motorunun orijinal değerleri olan 17.5/1 sıkıştırma oranı ve 220 bar enjeksiyon basıncı sabit tutulmuş ve test motorunda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Test motorunun ana özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Test motorunun temel özellikleri
Table 2. Main characteristics of test engine

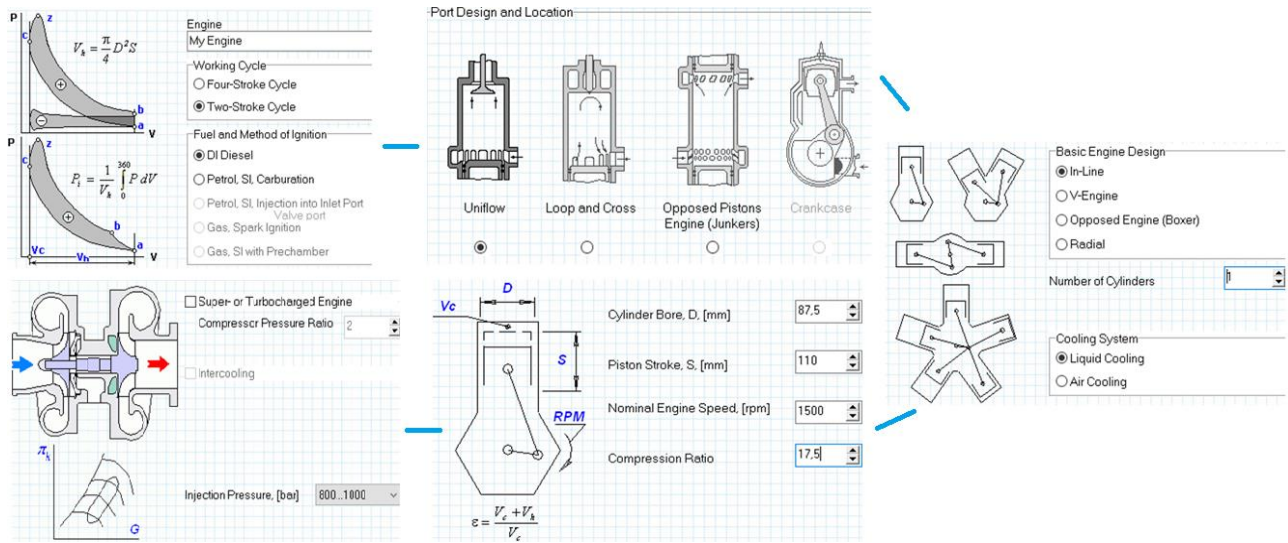
Model	Kirloskar TV-1
Silindir hacmi	661 cc
Sıkıştırma oranı	17.5/1
Çap × strok	87.5 mm × 110 mm
Enjektör açılma basıncı	220 bar
Boyutlar	617 X 504 X 877 mm

2.2. Diesel RK yazılımı

2.2. Diesel RK software

1981-82 yıllarında Bauman Moskova Devlet Teknik Üniversitesi İçten Yanmalı Motorlar (Pistonlu Motorlar) bölümünde geliştirilen

modelleme ve simülasyon yazılımı Diesel RK, esas olarak her türlü güçlendirme ile içten yanmalı motorların çalışma süreçlerini simüle etmek ve optimize etmek için tasarlanmıştır. Bu yazılım sayesinde farklı motor parametreleri (çap, strok, silindir hacmi, sıkıştırma oranı vs.) ve sıvı ya da gaz fark etmeksizin farklı yakıt çeşitleri için içten yanmalı motorların tork eğrilerini, motor performans değerlerini, farklı yüklerde meydana gelecek olası yakıt tüketimi ve emisyon değerlerini hesaplamak mümkündür. Bunu yaparken de diğer hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarına göre analiz süresinin çok daha kısa olması ve bununla beraber yüksek yakınsama değerlerinden dolayı hem akademik çalışmalarda hem de özel sektörde çokça tercih edilmektedir. Simülasyon modeli oluşturulurken önce motorun fabrika verileriyle genel karakteristik ve yapısal özellikleri tanımlanır. Sonrasında testte kullanılacak yakıt veya yakıtların gerekli olan özellikleri (viskozite, ısı değeri, setan sayısı, yoğunluk vs.) girilir ve PM emisyon modeli, NOx emisyon modeli, ısı yayılım modeli, yakıt buharlaşma modeli ve yakıt demeti modeli seçilerek simülasyon modeli oluşturulmuş olur. Şekil 1' de motorun yapısal özelliklerinin girilerek proje oluşturulması için izlenmesi gereken yollar gösterilmektedir.



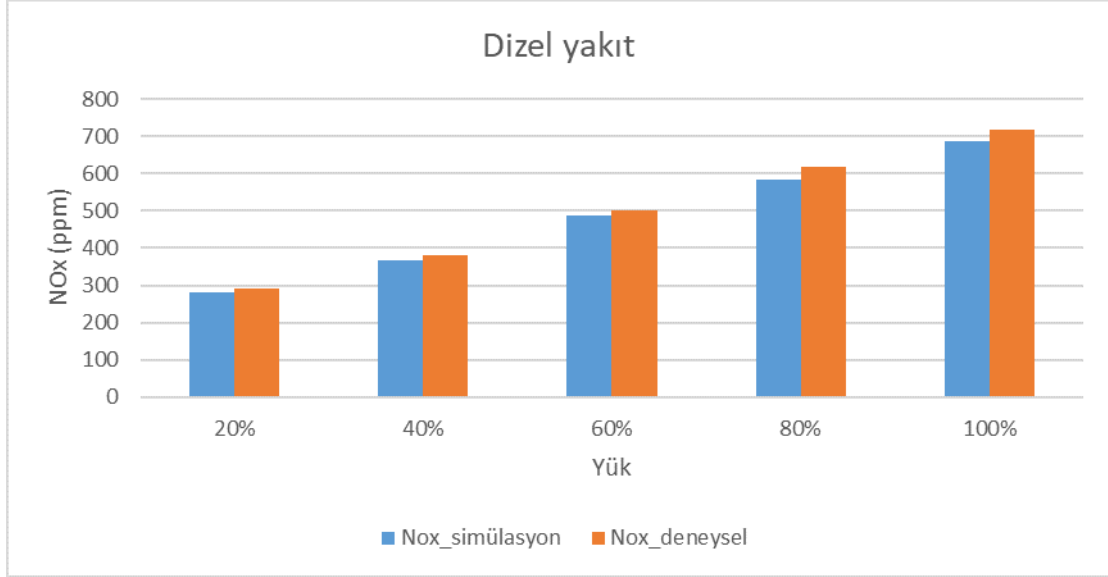
Şekil 1. Dizel RK yazılımı ile proje oluşturma adımları
Figure 1. Project creation steps with Diesel RK software

2.3. Simülasyon modelinin doğruluğunun incelenmesi

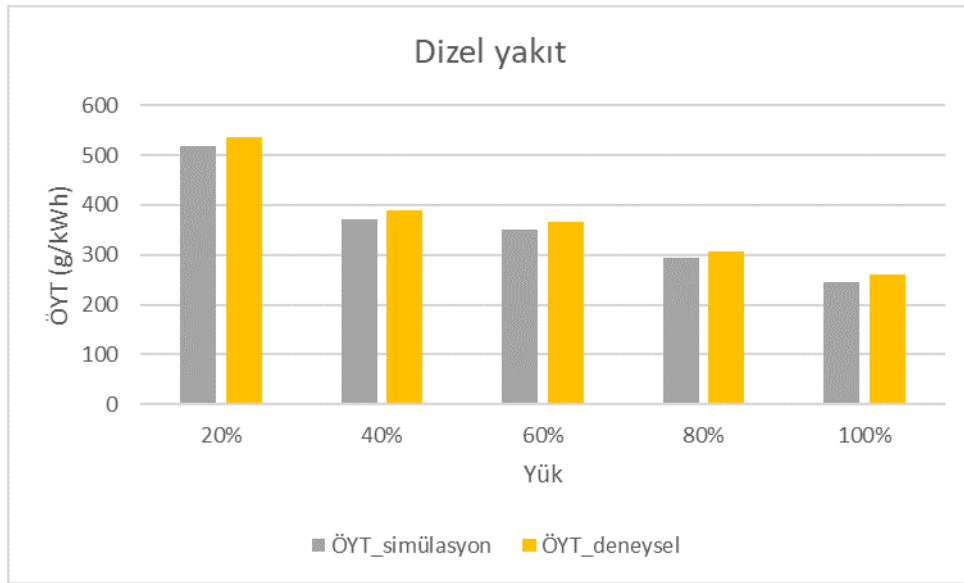
2.3. Examining the accuracy of the simulation model

Bu çalışmada oluşturulan simülasyon modeli önce motorun kendi sıkıştırma oranında oluşturularak

daha önce yapılan deneylerden elde edilen deneysel veriler (Soni & Gupta, 2017), simülasyon verileri ile Şekil 2 ve Şekil 3’te görüldüğü gibi karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların deneysel verilerle örtüştüğü gözlemlenerek modelin doğruluğu ispatlanmıştır.



Şekil 2. Dizel yakıt için yüke göre NOx değerlerinin deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması
Figure 2. Comparison of test and simulation results of NOx values according to load for diesel fuel



Şekil 3. Dizel yakıt için yüke göre ÖYT değerlerinin deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Figure 3. Comparison of test and simulation results of BSFC values according to load for diesel fuel

Grafikler incelendiğinde yakınsama olarak maksimum hata ÖYT değeri için %6.5 değeri ile maksimum yükte, NOx değeri içinse %5.5 değeri ile %80 yük değerinde elde edilmiştir. Maksimum %6.5’lik hata kabul edilebilir sınırlar içerisinde

olduğundan hazırlanan simülasyon modelinin analiz için uygunluğu ispat edilmiştir.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Bu makale, farklı sıkıştırma oranlarının yakıtların performans ve emisyon özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu sebeple 17.5 sıkıştırma oranında simülasyon ve deneysel verilerin doğrulanmasından sonra, farklı sıkıştırma oranlarının (16.5, 17.5 ve 18.5) etkisini gözlemlemek için analizler yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları ile ilgili aşağıdaki performans ve emisyon özellikleri elde edilmiştir.

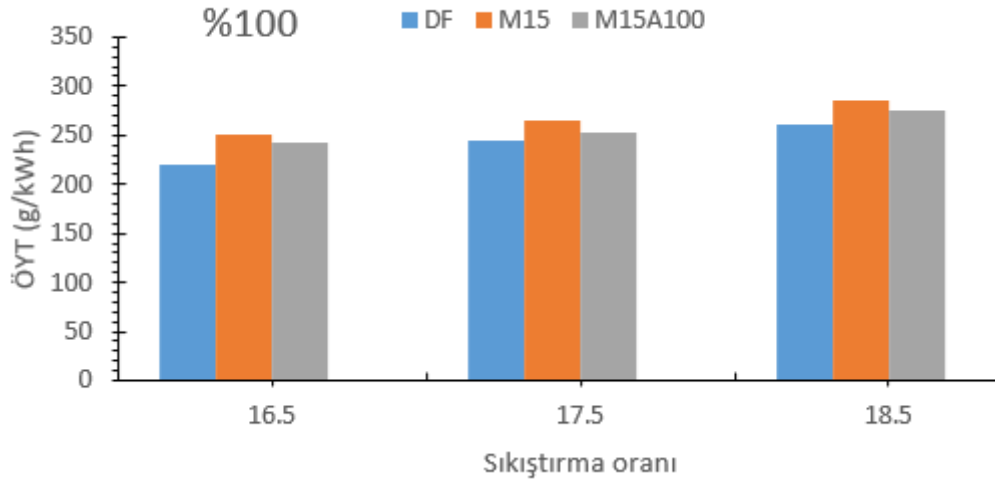
3.1. Özgül yakıt tüketimi

3.1. Brake specific fuel consumption

Özgül yakıt tüketimi (ÖYT), içten yanmalı bir motorun tükettiği yakıtı karşılık olarak krank milinde üretilen gücün verimliliğini ifade eden bir gösterge değeridir. Başka bir deyişle aynı motor yüküne ulaşmak için ne kadar yakıt tüketilmesi gerektiğini ifade eden ve bu sayede farklı test yakıtlarının karşılaştırılmasını sağlayan önemli bir performans göstergesidir. Aynı yüke düşük ÖYT değeri ile ulaşılmak istendiği için ÖYT değeri düşük olan yakıtın performans açısından daha verimli olduğu söylenebilir. Bu çalışmada test

yakıtları arasında DF en yüksek enerji içeriğine sahip olduğundan, Şekil 4'te de görüldüğü gibi diğer test yakıtlarına göre daha az yakıt tüketimi ile aynı yük değeri elde edilmektedir.

Sıkıştırma oranının artması sebebiyle, sıkıştırma ve yanma sonu basınç ve sıcaklık değerleri artış göstermekte ve bu durum da ortalama efektif basıncı artırmaktadır. Aynı şekilde sıkıştırma oranının vuruntuya neden olmayacak kadar yükseltilmesiyle birlikte çıkış gücünde artış ve özgül yakıt tüketiminde iyileşme beklenmektedir (Rajak vd., 2019; Datta & Mandal, 2016; Hariram & Shangar, 2015). Burada dikkate alınması gereken nokta optimum sıkıştırma oranı ibaresidir. Optimum sıkıştırma oranından yüksek sıkıştırma oranlarında vuruntudan dolayı oluşan sürtünmeyi yenmek için ekstra güç harcanmaktadır ve bu durum da performansta düşmeye neden olmaktadır. Literatürde vuruntunun motor performansına etkisini dikkate alan teorik çalışmalar bu durumu doğrulamaktadır (Wang vd., 2002; Bhattacharyya, 2000; Chen vd., 2020). Bu çalışmada da sıkıştırma oranının artmasıyla tüm yakıtlarda yakıt tüketiminin de arttığı Şekil 4'te görülmektedir. Buna sebep olarak da yukarıda ifade edilen durum gösterilebilir.



Şekil 4. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için ÖYT değerleri
Figure 4. BSFC values for test fuels at different compression ratios under full load

Ayrıca Şekil 4 incelendiğinde, metanol ilavesinin özgül yakıt tüketiminde artışa neden olduğu görülmektedir. Bunun altında yatan sebep olarak metanol ilaveli test yakıtının alt ısıl değerinin dizel yakıtı göre daha düşük olması gösterilebilir. Yakıtın daha düşük alt ısıl değere sahip olması demek karışımın daha az enerji açığa çıkarıyor olması demektir. Açığa çıkan bu daha az enerji, yakıtı tamamen yakmak için yeterli gelmemekte ve

daha düşük güç üretilmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, motordan aynı miktarda güç çıkışını korumak için yanma odasında daha fazla yakıt gönderilmesi gerekmekte ve bu durum da özgül yakıt tüketimini artırmaktadır. Literatürdeki birçok çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Zhang vd., 2021; Hasan vd., 2021; Wei vd., 2021). Tablo 1 incelendiğinde nanoparçacık takviyeli test yakıtının alt ısıl değerinin dizelden düşük M15

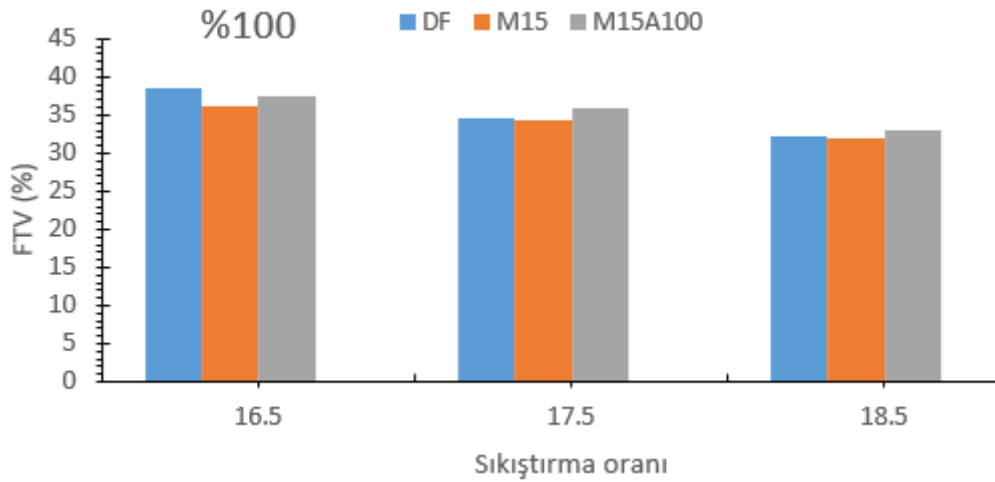
yakıtından ise az miktarda yüksek olduğu ve setan sayısının da M15 yakıtından yüksek olduğu görülmektedir. Bununla beraber nanoparçacıkların katalizör etkisi, yüksek yüzey alanı-hacim oranı gibi üstün özellikleri de nanoparçacık takviyeli test yakıtında (M15A100) ÖYT değerinin M15 yakıtına göre daha düşük olarak elde edilmesine sebep olmuştur. Ayrıca, yanma odasında metal oksit bazlı nanopartiküllerin mevcudiyeti, daha yüksek buharlaşma oranı, daha kısa tutuşma gecikme süresi ve iyileştirilmiş püskürtme özellikleri sağlamakta ve böylece yanma verimini arttırmakta olduğu literatürde birçok çalışmada ifade edilmiştir (Wei vd., 2021; Polat vd., 2022; Rajak vd., 2022; Ağbulut vd., 2022; Afzal vd., 2021).

3.2. Fren Termal Verimi (FTV)

3.2. Brake Thermal Efficiency (BTE)

Fren termal verimliliği (FTV), test edilen yakıttan elde edilen enerji verimliliğini ifade eder ve test yakıtlarının alt ısıl değerlerine büyük ölçüde

bağlıdır. Metanolün geleneksel dizel yakıta eklenmesiyle, Şekil 5'te görüldüğü gibi metanolün daha düşük enerji içeriği nedeniyle FTV tüm sıkıştırma oranlarında azalma göstermiştir. Başka bir deyişle, M15 test yakıtı, geleneksel dizel yakıta göre %2.53'lük bir azalma sergilemektedir. M15 test yakıtına nanopartiküllerin eklenmesi ise FTV'yi önemli bir düzeyde iyileştirmiştir. Başka bir deyişle, metanol ilavesiyle indirgenen FTV, nanopartiküllerin ilavesiyle arttırılmaktadır. M15A100 test yakıtındaki FTV'deki artış, M15 test yakıtına göre %3.88, dizel yakıta göre ise %1.25 civarında elde edilmiştir. Şekil 5'ten de görüldüğü üzere FTV değeri, geleneksel dizel yakıttan bile daha iyidir. Nanopartiküllerin eklenmesiyle bu iyileştirmenin nedeni, aktif katalizör rolüne ve üstün termal özelliklerine atfedilebilir. Ayrıca, karışımlardaki nanopartiküllerin, enerjinin depolanması ve reaktivite üzerinde olumlu bir etkiye sahip olan hacim/yüzey alanı oranını da arttırıyor olmaları, bu durumun sebepleri arasında gösterilebilir (Shaafi & Velraj, 2015; Raju vd., 2018; Sheikholeslami vd., 2020; Sun vd., 2019).



Şekil 5. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için FTV değerleri
Figure 5. BTE values for test fuels at different compression ratios under full load

FTV değeri genel olarak ÖYT değeri ile ters orantı gösterir ve yüksek yakıt tüketimi düşük verim anlamına gelmektedir. Şekil 5 incelendiğinde sıkıştırma oranı arttıkça FTV değerinin azalış trendini sergilediği görülmektedir. Bunun sebebi olarak bir önceki bölümde bahsedilen vuruntu olayı gösterilebilir. Vuruntudan dolayı oluşan sürtünmeyi yenmek için motor ekstra güç harcamakta ve bu durum da performansta düşmeye neden olmaktadır (Wang vd., 2002; Bhattacharyya, 2000; Chen vd., 2020).

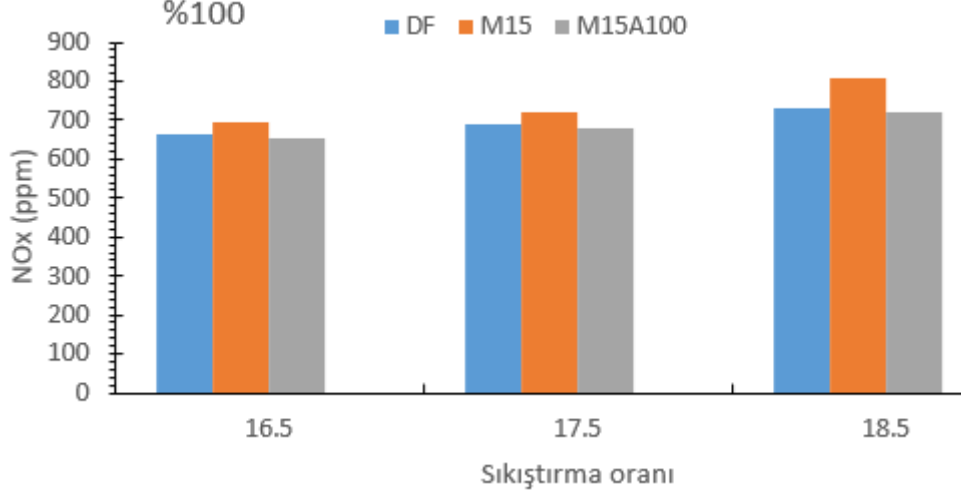
3.3. NOx Emisyon Değerleri

3.3. NOx Emission Values

NOx emisyonları çevre kirliliği ve ozon tabakasına verdiği zarar göz önüne alındığında yakıt çalışmalarında incelenmesi gereken en önemli noktalardan biridir. Bir içten yanmalı motorda, NOx oluşumu çoğunlukla yanma sıcaklığından ve ısı salınım hızından etkilenir. Bu nedenle motorlarda daha yüksek yanma sıcaklıkları daha yüksek NOx emisyonlarına neden olur. Şekil 6 farklı sıkıştırma oranlarına göre tam yükte test yakıtlarının sebep olduğu NOx miktarlarının değişimini göstermektedir. Silindiri içi NOx üretimi

hem havada hem de yakıtta bulunan oksijen ve nitrojen molekülleri arasındaki etkileşimin kimyasal kinetiği tarafından yönetilir. Kimyasal kinetik hızı, reaksiyon sıcaklığına, moleküler konsantrasyonlara ve kalma süresine bağlıdır. Sıkıştırma oranındaki artış yanma sıcaklığının da

artmasına ve NO_x oluşum hızının da uyarılmasına sebep olmaktadır (Tangöz vd., 2015; Lim vd., 2013; Hawi vd., 2019; Sayın & Gümüş, 2011). Bundan dolayı da Şekil 6'dan da görüleceği üzere sıkıştırma oranı arttıkça tüm test yakıtları için NO_x değeri artmıştır.



Şekil 6. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için NO_x değerleri
Figure 6. NO_x values for test fuels at different compression ratios under full load

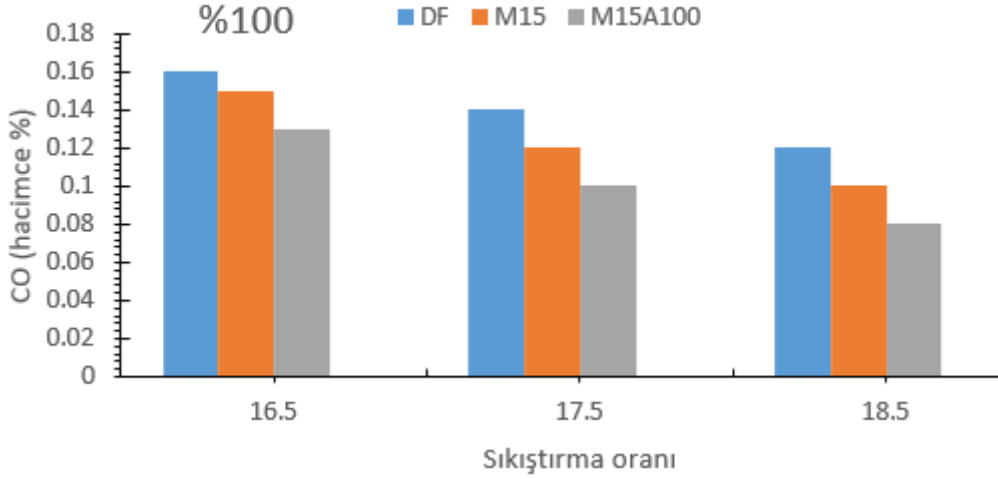
NO_x miktarı çoğunlukla silindir içi sıcaklığa ve yakıtın oksijen konsantrasyonuna bağlıdır. Metanol ağırlıkça %50 oksijen içerir ve Tablo 1'den de görüldüğü üzere setan sayısı dizel yakıtından daha düşüktür. Tüm bunlar yanma sonrası silindir içi sıcaklığı artırmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta, nitrojen NO_x emisyonuna dönüştürülür ve diatomik nitrojen (N₂), oldukça reaktif olan monoatomik nitrojene (N) dönüşür. Öte yandan, yanma işlemi sırasında yakıtla bağlı nitrojenin (yakıt eser miktarda NH₃, NC ve HCN içerir) NO_x'e dönüştürülmesi nedeniyle de NO_x üretilmiş olur. Tüm bunlar göz önüne alındığında NO_x miktarının artması beklenen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır (Chen vd., 2019; Yasin vd., 2014; Garcia vd., 2021). Şekil 6'dan da görüldüğü üzere metanol ilavesiyle tüm sıkıştırma oranlarında NO_x miktarı artış göstermiştir. Yine Şekil 6 incelendiğinde, dizel-metanol yakıt karışımına alüminyum oksit nanoparçacığının ilave edilmesiyle NO_x emisyonlarının saf dizelden daha iyi seviyelere düştüğü görülmektedir. Bu durumun altında yatan temel sebep, nanopartikül ilavesiyle yakıtların termal özelliklerinin iyileştirilmesidir. Termal özelliklerin iyileşmesiyle de hızlı bir ısı transferi sağlanmış ve bu sayede de yanma odasındaki sıcaklığın çok fazla yükselmesine izin verilmemiştir. Diğer bir deyişle, NO_x emisyonunun artması için gereken yüksek sıcaklıklara çok fazla ulaşamamış ve nanopartikül

katkılı test yakıtında (M15A100) NO_x emisyonunun daha az olduğu görülmüştür. Aşağıdaki referanslar tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Ağbulut vd., 2020; Karagöz vd., 2021; Gharehghani vd., 2019; Venkatesan vd., 2019; Elwardany vd., 2020).

3.4. CO Emisyon Değerleri

3.4. CO Emission Values

CO emisyonu, hava/akış oranı, test yakıtlarının oksijen ve karbon içerikleri, enjeksiyon stratejileri, enjeksiyon zamanlaması, yanma odası şekli vb. gibi birçok parametreyle güçlü bir şekilde ilişkilidir (Ağbulut vd., 2021; Ağbulut vd., 2020; Sarıdemir vd., 2020). CO eksik yanma ürünüdür. Yani CO emisyonunun varlığı, oksitlenemeyen ve/veya kısmen oksitlenebilen yakıtın bir yansıması olup ilgili yakıt için kimyasal enerji kaybı hakkında fikir verebilir. Şekil 7 tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtlarının CO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde herhangi bir sıkıştırma oranında en yüksek CO emisyon değerinin dizel yakıtta meydana geldiği görülmektedir. Bunun arkasındaki neden, geleneksel dizel yakıtın oksijen içeriğine atfedilebilir. Hiçbir katkı maddesi içermeyen dizel yakıt, doğal yapısında herhangi bir oksijen atomuna sahip değildir. Bu nedenle, sahip olduğu yüksek karbon içeriği, oksijen atomlarının eksikliği ile oksitlenemez ve CO emisyonu artar.



Şekil 7. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için CO değerleri
Figure 7. CO values for test fuels at different compression ratios under full load

Dizel yakıtta metanol eklenmesiyle, M15 test yakıtı için CO emisyon seviyesinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise metanolde bol miktarda oksijen atomunun bulunması ve bu sayede de daha eksiksiz bir yanma sağlanmasıdır. Öte yandan, M15 test yakıtına metal oksit bazlı nanopartiküllerin eklenmesiyle elde edilen M15A100 yakıtında, CO emisyonu dizel ve M15 test yakıtlarına göre daha düşüktür. Bunun nedeni ise, nanopartiküllerin oksijen veren katalizör görevi görmesi ve böylece yanma odasında oksidasyona yardımcı olmasıdır. Ek olarak, nanoparçacıkların daha yüksek yüzey/hacim oranı kimyasal reaktiviteyi artırır ve tutuşma gecikme süresini kısaltır, bu da daha eksiksiz yanma ve daha az CO emisyonu ile sonuçlanır (Ağbulut vd., 2021; Ağbulut vd., 2020; Sarıdemir vd., 2020). Ayrıca Şekil 7’de görüldüğü üzere sıkıştırma oranının artmasıyla CO emisyonları düşüş eğilimi göstermektedir. Bu eğilimin olası nedeni ise, artan sıkıştırma oranının silindir içindeki hava sıcaklığını artırarak ateşleme gecikmesini azaltması ve yakıtın daha iyi ve daha eksiksiz yanmasına sebep olmasıdır (Prasad vd., 2021; Sayın & Gümüş, 2011).

4. Sonuç ve öneriler

4. Conclusion and recommendations

Bu çalışmada tek silindirli bir dizel motorun performans ve emisyon karakteristikleri üzerine sıkıştırma oranının etkisini incelemek üzere Diesel RK yazılımı kullanılarak modelleme ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle 3 farklı yakıt (DF, M15 ve M15A100) spesifik özelliklerine göre modellenmiş ve test motorunun katalog değeri olan 17.5 sıkıştırma oranında dizel yakıt için alınan sonuçlar literatürdeki aynı koşullar altında yapılan

deneysel çalışmayla doğrulanmış ve modelin maksimum 6.5 hatayla çalıştığı ispat edilmiştir. Analizler 1500 rpm sabit motor devrinde tam yükte gerçekleştirilmiştir.

Dizel yakıtın özgül yakıt tüketiminin tüm sıkıştırma oranlarında en düşük olduğu görülmüştür. Sıkıştırma oranı arttıkça tüm yakıtlar için ÖYT değeri de artmıştır. En düşük ÖYT değeri 16.5 sıkıştırma oranında 219 g/kWh olarak dizel yakıtta elde edilmiştir. Bununla beraber dizel yakıtta metanol ilavesinin ÖYT değerini artırdığı ve nanopartikül ilavesinin bu artışı geriye çekmede önemli rol oynadığı da bu çalışmanın çıktıları arasında gösterilebilir. Başka bir deyişle, tam yükte tüm sıkıştırma oranları hesaba katıldığında ÖYT değeri dizel yakıtı göre M15 ve M15A100 yakıtlarında sırasıyla %10.77 ve %6.35 oranında artış göstermiştir.

Tam yükte tüm test yakıtlarında sıkıştırma oranı arttıkça FTV değerinin azalış trendi sergilediği görülmüştür. Ayrıca dizel yakıtta metanol eklenmesiyle elde edilen M15 test yakıtında, geleneksel dizel yakıtı göre FTV değeri %2.53'lük bir azalma sergilemiştir. Bu yakıtta nanopartikül eklenmesi ise FTV'yi önemli bir düzeyde iyileştirmiş ve M15 test yakıtına göre %3.88, dizel yakıtı göre ise %1.25 civarında artış elde edilmiştir.

ÖYT değerlerine benzer trend NOx emisyonlarında da görülmüş ve sıkıştırma oranı arttıkça tüm yakıtlar için NOx değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca metanol ilavesinin de NOx emisyonlarının artmasına sebep olduğu görülmüştür. Bununla beraber dizel-metanol yakıt karışımına alüminyum oksit nanoparçacığının

ilave edilmesiyle NOx emisyonlarının saf dizelden daha iyi seviyelere düştüğü gözlemlenmiştir. Buna göre minimum NOx değeri 651 ppm ile M15A100 yakıtında 16.5 sıkıştırma oranında elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, tam yükte tüm sıkıştırma oranları hesaba katıldığında NOx değerinin dizel yakıtına göre M15 yakıtında %6.57 oranında artış gösterirken, M15A100 yakıtında %1.58 oranında azaldığı görülmektedir.

Tüm sıkıştırma oranlarında en yüksek CO emisyon değerinin dizel yakıtta meydana geldiği görülmüştür. Dizel yakıtta metanol eklenmesi, CO emisyon seviyesini düşürmüş, ayrıca nanopartikül ilavesi ise CO emisyonunda ekstra bir düşüş sağlamıştır. Başka bir deyişle, dizel yakıtına göre M15 ve M15A100 test yakıtlarında CO emisyon değeri sırasıyla %11.9 ve %26.19 oranında düşmüştür.

Çalışma verileri gözlemlendiğinde Diesel RK yazılımıyla deneysel sonuçlara çok yakın değerler elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu tarz yazılımlar sayesinde araştırmacılar hem ciddi vakit alan hem de oldukça maliyetli olan deneysel çalışmalardan ziyade bilgisayar üzerinde çalışılmak istenen konunun ön araştırmasını kolaylıkla yapabileceklerdir. Bunun için ise öncelikle tecrübe sonrasında da modellenmek istenen deneysel düzeneğin gerçekle bire bir olarak kurgulanması gerekmektedir. Fakat unutulmamalıdır ki oluşturulan model mutlaka bir deneysel çalışma ile doğrulanmalıdır.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu makaledeki tüm katkı yazara aittir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

References

Al-Dawody, M. F. & Bhatti, S. K. (2011). Effect of soybean oil biofuel blending on the performance and emissions of Diesel engine using Diesel-RK

software. *International journal of engineering science and technology*, 3(6), 4539-4555.

Afzal, A., Ağbulut, Ü., Soudagar, M. E. M., Razak, R. K., Buradi, A. & Saleel, C. A. (2021). Blends of scum oil methyl ester, alcohols, silver nanoparticles and the operating conditions affecting the diesel engine performance and emission: an optimization study using Dragon fly algorithm. *Applied Nanoscience*, 11(9), 2415-2432. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02046-5>

Ağbulut, Ü., Elibol, E., Demirci, T., Sarıdemir, S., Gürel, A. E., Rajak, U., & Verma, T. N. (2022). Synthesis of graphene oxide nanoparticles and the influences of their usage as fuel additives on CI engine behaviors. *Energy*, 122603. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122603>

Ağbulut, Ü., Polat, F. & Sarıdemir, S. (2021). A comprehensive study on the influences of different types of nano-sized particles usage in diesel-bioethanol blends on combustion, performance, and environmental aspects. *Energy*, 229, 120548. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120548>

Ağbulut, Ü., Karagöz, M., Sarıdemir, S. & Öztürk, A. (2020). Impact of various metal-oxide based nanoparticles and biodiesel blends on the combustion, performance, emission, vibration and noise characteristics of a CI engine. *Fuel*, 270, 117521. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117521>

Ahmad, T. & Zhang, D. (2020). A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*, 6, 1973-1991. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.020>

Atmanli, A. & Yilmaz, N. (2020). An experimental assessment on semi-low temperature combustion using waste oil biodiesel/C3-C5 alcohol blends in a diesel engine. *Fuel*, 260, 116357. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116357>

Bahadır, A., Yegin, M. & Polat, F. (2016). Renewable energy policies in Turkey: a case of Bioenergy. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 5(2), 451-457.

Balan, K. N., Yashvanth, U., Booma Devi, P., Arvind, T., Nelson, H. & Devarajan, Y. (2019). Investigation on emission characteristics of alcohol biodiesel blended diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(15), 1879-1889. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549166>

Banapurmath, N. R., Budzianowski, W. M., Basavarajappa, Y. H., Hosmath, R. S., Yaliwal, V. S. & Tewari, P. G. (2014). Effects of

- compression ratio, swirl augmentation techniques and ethanol addition on the combustion of CNG–biodiesel in a dual-fuel engine. *International Journal of Sustainable Engineering*, 7(1), 55-70. <https://doi.org/10.1080/19397038.2013.798712>
- Bhattacharyya, S. (2000). Optimizing an irreversible Diesel cycle—fine tuning of compression ratio and cut-off ratio. *Energy conversion and management*, 41(8), 847-854. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00153-3)
- Chen, H., Su, X., He, J. & Xie, B. (2019). Investigation on combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine fueled with diesel/n-pentanol/methanol blends. *Energy*, 167, 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.199>
- Chen, L., Wei, H., Pan, J., Liu, C. & Shu, G. (2020). Understanding the correlation between auto-ignition, heat release and knocking characteristics through optical engines with high compression ratio. *Fuel*, 261, 116405. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116405>
- Çeçen, M., Yavuz, C., Tirmikçi, C. A., Sarıkaya, S. & Yanıkoğlu, E. (2022). Analysis and evaluation of distributed photovoltaic generation in electrical energy production and related regulations of Turkey. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02247-0>
- Çılgin, E. (2021). Investigation of the usability of essential oils in diesel engines as a new biodiesel source. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 573-585.
- Datta, A. & Mandal, B. K. (2016). Effect of compression ratio on the performance, combustion and emission from a diesel engine using palm biodiesel. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 1754, No. 1, p. 050005)*. AIP Publishing LLC.
- Devaraj, A., Nagappan, M. & Yogaraj, D. (2021). Emission pattern of higher alcohol-biodiesel blends in compression ignition engine. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1876-1879. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.455>
- Dhahad, H. A. & Chaichan, M. T. (2020). The impact of adding nano- Al₂O₃ and nano-ZnO to Iraqi diesel fuel in terms of compression ignition engines' performance and emitted pollutants. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100535. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535>
- Dong, K., Dong, X. & Jiang, Q. (2020). How renewable energy consumption lower global CO2 emissions? Evidence from countries with different income levels. *The World Economy*, 43(6), 1665-1698. <https://doi.org/10.1111/twec.12898>
- Elwardany, A. E., Marei, M. N., Eldrainy, Y., Ali, R. M., Ismail, M. & El-Kassaby, M. M. (2020). Improving performance and emissions characteristics of compression ignition engine: effect of ferrocene nanoparticles to diesel-biodiesel blend. *Fuel*, 270, 117574. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117574>
- Emiroğlu, A. O. & Şen, M. (2018). Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol-biodiesel-diesel fuel). *Applied Thermal Engineering*, 133, 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.069>
- Fidan, M. S. & Alkan, E. (2014). Bitkisel hammaddelerden elde edilen biyodizelin alternatif enerji kaynağı olarak kullanılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 144-160.
- Garcia, A., Monsalve-Serrano, J., Villalta, D. & Guzman-Mendoza, M. (2021). Methanol and OME_x as fuel candidates to fulfill the potential EURO VII emissions regulation under dual-mode dual-fuel combustion. *Fuel*, 287, 119548. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119548>
- Gharehghani, A., Asiaei, S., Khalife, E., Najafi, B. & Tabatabaei, M. (2019). Simultaneous reduction of CO and NO_x emissions as well as fuel consumption by using water and nano particles in Diesel–Biodiesel blend. *Journal of cleaner production*, 210, 1164-1170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.338>
- Hariram, V. & Shangar, R. V. (2015). Influence of compression ratio on combustion and performance characteristics of direct injection compression ignition engine. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 807-814. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.06.007>
- Hasan, A. O., Osman, A. I., Ala'a, H., Al-Rawashdeh, H., Abu-jrai, A., Ahmad, R., & Rooney, D. W. (2021). An experimental study of engine characteristics and tailpipe emissions from modern DI diesel engine fuelled with methanol/diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 220, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106901>
- Hawi, M., Elwardany, A., Ookawara, S. & Ahmed, M. (2019). Effect of compression ratio on performance, combustion and emissions characteristics of compression ignition engine fueled with jojoba methyl ester. *Renewable Energy*, 141, 632-645. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.041>

- Jaichandar, S., Jaichandar, S., Annamalai, K., Annamalai, K., Elango, V. & Arikaran, P. Effects of varying the compression ratio on the performance of a biodiesel fuelled diesel engine. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 3(3), 103-110.
- Joy, N., Balan, K. N., Nagappan, B. & Justin Abraham Baby, S. (2020). Emission analysis of diesel and butanol blends in research diesel engine. *Petroleum Science and Technology*, 38(4), 289-296. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1702680>
- Karagöz, M. (2020). Investigation of performance and emission characteristics of an CI engine fuelled with diesel-waste tire oil-butanol blends. *Fuel*, 282, 118872. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118872>
- Karagoz, M., Uysal, C., Agbulut, U. & Saridemir, S. (2021). Exergetic and exergoeconomic analyses of a CI engine fuelled with diesel-biodiesel blends containing various metal-oxide nanoparticles. *Energy*, 214, 118830. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118830>
- Lim, G., Lee, S., Park, C., Choi, Y. & Kim, C. (2013). Effects of compression ratio on performance and emission characteristics of heavy-duty SI engine fuelled with HCNG. *International journal of hydrogen energy*, 38(11), 4831-4838. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.188>
- Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W. & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 497-509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>
- Manigandan, S., Sarweswaran, R., Devi, P. B., Sohret, Y., Kondratiev, A., Venkatesh, S., ... & Joshua, J. J. (2020). Comparative study of nanoadditives TiO₂, CNT, Al₂O₃, CuO and CeO₂ on reduction of diesel engine emission operating on hydrogen fuel blends. *Fuel*, 262, 116336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116336>
- Nguyen, T., Pham, M. & Le Anh, T. (2020). Spray, combustion, performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fueled by fish-oil biodiesel blends. *Fuel*, 269, 117108. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117108>
- Özener, O. (2019). An assessment of real-world driving emissions and fuel consumption of a diesel bus with using a portable emissions and fuel consumption measurement system: İstanbul bus rapid transit-metrobus. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(3), 515-525.
- Paul, A., Panua, R. & Debroy, D. (2017). An experimental study of combustion, performance, exergy and emission characteristics of a CI engine fuelled by Diesel-ethanol-biodiesel blends. *Energy*, 141, 839-852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.137>
- Polat, F., Yeşilyurt, M. K., Ağbulut, Ü., Karagöz, M. & Saridemir, S. (2022). Experimental assessment of the influences of liquid-solid-gas fuel blends on DI-CI engine behaviors. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 511-524. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.024>
- Prasad, K. S., Rao, S. S. & Raju, V. R. K. (2021). Effect of compression ratio and fuel injection pressure on the characteristics of a CI engine operating with butanol/diesel blends. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1183-1197. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.042>
- Rajak, U., Nashine, P., Verma, T. N. & Pugazhendhi, A. (2019). Performance, combustion and emission analysis of microalgae Spirulina in a common rail direct injection diesel engine. *Fuel*, 255, 115855. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115855>
- Rajak, U., Ağbulut, Ü., Veza, I., Dasore, A., Saridemir, S. & Verma, T. N. (2022). Numerical and experimental investigation of CI engine behaviours supported by zinc oxide nanomaterial along with diesel fuel. *Energy*, 239, 122424. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122424>
- Raju, V. D., Kishore, P. S., Nanthagopal, K. & Ashok, B. (2018). An experimental study on the effect of nanoparticles with novel tamarind seed methyl ester for diesel engine applications. *Energy Conversion and Management*, 164, 655-666. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.032>
- Sajith, V., Sobhan, C. B. & Peterson, G. P. (2010). Experimental investigations on the effects of cerium oxide nanoparticle fuel additives on biodiesel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2, 581407. <https://doi.org/10.1155%2F2010%2F581407>
- Sarıdemir, S., Polat, F. & Kılınçel, M. (2016). Motor devir ve yükünün titreşim ve gürültü emisyonuna olan etkisinin incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 3(3), 459-466.
- Sarıdemir, S., Gürel, A. E., Ağbulut, Ü. & Bakan, F. (2020). Investigating the role of fuel injection pressure change on performance characteristics of a DI-CI engine fuelled with methyl ester. *Fuel*, 271, 117634. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117634>
- Sayin, C. & Gumus, M. (2011). Impact of compression ratio and injection parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine

- fueled with biodiesel-blended diesel fuel. *Applied thermal engineering*, 31(16), 3182-3188.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.044>
- Shaafi, T. & Velraj, R. (2015). Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: combustion, engine performance and emissions. *Renewable Energy*, 80, 655-663.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.042>
- Sheikholeslami, M., Keshteli, A. N. & Babazadeh, H. (2020). Nanoparticles favorable effects on performance of thermal storage units. *Journal of Molecular Liquids*, 300, 112329.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112329>
- Singh, R., Singh, S. & Kumar, M. (2020). Impact of n-butanol as an additive with eucalyptus biodiesel-diesel blends on the performance and emission parameters of the diesel engine. *Fuel*, 277, 118178.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118178>
- Simsek, D., Vural, E., Ozer, S. & Colak, N. Y. (2017). Model analysis of the effect of ethanol blended diesel fuels in diesel engines on ignition delay and combustion. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 3(4), 47-54.
- Soni, D. K. & Gupta, R. (2017). Application of nano emulsion method in a methanol powered diesel engine. *Energy*, 126, 638-648.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.049>
- Soudagar, M. E. M., Mujtaba, M. A., Safaei, M. R., Afzal, A., Ahmed, W., Banapurmath, N. R., ... & Taqui, S. N. (2021). Effect of Sr@ ZnO nanoparticles and Ricinus communis biodiesel-diesel fuel blends on modified CRDI diesel engine characteristics. *Energy*, 215, 119094.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119094>
- Sun, M., Dong, H., Dougherty, A. W., Lu, Q., Peng, D., Wong, W. T., & Yan, C. H. (2019). Nanophotonic energy storage in upconversion nanoparticles. *Nano Energy*, 56, 473-481.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.086>
- Tangöz, S., Akansu, S. O., Kahraman, N. & Malkoç, Y. (2015). Effects of compression ratio on performance and emissions of a modified diesel engine fueled by HCNG. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(44), 15374-15380.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.058>
- Venkatesan, E. P., Kandhasamy, A., Sivalingam, A., Kumar, A. S., Ramalingam, K., James Thadhani Joshua, P. & Balasubramanian, D. (2019). Performance and emission reduction characteristics of cerium oxide nanoparticle-water emulsion biofuel in diesel engine with modified coated piston. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(26), 27362-27371.
- Venu, H., Raju, V. D., Lingesan, S. & Soudagar, M. E. M. (2021). Influence of Al₂O₃ nano additives in ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine: performance, combustion and emission characteristics. *Energy*, 215, 119091.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119091>
- Wang, W., Chen, L., Sun, F. & Wu, C. (2002). The effect of friction on the performance of an air standard dual cycle. *Exergy An International Journal*, 2(4), 340-344.
[https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(02\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(02)00067-5)
- Wei, J., Yin, Z., Wang, C., Lv, G., Zhuang, Y., Li, X. & Wu, H. (2021). Impact of aluminium oxide nanoparticles as an additive in diesel-methanol blends on a modern DI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116372.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116372>
- Yasin, M. M., Yusaf, T., Mamat, R. & Yusop, A. F. (2014). Characterization of a diesel engine operating with a small proportion of methanol as a fuel additive in biodiesel blend. *Applied Energy*, 114, 865-873.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.012>
- Zhang, Z., Tian, J., Li, J., Ji, H., Tan, D., Luo, J., & Cui, S. (2021). Effects of different mixture ratios of methanol-diesel on the performance enhancement and emission reduction for a diesel engine. *Processes*, 9(8), 1366.

Düzlem yüzey ısı alıcılarda tekli ve çoklu hava jetinin ısı ve akış karakteristiklerine etkisinin sayısal analizi

Numerical analysis of the effect of single and cascade air jets on heat and flow characteristics in plane surface heat sinks

Ahmet Numan ÖZAKIN^{*1,a}, Abdüssamed KABAKUŞ^{2,b}

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25100, Erzurum

² Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 08000, Artvin

• Geliş tarihi / Received: 08.11.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 13.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 23.05.2022

Öz

Bu çalışmada, düzlem yüzey ısı alıcısı üzerinden tekli ve çoklu hava jeti ile gerçekleşen ısı transfer performansı Ansys-Fluent programı ile sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma zamandan bağımsız k-ε türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. On farklı Reynolds sayısı ($4000 \leq Re \leq 40000$), ve tekli ve çoklu nozul sayılarının düzlem ısı alıcıda ısı transferine etkileri irdelenmiştir. Analizler 40 mm nozul ısı alıcısı arası mesafede gerçekleştirilmiştir. Hava ise belirlenen Reynolds sayılarına karşılık gelen hızlarda 293.15 K sıcaklığında kontrol hacmine gönderilmiştir. Çalışmada ısı alıcısı üzerinde gerçekleşen sıcaklık dağılımını gösteren sıcaklık konturları ve ısı alıcısı yüzeyinde türbülans oluşumunun gözlemlendiği akım çizgi görüntüleri sunulmuştur. Sonuç olarak, her iki nozul çeşidinde de Reynolds sayısı arttıkça soğutma performansı artmıştır. Yaklaşık 38000 Reynolds sayısı değerine kadar tekli nozul çoklu nozula göre daha iyi bir soğutma performansı gösterirken, 38000 Reynolds sayısından sonra çoklu nozul ile daha iyi ısı transferi elde edildiği belirlenmiştir. Nusselt sayısı, en düşük Reynolds sayısında tekli nozulda çoklu nozula göre %60, en yüksek Reynolds sayısında ise çoklu nozulda tekli nozula göre %15 artış göstermiştir. Elde edilen sayısal sonuçların literatürde ayrı ayrı bulunan tekli ve çoklu hava jeti ile yapılan deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çarpan jet, Çoklu nozul, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Isı transferi

Abstract

In this study, heat transfer performance with single and cascade air jets over the plane surface heat sink was numerically investigated with Ansys-Fluent software. Numerical analyses was carried out using the time-independent k-ε turbulence model. The effects of ten different Reynolds numbers ($4000 \leq Re \leq 40000$) and single and cascade nozzle numbers on the heat transfer were investigated. Analyzes were carried out at a distance of 40 mm between the nozzle and the heat sink. The air, on the other hand, was sent to the control volume at a temperature of 293.15 K at velocities corresponding to the determined Reynolds numbers. In the study, temperature contours showing the temperature distribution on the heat sink and streamline images in which turbulence formation is observed on the heat sink surface are presented. As a result, cooling performance increased with increasing Reynolds number in both nozzle types. It was determined that while the single nozzle showed a better cooling performance than the cascade nozzle up to approximately 38000 Reynolds number, better heat transfer was obtained with the cascade nozzle after 38000 Reynolds number. The Nusselt number showed an increase of 60% at the lowest Reynolds number in the single nozzle compared to the cascade nozzle, and 15% in the cascade nozzle at the highest Reynolds number compared to the single nozzle. It has been observed that the numerical results obtained are compatible with the experimental studies conducted with single and cascade air jets separately in the literature.

Keywords: Impinging jet, Cascade nozzle, Computational fluid dynamics, Heat transfer

^{*a} Ahmet Numan ÖZAKIN; ahmet.ozakin@atauni.edu.tr, Tel: (0538) 935 05 26, orcid.org/0000-0002-2083-8703

^b orcid.org/0000-0002-3049-9493

1. Giriş

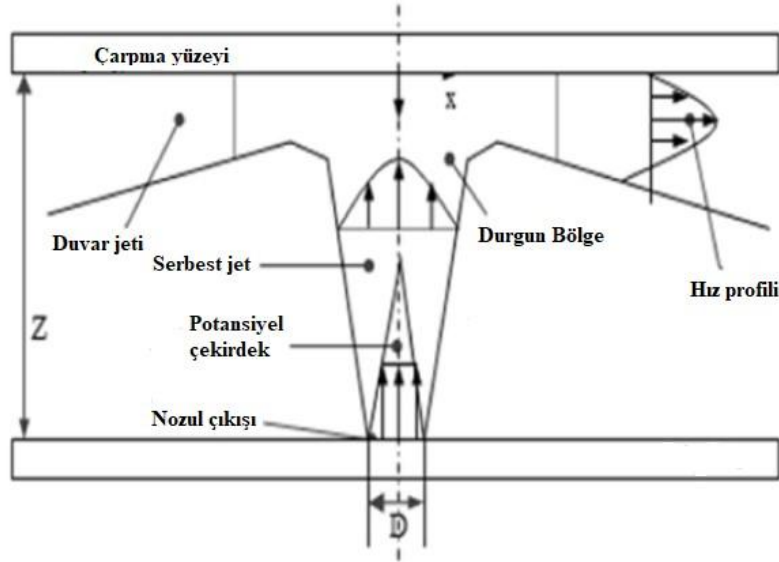
1. Introduction

Endüstride işletme sırasında ortaya çıkan ve bir takım tersinmezlikler sonucu oluşan yüksek ısı akıları sistemlerin çalışma performanslarını ve ekonomik ömürlerini olumsuz etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Yüksek ısı akılarının uzaklaştırılmasında literatürde çarpan hava jeti (Karabulut vd., 2018; Karabulut, 2019), su jeti (Baghel vd., 2021), mikro kanallar (Spizzichino vd., 2020), sprej soğutma (Yeşildal & Yakut 2017; Kabakuş vd., 2021) vb. birçok soğutma metodu kullanılmaktadır. Düşük soğutucu akışkan debisi ile yüksek ısı transfer performansı elde edebilmek için kullanılan çarpan hava jeti ile soğutma, yüksek ısı akılarının uzaklaştırılması için kurutma uygulamalarında, yüksek ısı akısı yoğunluklarına sahip mikro-elektronik çipler ve devre

elemanlarında, gaz türbinlerinde, tekstil ve kâğıt üretim endüstrisi gibi uygulama alanlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (De Lemos vd., 2008; Yakut vd., 2020; Hüseyin, 2021; Dagtekin & Oztop 2008; Yakut vd., 2015).

Çarpan hava jeti ile soğutmada, farklı geometrilerdeki nozullardan gönderilen havanın yüksek ısı akısına sahip yüzeye çarptırılması sonucu, çarpma bölgesinde sınır tabakası azalır ve ısı taşınım katsayısı artar. Böylece hava jetinin çarptığı bölgede ısı transferi artarak etkin bir soğutma gerçekleşir (Hüseyin, 2021; Yakut vd., 2015).

Çarpan hava jetinde farklı türbülans karakteristiklerine sahip olan üç bölge oluşmaktadır (Şekil 1). Bunlar serbest jet bölgesi, durgun (çarpma) bölgesi ve radyal yönde akışın gerçekleştiği bölgelerdir (Chauhan & Thakur 2018).



Şekil 1. Çarpan jet oluşumu (Chauhan, 2018; Chauhan, 2012)

Figure 1. Impinging jet formation (Chauhan, 2018; Chauhan, 2012)

Çarpan jette, nozul geometrisinin (Kilic & Başkaya 2017), nozul-ısı alıcı arası mesafenin (Rim vd. 2017), jet sayısının (Husain vd., 2013), çarpma bölgesi geometrisinin (Karabulut, 2019), jet hızının (Yakut vd., 2016), vb. parametrelerin soğutma performansına etkilerinin incelendiği çalışmalar literatürde yer almaktadır. Yapılan çalışmalar deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, düzlem plaka ısı alıcılarda, farklı Reynolds sayılarında tekli ve tasarımı yapılan çoklu nozullar için ANSYS Fluent programı ile modelleme yapılarak oluşturulan çarpan hava jetinin ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transferine etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Çoklu hava jetinin belirlenen geometrisi için Reynolds sayısının 38000 ve üstü değerlerinde

tekli hava jetinden daha iyi bir soğutma gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Literatürde çarpan jet ile yapılan çalışmalar aşağıdaki gibidir.

Yakut vd. (Yakut & Yakut, 2020), rüzgar tüneline Taguchi yöntemi ile optimize edilmiş altıgen kanatçıklı ısı alıcılarda akış parametrelerinin belirlemek için deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Kanatçıklı ısı alıcının yüzeyinde oluşan dönümlü ve kararsız akışın plaka yüzeyindeki basınç değişimine etkisini $C_{p,x,y}$ basınç katsayısı değerlerini hesaplayarak deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçların birbirleriyle uyumlu olduklarını ve en yüksek basınç değerinin 100 mm kanat yüksekliğinde, 9 m/sn hız değerinde ve x

yönünde 0.6 istasyonunda, y yönünde ise 0.8 istasyonunda pik yaptığını belirlemiştir.

Çalışır vd. (2017) çalışmalarında, 7x3 dikdörtgen dizimli dairesel çarpan hava jetleri ile üçgen ve kare geometriye sahip kanatçıklı ısı alıcılar üzerindeki akışı karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısının, nozul- plaka arasındaki mesafenin ve kanatçık geometrisinin plaka üzerindeki akışa etkisini irdelemiştir. Kare kanatçıklı ısı alıcıda jet akışının kanat üstünde ayrıştığını ve Nusselt sayısının çarpma yüzeyinde ani düşüşe uğradığını tespit etmişlerdir. Nozul-ısı alıcı arası mesafenin $H/d=2$ olduğu durumda duvar jetlerinin daha etkili olduğu ve iki komşu jetin duvar jetlerinin etkileşime uğradığını belirlemiştir.

Karabulut ve Alnak (2021) Ansys-Fluent ile gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalarında, iki farklı yüzey geometrisine sahip bakır ısı alıcılarda $Re=5000-11000$ aralığında, $H/D_h=3$ ile 6 değerlerinde ve jet giriş genişlikleri $D_h=0.5-1$ olmak üzere çalışma parametrelerini belirlemişler ve sonuç olarak $D_h=0.5$, $H/D_h=6$ ve $Re=5000$ için Nusselt sayısının ters yamuk yüzey geometrisine göre çatı yüzey geometrisinde yaklaşık %26 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Kılıç ve Özcan (2019), yüksek ısı akısına maruz bırakılan bir ısı alıcı üzerinden gerçekleşen ısı transferini farklı Reynolds sayıları, nanoakışkanlar, hacimsel oranlar ve parçacık çapları için sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısının artışıyla ısı transferinin arttığını, ayrıca nanoakışkan partikül çapını azaltılmasıyla Nusselt sayısının arttığını belirlemiştir. Farklı hacimsel oranlardaki değişimin ısı transferinde belirgin bir artışa sebep olmadığını, en iyi ısı transfer performansının Cu-Su ile elde edildiğini belirtmişlerdir.

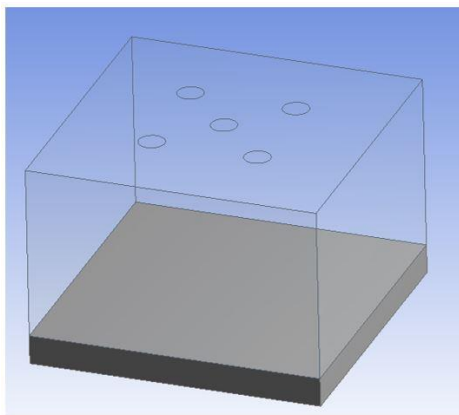
Çulun vd. (2017) çalışmalarında, plakaya çarptırılan çoklu çarpan jetlerde, jetlerin birbiriye etkileşimi sonucu ısı transferinin olumlu veya olumsuz etkilenebileceğini belirtmişlerdir. Çoklu jetlerde ısı transferini olumsuz etkileyen çapraz akışların önlenmesi için, Reynolds sayısı, jetler arası mesafe, giriş türbülans yoğunluğu ve hedef plaka orifis plakalar arası boyutsuz mesafe gibi değişken parametreler incelenerek ısı transferi üzerine etkilerini görebilmek için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak türbülans yoğunluğundan ziyade sayısal analizde kullanılan türbülans modeli seçiminin sayısal sonuçları deney sonuçlarına yaklaştırdığını ifade etmişlerdir.

Karabulut ve Alnak (2020), 1000 W/m^2 ısı akısına maruz bıraktıkları farklı geometrilerdeki bakır plakaları çarpan jet ile soğutmuşlardır. Ansys Fluent ile yaptıkları sayısal çalışmada $4000-10000$ Reynolds sayısı ve $4-10 H/D_h$ nozul ısı alıcı arası mesafede çalışmışlardır. $Re=4000$ $H/D_h=4$ için dikdörtgen desenli geometride, sur desenli geometriye göre %31.45 daha yüksek Nu sayısı elde etmişlerdir.

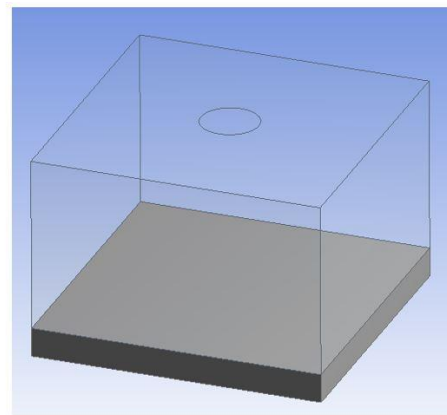
2. Materyal ve metot

2. Meterial and methods

Tekli ve çoklu hava jeti ile soğutmanın sayısal olarak modellendiği bu çalışmada 4000 ile 40000 aralığında on farklı Reynolds sayısı için sayısal analizler yapılmıştır. Isı alıcı olarak $40 \times 40 \times 5$ mm ölçülerinde 5000 serisi alüminyum malzeme kullanılmıştır. Analizler 40 mm nozul ısı alıcı arası mesafede gerçekleştirilmiştir. Hava ise belirlenen Reynolds sayılarına karşılık gelen hızlarda 293.15 K sıcaklığında kontrol hacmine gönderilmiştir. CFD çözümlerinde kullanılan geometri Şekil 2'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. CFD analizlerinde kullanılan geometriler. (a) Çoklu nozul, (b) Tekli nozul
Figure 2. Geometries used in CFD analysis. (a) Cascade nozzle, (b) Single nozzle

Tekli nozul çapı 10 mm olarak belirlenirken, çoklu nozulda nozul alanı tekli nozul ile eşit alana sahip her birinin çapı 4.47 mm olan beş adet nozul kullanılmıştır. Belirlenen geometriler ANSYS-Fluent 16.0 yazılımı yardımıyla modellenmiştir. Analizler aşağıda belirtilen kabuller ve sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir.

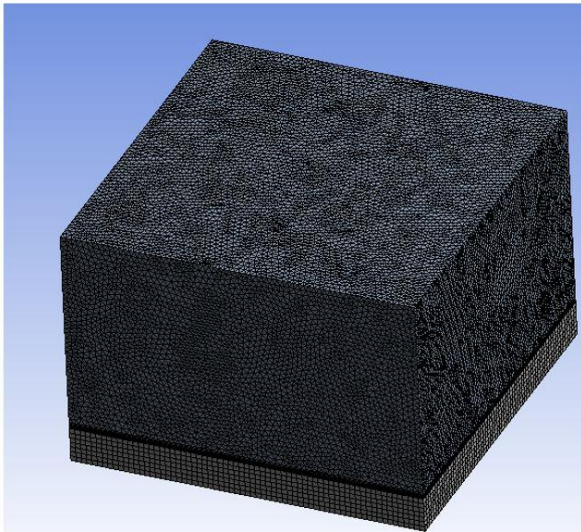
- Akışkan olarak gaz fazında ve sıkıştırılmaz hava kullanılmıştır.
- Havanın fiziksel özellikleri sabittir.
- Kontrol hacmi içerisindeki hava akışı sürekli dir.
- Kontrol hacmi kararlı olarak kabul edilmiştir.
- Yer çekimi etkileri ihmal edilmiştir.

Yukarıda belirtilen kabuller göz önünde bulundurularak analizlerde korunum denklemleri kullanılmıştır. Kütle korunumu denklemi;

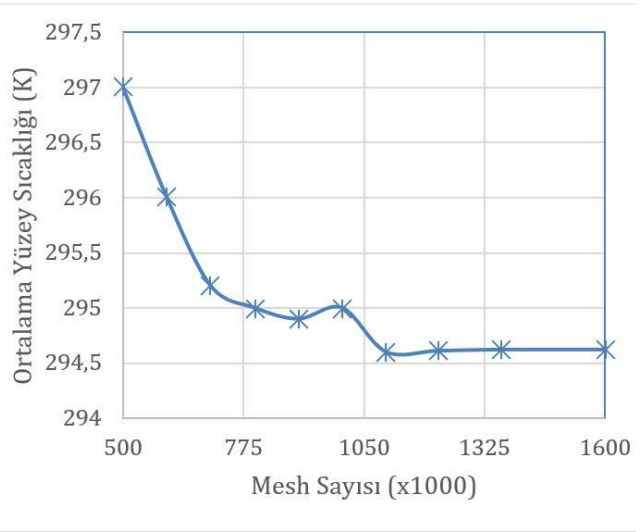
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

momentum denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$



(a)



(b)

Şekil 3. Kontrol hacimleri için kullanılan mesh görüntüsü (a), Tekli nozul için Mesh bağımsızlık analizi (b)
Figure 3. Mesh image used for control volumes (a), Mesh independence analysis for single nozzle (b)

Sayısal çalışmada enerji ve momentum için ikinci dereceden ayrıklaştırma, algoritma olarak “SIMPLE” basınç-hız eşleştirme algoritması kullanılarak standart basınç ile sonuçlara ulaşılmıştır.

enerjinin korunumu denklemi;

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu çalışmada kontrol hacminin alt kısmında bulunan ısı alıcıya 1000 W/m² sabit ısı akısı ve belirtilen sınır şartlarında hava hızları tanımlanarak sonuçlara ulaşılmıştır. Aynı zamanda çalışmada türbülans modeli olarak “k-ε RNG” modeli ile “Enhanced Wall Functions” şartları kullanılmıştır. Bu şartların yeterli iterasyon ve mesh elemanı şartlarının da sağlandığı durumda ısı transferi analizlerinde doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Karagoz vd., 2017).

Meshing kısmında tekli ve çoklu geometriler için oluşturulan mesh yapılarında 500000 mesh sayısından başlanıp gittikçe artırılarak yapılan mesh testlerinde sırasıyla 1365000 ve 1589000 adet mesh kullanılarak Orthogonal Quality %90-%94 arasında oluşturulmuştur. Mesh sayısında daha fazla yapılabilecek bir artışın Orthogonal Quality ve sonuçlarda değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Mesh yapısı ve Mesh bağımsızlık analizi sonuçları Şekil 3’te görülmektedir.

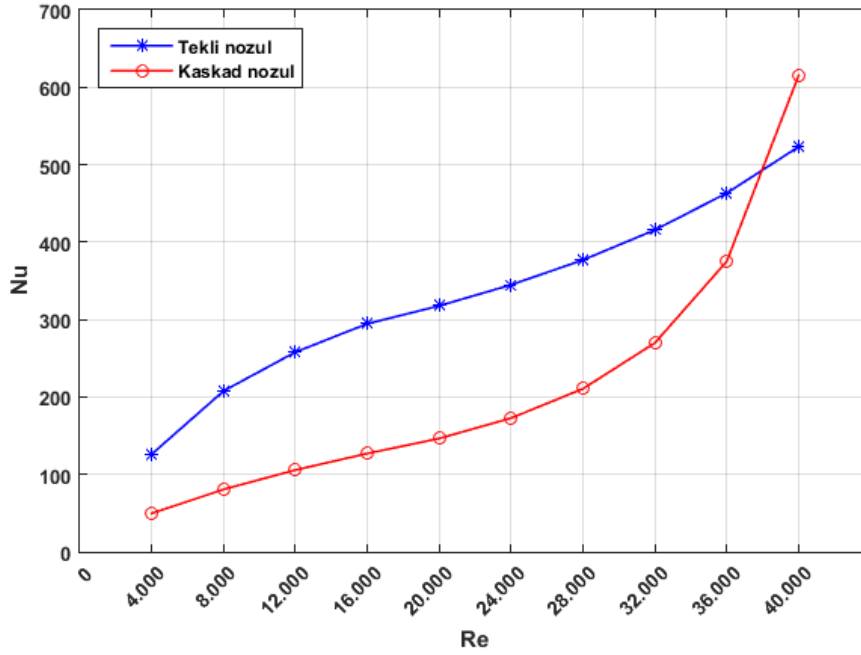
3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Tekli ve çoklu çarpan hava jetlerinin soğutma performanslarının kıyaslanması amacıyla yapılan sayısal çalışmalarda farklı Reynolds sayıları ve nozul dizilişleri için 20 adet analiz yapılmıştır. Çoklu hava jeti ile yapılan analizlerde elde edilen Nusselt sayıları Reynolds sayısının 38000 civarına

ulaşana kadar tekli hava jetine kıyasla düşük bir performans göstermiştir. Belirtilen Reynolds sayısının üzerine çıkıldığında çoklu hava jeti tekliye kıyasla daha iyi bir performans

göstermiştir. Şekil 4'te farklı nozul dizilişleri için elde edilen Nusselt-Reynolds grafiği görülmektedir.

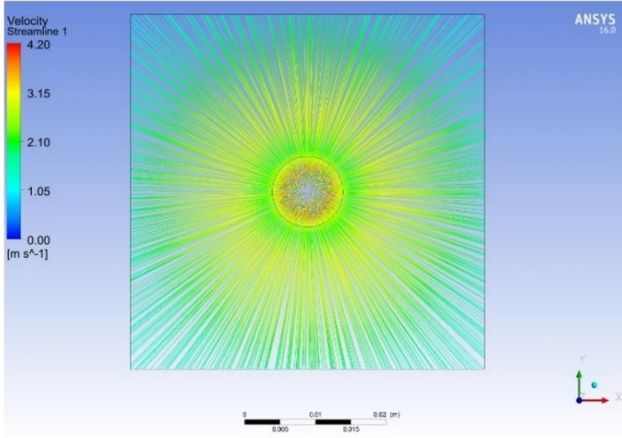


Şekil 4. Farklı Reynolds sayılarında tekli ve çoklu nozulların soğutma performansları.

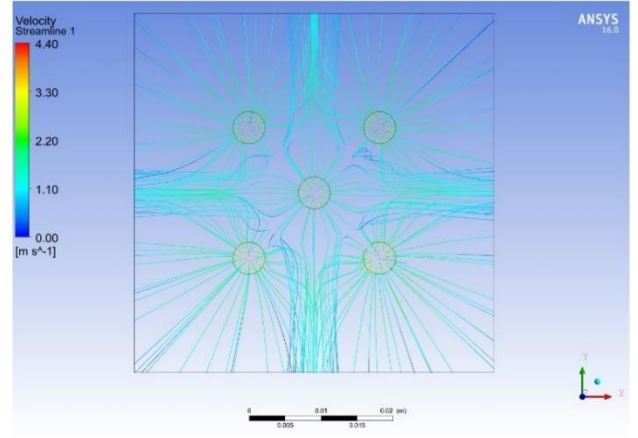
Figure 4. Cooling performances of single and cascade nozzles at different Reynolds numbers.

Tekli ve çoklu hava jetlerin soğutma performansları incelendiğinde Reynolds sayısının artışıyla Nusselt sayısında da artış gözlemlenmiştir (Şekil 4). Yaklaşık 38000 Reynolds değerine kadar tekli nozul çoklu nozula göre daha iyi bir soğutma performansı gösterirken, 38000 Reynolds sayısından sonra çoklu nozulda daha yüksek Nusselt Sayısı değeri elde edilmiştir. Çoklu hava jetinde Reynolds sayısının 38000 ve üzerinde olduğu durumda daha iyi bir performans göstermesinin sebebi, düşük Reynolds sayılarında çoklu jetle oluşturulan jetlerin birbirleriyle temas ederek girdap yapısı oluşturmaları ve yüzeye tam temas sağlanmadan ısı alıcı yüzeyini terketmesi, Reynolds sayısı kritik eşik değerini ($Re=38000$) geçtiğinde ise oluşan girdapların şiddetini artırarak bölgesel olarak türbülans oluşturmasıdır. Isı alıcı

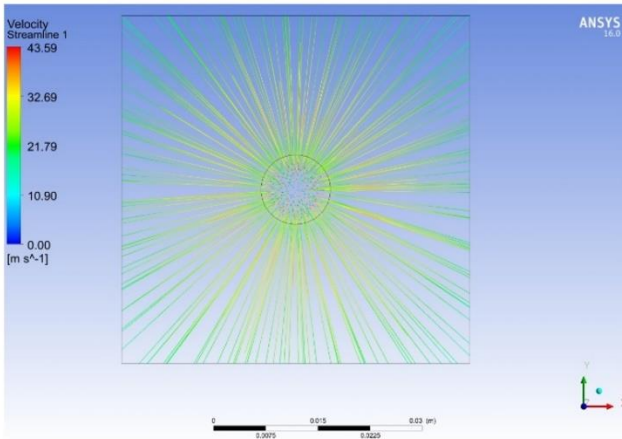
yüzeyinde oluşan şiddetli türbülans yüzeyden gerçekleşen ısı taşınımı artırarak soğutmaya olumlu etki yapmıştır (Şekil 5-6). Böylece, düşük Reynolds sayılarında çoklu nozula sahip hava jetinde sınır tabakalardaki akışın birbirine fazla karışmadan kontrol hacmini terk etmesi sebebiyle tekli nozula kıyasla daha düşük bir soğutma performansı göstermiştir. Nusselt sayısı tekli nozulda en düşük Reynolds sayısında en yüksek Reynolds sayısına göre %75, çoklu nozulda ise en düşük Reynolds sayısında en yüksek Reynolds sayısına göre %92 artış göstermiştir. Ayrıca Nusselt sayısı, en düşük Reynolds sayısında tekli nozulda çoklu nozula göre %60, en yüksek Reynolds sayısında ise çoklu nozulda tekli nozula göre %15 artış göstermiştir.



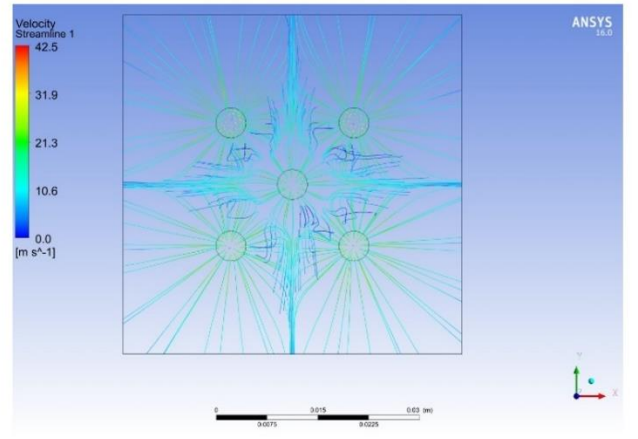
a. Re=4000, Tekli



b. Re=4000, Çoklu



c. Re=40000, Tekli



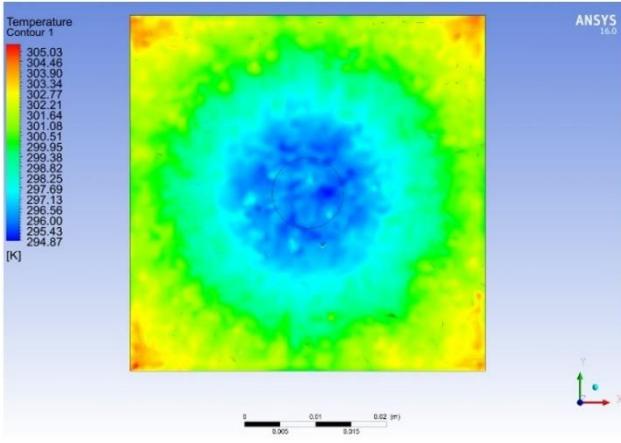
d. Re=40000, Çoklu

Şekil 5. Tekli ve çoklu hava jetlerinin 4000 ve 40000 Reynolds akış çizgileri.

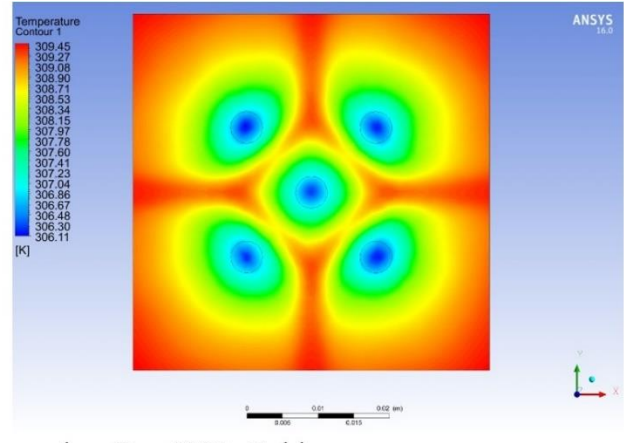
Figure 5. Streamlines of single and cascade air jets, 4000 and 40000 Reynolds.

Şekil 5 incelendiğinde tekli nozul için yapılan analizlerde (a-c) akış çizgilerinin ısı alıcı yüzeyine çarparak yüzeyi takip ederek kontrol hacminden ayrıldığı görülmektedir. Ancak çoklu hava jetinde (b-d) beş farklı girdap bölgesi bulunmaktadır. Reynolds sayısının artışı ile bu bölgelerdeki akış çizgilerinin daha sık bir formasyonda oluştuğu görülmektedir. Yüksek Reynolds sayılarında çoklu hava jetinin tekli jete göre daha iyi bir performans

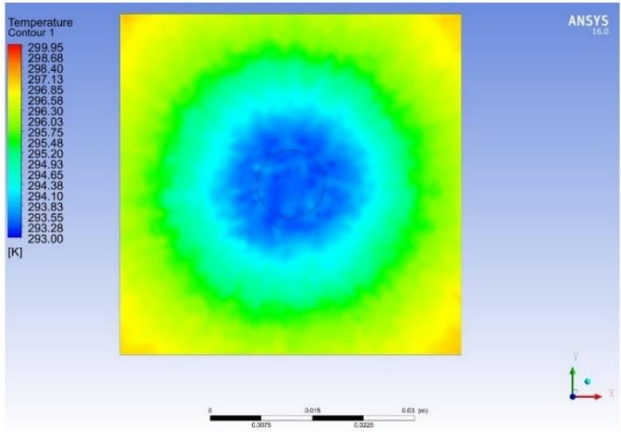
göstermesinin temel sebeplerinden birisi de oluşan girdap bölgelerinde daha sık akışa sahip olan yapıdır. Yani çoklu hava jetinde akış daha net bir şekilde dört farklı bölgeye ayrılmaktadır. Reynolds sayısının düşük olduğu durumlarda ise bu durumun tersi olarak akış ısı alıcı yüzeyinde daha az bir basınç oluşturarak yüzeyden bir miktar yükselerek difüze olmaktadır.



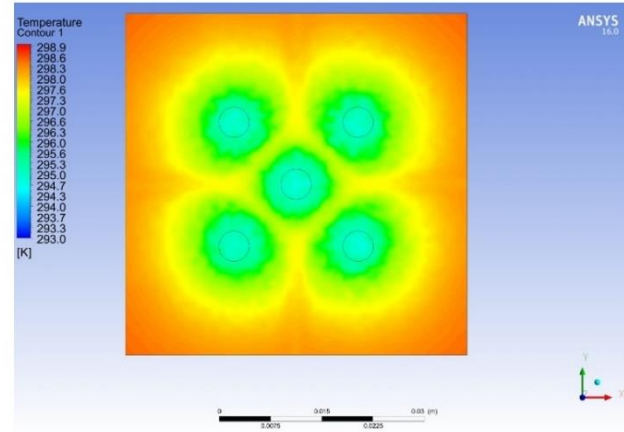
a. Re=4000, Tekli



b. Re=4000, Çoklu



c. Re=40000, Tekli



d. Re=40000, Çoklu

Şekil 6. Tekli ve çoklu hava jetlerinin 4000 ve 40000 Reynolds yüzey sıcaklık konturları.

Figure 6. Surface temperature contours of single and cascade air jets, 4000 and 40000 Reynolds obtained using optimum parameters.

Şekil 6'da görülen sıcaklık konturları incelendiğinde çoklu nozula sahip geometride tekliye kıyasla daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Çoklu hava jeti ile çalışmanın diğer bir avantajı jetin ısı alıcı yüzeyine daha fazla sayıda nozul ile gönderilerek bu homojenliğin sağlanmasıdır. Jetin ısı alıcıya çarptığı bölgelerde oluşan fazla soğutma çoklu jet için daha geniş bir alanda meydana gelmektedir.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada tekli ve çoklu hava jeti ile soğutmanın farklı Reynolds sayılarındaki performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma zamana bağlı olmayan (Steady-State) durumu için ve $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. On farklı Reynolds sayısı (4000-40000), ve tekli ile çoklu nozulların düzlem ısı alıcıları soğutmak için kullanılması durumunda ısı transferine etkileri irdelenmiştir. Analizler 40 mm nozul ısı alıcı arası mesafede

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ısı alıcılar üzerindeki sıcaklık dağılımlarını gösteren sıcaklık konturları ve ısı alıcı yüzeyinde türbülans oluşumunun gözlemlendiği akım çizgi görüntüleri sunulmuştur. Sonuç olarak, her iki nozul çeşidinde de Reynolds sayısı arttıkça soğutma performansı artmıştır. Yaklaşık 38000 Reynolds değerine kadar tekli nozul çoklu nozula göre daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir. Reynolds sayısının artırılarak 38000 Reynolds civarından sonra çoklu nozul ile daha iyi ısı transferi elde edildiği belirlenmiştir. Nusselt sayısı, en düşük Reynolds sayısında tekli nozulda çoklu nozula göre %60, en yüksek Reynolds sayısında ise çoklu nozulda tekli nozula göre %15 artış göstermiştir.

Elde edilen çalışma sonuçlarına göre, belirtilen geometrik özellikteki ısı alıcı-nozul kombinasyonlarında Reynolds sayısının 38000 kritik eşikini geçmesiyle çoklu nozul daha iyi bir performans göstermektedir. Bu durum Reynolds sayısının artmasıyla yüzeye çarpan akışın yüksek basınç sebebiyle sınır tabakanın daha fazla incilmesi (yüzey izdüşümüne karşılık gelen

nozulların tekliye göre daha fazla alanda etkili olması) ile açıklanabilir.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışmada yazarlar makaleye eşit katkıda bulunmuşlardır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

Ansyes Workbench, Fluent Software (Version 16)

Baghel, K., Sridharan, A. & Murallidharan, J. S. (2021). Heat transfer characteristics of free surface water jet impingement on a curved surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164, 120487. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120487>

Chauhan, R., Singh, T., Thakur, N. S., Kumar, N., Kumar, R. & Kumar, A. (2018). Heat transfer augmentation in solar thermal collectors using impinging air jets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3179-3190. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.025>

Chauhan, R. & Thakur, N. S. (2012). Heat transfer and friction characteristics of impinging jet solar air heater. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(4), 043121. <https://doi.org/10.1063/1.4747821>

Çalışır, T., Çalışkan, S., Kılıç, M. & Başkaya, Ş. (2017). Çarpan akışkan jetleri kullanarak kanatçıklı yüzeyler üzerindeki akış alanının sayısal olarak incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 32(1).

Çulun, P., Çelik, N. & Kapan, S., (2017). Çoklu çarpan jet uygulamalarında giriş türbülans yoğunluğunun etkisinin araştırılması. *International Conference on Multidisciplinary,*

Science, Engineering and Technology, (IMESET'17 Bitlis), Oct 27-29, Bitlis.

Dagtekin, I. & Oztop, H. F. (2008). Heat transfer due to double laminar slot jets impingement onto an isothermal wall within one side closed long duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(1), 65-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.013>

De Lemos, M. J. & Fischer, C. (2008). Thermal analysis of an impinging jet on a plate with and without a porous layer. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 54(11), 1022-1041. <https://doi.org/10.1080/10407780802473590>

Husain, A., Kim, S. M. & Kim, K. Y. (2013). Performance analysis and design optimization of micro-jet impingement heat sink. *Heat and Mass Transfer*, 49(11), 1613-1624. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1202-3>

Hüseyin, K. 2021. İkili çarpan jet ile soğutulan sıcak plakanın yüzey şeklinin ısı transferine etkisinin sayısal analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1), 152-163. <https://doi.org/10.29130/dubited.754908>

Kabakuş, A., Yakut, K., Özakın, A. N., & Yakut, R. (2021). Experimental determination of cooling performance on heat sinks with cone-jet electrospray mode. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(3), 665-670. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.11.004>

Karabulut, K., Alnak, D. E. & Koca, F. (2019). Investigation of heat transfer from heated square patterned surfaces in a rectangular channel with an air jet impingement. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3(1), 78-86.

Karabulut, K., Alnak, D. E. & Koca, F. (2018). Analysis of cooling of the heated circle patterned surfaces by using an air jet impingement. *ICENS 4th International Conference on Engineering and Natural Science*.

Karabulut, K. (2019). Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet impingement. *Journal of Computational Electronics*, 18(4), 1259-1271.

Karabulut, K. & Alnak, D. E. (2020). Değişik şekilde tasarlanan ısıtılmış yüzeylerin hava jeti çarpmalı soğutulmasının araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 88-98.

Karabulut, K. & Alnak, D. E. (2021). Dikdörtgen bir kanaldaki farklı desenli yüzey geometrilerinin ısı transferine olan etkilerinin incelenmesi. *Tesisat Mühendisliği*, 183, 37-49.

- Karagoz, S., Afshari, F., Yildirim, O. & Comakli, O. (2017). Experimental and numerical investigation of the cylindrical blade tube inserts effect on the heat transfer enhancement in the horizontal pipe exchangers. *Heat and Mass Transfer*, 53(9), 2769-2784. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2021-8>
- Kılıç, M. & Başkaya, Ş. (2017). Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akılı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 693-707. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.337616>
- Kılıç, M. & Özcan, O. (2019). Farklı parametreler için nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin sayısal incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1501-1516.
- Rim, B. K., Saïd, N. M., Bournot, H. & Le Palec, G. (2017). Effect of nozzle-to-plate spacing on the development of a plane jet impinging on a heated plate. *Heat and Mass Transfer*, 53(4), 1305-1314. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1904-4>
- Spizzichino, M., Sinibaldi, G. & Romano, G. P. (2020). Experimental investigation on fluid mechanics of micro-channel heat transfer devices. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 118, 110141. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110141>
- Yakut, R. & Yakut, K. (2020). Hava jetinin altıgen kanatlı ısı alıcıya çaptırılmasıyla elde edilen basınç katsayılarının deneysel ve nümerik olarak belirlenmesi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 56-64.
- Yakut, K., Kabakuş, A., Yeşildal, F. & Karabey, A. (2015). Kanal akışında optimize edilmiş ısı alıcıların çarpan jetle ısı transferi ve akış karakteristikleri analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 31(1), 43-55.
- Yakut, R., Yakut, K., Yeşildal, F. & Karabey, A. (2016). Experimental and numerical investigations of impingement air jet for a heat sink. *Procedia Engineering*, 157, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.33>
- Yesildal, F. & Yakut, K. (2017). Optimization of the spray cooling parameters for a heat sink by the Taguchi method. *Atomization and Sprays*, 27(12). <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2018019951>

Betonda atık vermikülit kullanımının betonun mineralojik ve kimyasal yapısına olan etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of using waste vermiculite in concrete on the mineralogical and chemical structure of concrete

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI^{1,a}, Merve SOĞANCIOĞLU KALEM^{*2,b}

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 42130, Konya

• Geliş tarihi / Received: 25.03.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 30.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 08.06.2022

Öz

Günümüzde atık maddelerin geri kazanılarak yapı malzemeleri içerisinde kullanımı ile ilgili yeni yaklaşımlar meydana gelmektedir. Bu atıkların yeniden kullanımı ile önemli çevresel problemlerin önüne geçilmekle birlikte yapı malzemelerinin üretiminde kullanılacak ham maddelerden de tasarruf edilmektedir. Buradan hareketle bu çalışma kapsamında önemli bir çevresel sorun olan ve henüz bir değerlendirme alanı bulamamış olan atık vermikülit madenin beton içerisinde agrega yerine değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda ince agrega ile yer değiştirilen atık vermikülitin (AVK) karakterizasyonu ve elde edilen beton örneklerinin kimyasal ve mineralojik bileşimleri SEM-EDS, FTIR ve XRD analizleri ile ortaya koyularak betonun yapısında meydana gelen kimyasal ve mineralojik değişimler betonun basınç dayanımı ile ilişkilendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre atık vermikülit dozunun artışı ile birlikte beton basınç dayanımında meydana gelen düşüşler ve betonun kimyasal yapısında görülen bağlanmış fonksiyonel O-H grupları, beton karışımının fazladan su ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Ancak elde edilen sonuçlar neticesinde düşük dozlarda atık vermikülit içeren betonların basınç dayanımının önemli olmadığı yapısal alanlarda da kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Agrega, Atık vermikülit, Beton, FTIR, SEM-EDS, XRD

Abstract

Today, new approaches are emerging regarding the recycling of waste materials and their use in building materials. With the reuse of these wastes, important environmental problems are avoided and the raw materials to be used in the production of building materials are also saved. From this point of view, within the scope of this study, it is aimed to evaluate the waste vermiculite mine, which is an important environmental problem and has not yet found an evaluation area, instead of aggregate in the concrete. In this context, the characterization of waste vermiculite (AVK) replaced with fine aggregate and the chemical and mineralogical compositions of the obtained concrete samples were revealed by SEM-EDS, FTIR and XRD analyzes, and the chemical and mineralogical changes in the structure of the concrete were associated with the compressive strength of the concrete. According to the results obtained, the decrease in the compressive strength of the concrete with the increase of the waste vermiculite dose and the bound functional O-H groups seen in the chemical structure of the concrete show that the concrete mixture needs extra water. However, as a result of the obtained results, it has been shown that concrete containing low doses of waste vermiculite can be used in structural areas where the compressive strength is not important.

Keywords: Aggregate, Waste vermiculite, Concrete, FTIR, SEM-EDS, XRD

^{*b} Merve SOĞANCIOĞLU KALEM; msogancioglu@ktun.edu.tr, Tel: (0332) 5121612, orcid.org/0000-0002-8874-1801

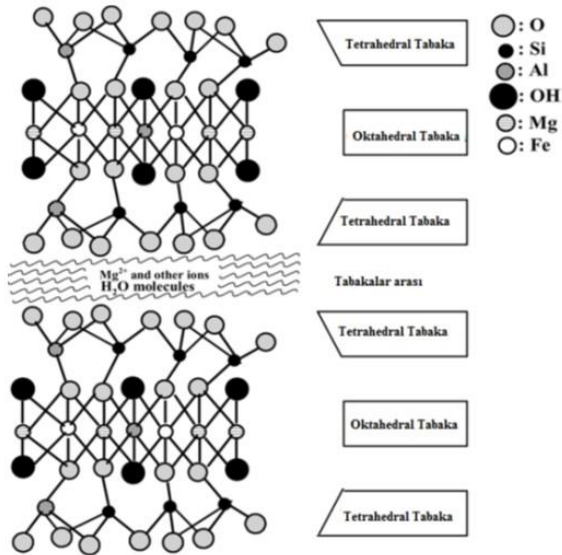
^a orcid.org/0000-0002-5898-2137

1. Giriş

1. Introduction

Vermikülit, endüstriyel olarak genişleme özelliği olan tüm mika grubu minerallerini (biotit, flogopit ve hidrobiotit) içine alan genel bir terim olarak adlandırılmaktadır. Mineralojik olarak ise tek başına bir grubu temsil etmekte olup sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak da tanımlanabilir. Rengi sarımsı kahve, yeşil bazen de siyah olabilir (DPT, 2001).

Vermikülit, katmanlı bir yapıda olup içinde su molekülleri bulunduran hidratlaşmış levha magnezyum-alüminyum-demir silikatlarından oluşan bir 2:1 filossilikat mineral grubudur (Duman & Tunç, 2008). Kristal yapısı ise Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Vermikülitin kristal yapısı (Duman ve Tunç, 2008)

Figure 1. Crystal structure of vermiculite

Şekil 1'e göre iki tetrahedral tabaka arasında oktahedral tabakadan oluşmaktadır. Vermikülitte, kısa bir zaman içinde ve yüksek sıcaklıklarda yaklaşık 1000°C ısıtma ile katmanlar arasında bulunan su, su buharına dönüşür ve vermiculit silikat katmanında hasar oluşturur ve genişleme meydana gelir (Marcos & Radriguez, 2011). Genleşmenin neticesinde, vermiculit yığın yoğunluğu yaklaşık 0.8 g/cm³'ten 0.08 g/cm³'e kadar azalmaktadır. Yığın yoğunluğundaki azalma, genişletirmenin yapıldığı fırının performansına ve vermiculitin kalitesine bağlıdır. Isıl işlemler neticesinde yaklaşık 30 katlık genişleme olmaktadır (Strand, 1983; Loughbrough, 1991, DPT, 2001).

Dünyada birçok ülkede vermiculit rezervleri bulunmaktadır. En önemli rezervler ise ABD ve Güney Afrika Cumhuriyeti'nde (GAC) bulunmaktadır. 2019 yılı rakamları itibari ile GAC'de 158013 ton vermiculit üretimi vardır (Word Mining Data 2019, 2021).

Türkiye'de vermiculit yataklarının varlığı pek bilinmemekle beraber jeolojik çalışmalar esnasında ofiyolit kuşaklarında vermiculit oluşumlarına rastlanmıştır (Toksoy, 1997). Bilinen vermiculit yatakları Malatya-Darende-Kuluncak, Eskişehir-Sarıcakaya, Sivas-Yıldızeli-Karakoç ve Elazığ-Harput-Arduçluk zuhurlarındadır (DPT, 2001).

Son yıllarda Sivas-Yıldızeli-Karakoç zuhurlarının incelenmesi neticesinde, bu zuhurlardaki cevherleşmenin olduğu zaman açısından Kuluncak zuhurlarıyla benzerlik gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Bu cevherleşme piroksen ve amfibol içeriğinin fazla olduğu ultramafik kütlelerin alkali damar kayalarla kesilmesi neticesinde oluşmuştur.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nce yapılan değerlendirmeler ve saha gözlemleri neticesinde genişleme özelliği iyi olan 2.750.000 ton ve düşük kaliteli 2.475.000 ton muhtemel rezervli tüvenan vermiculit cevheri tespit edilmiştir (DPT, 2001). Yapılan hesaplamalar yaklaşık 6-7 milyon ton vermiculit rezervi olduğunu göstermektedir (Aras, 1984).

Dünyada vermiculit üretimi açık ocak işletmeciliği ile yapılmaktadır. Kalite, tenör ve miktar açısından ekonomik sınırlar içinde kalan cevher zenginleştirme ünitesinde gerekli zenginleştirme yapıldıktan sonra genişletirmeye tabi tutulur (DPT, 2001).

Cevher ocaktan çıkarılarak, primer kırıcıdan geçirilir daha sonra yaş elek metodu ile harmanlama yapılarak fraksiyonlarına ayrılır. Harmanlamadan sonra konsantreler toplanır, kurutulur ve boyutlarına ayrılarak genişletirme ünitesine gönderilir ve 900-1000°C'de düşey fırınlarda 4-8 saniye bekletilerek ani ısı etkisiyle genişletirilir. Genleşmiş kısımlar harmanlama ile genişlenlerden ayrılır. Ayrılan kısım satışa hazır hale getirilir (Toksoy, 1997).

Vermikülitin ham halinin kullanımı oldukça azdır. Endüstride en çok tercih edilen formu genişletilmiş halidir. 1950'li yıllara kadar vermiculit ısı yalıtım özelliği ile dolgu malzemesi ve blok olarak kullanılırken yapılan çalışmalarla diğer alanlarda da kullanılabileceği sonucuna

ulaşmıştır. ABD’de, geliştirilmiş vermikülit genellikle inşaat ve tarım alanlarında kullanılmaktadır. Ses ve ısı yalıtımında geliştirilmiş vermikülit, hafif yapı malzemelerinin yapımında portland çimento ile birlikte iyi sonuç vermektedir. Vermikülit dökümhanelerde ve çelik fabrikalarında yalıtım özellikleri, kolay uygulanması, hafifliği, ucuz maliyeti ve ateşe dayanıklı olması sebebiyle tercih edilir (Toksoy, 1997).

Vermikülitin harmanlama tekniği ile ayrılan geliştirilmiş kısımdan geriye kalan yan ürün ise vermikülit atığı olarak meydana gelmektedir. Bu atıklar geliştirilmiş vermikülit gibi bir kullanım alanı olmadığından bertarafı ve uzaklaştırılması gereken bir atık konumunda olup çeşitli çevresel problemlere neden olabilmektedir. Maden ocaklarından çıkarılan vermikülitin işlenmesinden meydana gelen bu atıklar sadece düzenli ya da düzensiz (vahşi) depolama alanlarında depolanmakta ve farklı bir kullanım alanı bulamamaktadır.

Bilimsel olarak incelendiğinde genişmiş vermikülitin beton gibi yapı malzemeleri içerisinde değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

Hafif agrega yerine geliştirilmiş vermikülit kullanılmasıyla üretilen hafif harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı vermikülit/çimento karışımlarına sahip harç numuneleri üretilip bu karışımları 28 günlük standart kütleme sonrası 300°C, 600°C, 900°C ve 1100°C sıcaklığa maruz bırakarak fiziksel özelliklerini tespit etmek için birim ağırlık, su emme, ultra ses hızı, boşluk oranı, mekanik özelliklerini tespit etmek için basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney verilerine göre, geliştirilmiş vermikülitin kullanılmasıyla yangına dayanıklı çimento esaslı hafif kompozit kaplama malzemesi üretilebileceği ayrıca geliştirilmiş vermikülitin yapılarda yalıtım özelliğine sahip sıva uygulamalarında hafif agrega olarak kullanılabilmesi sonucuna varmıştır (Çoşar, 2020).

Başka bir çalışmada geliştirilmiş vermikülit kullanarak, farklı oranlarda silis dumanı içeren çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık etkisindeki mekanik dayanımlarını araştırmıştır. Üç farklı vermikülit/çimento oranına sahip karışımlara, çimento ağırlığının %5, %10 ve %15’i oranında silis dumanı ekleyerek numuneler üretilmiştir. Ürettiği numuneleri 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra eğilme, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı testleri

yapmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda, yüksek sıcaklık etkisinde silis dumanı içeren numunelerin, silis dumanı içermeyen numunelere göre, basınç dayanımlarının yüksek, ultrases geçiş hızlarının ve eğilme dayanımlarının düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Vermikülitin, çimento ve diğer bağlayıcılar ile birlikte yalıtım ve ısıya dayanıklı yapı malzemesi üretiminde kullanılmasıyla ilgili daha çok çalışmaya ihtiyaç olduğuna değinmiştir (Kaya, 2011).

Yüksek sıcaklık altında içinde geliştirilmiş vermikülit bulunan çelik tel ilaveli çimento esaslı kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı vermikülit/çimento içeren harçlara farklı oranlarda 6 mm uzunluğunda ve 0.16 mm çapında çelik tel ilave ederek numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneleri 20°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bıraktıktan sonra ortam sıcaklığına kadar soğutup numunelerin eğilme, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımlarını araştırmıştır. Deneysel çalışmasının sonunda sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında, ultrases geçiş hızlarında azalma olduğu sonucuna ulaşmıştır (Şahin, 2011). Başka bir çalışmada, geliştirilmiş vermikülit tozu kullanarak ürettiği köpük betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Köpük beton üretiminde, 3 farklı geliştirilmiş vermikülit tozu, 3 farklı çimento miktarı ve 3 farklı köpük miktarı kullanmıştır. Ürettiği numunelere 28 gün kürlendikten sonra ultrases geçiş hızı, porozite, su emme, birim ağırlık, kılcal su emme, ısı iletkenlik ve eksenel basınç deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışmasının sonunda karışımlarda köpük oranı ve geliştirilmiş vermikülit oranı arttıkça su emme oranı ve porozitenin arttığı, birim ağırlığının, basınç dayanımının ve ısı iletkenlik katsayısının azaldığı sonucuna ulaşmıştır (Türeyen, 2019). İnce agrega yerine %5 ve %10 oranlarında vermikülit kullanarak betonarme kırıının eğilme özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, uygun oranı tespit ettikten sonra tek donatılı kiriş ve çift donatılı kiriş kullanarak DENEMELER yapılmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda betonarme kırıinde vermikülitin %5 oranında kullanılabilir olduğu ve betonarme kırıin kendi ağırlığının %10’a kadar azaldığı sonucuna varmışlardır (Naveenkumar vd., 2021). Başka bir bilimsel çalışmada geliştirilmiş vermikülit içinde hareketsiz hale getirilen mikroorganizmalar tarafından çimento esaslı kendi kendine çatlak iyileştirmesini incelemişlerdir. İlk olarak geliştirilmiş vermikülit ile mikroorganizmaların adsorpsiyon ve immobilizasyonu etkili olmuştur ve immobilizasyondan sonra mikroorganizmalar

canlanıp güçlü aktiviteye sahip olmuştur. İkinci olarak geliştirilmiş vermikülit farklı yöntemlerle sarılmıştır. Sonuç olarak geliştirilmiş vermikülit içinde hareketsiz hale getirilmiş mikroorganizmalar tarafından çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerini ortaya koymuş ve çatlağın kendi kendine iyileşme etkisini doğrulamışlardır (Zhan vd., 2021).

Kum yerine %30 ve %60 olmak üzere genişmiş vermikülit kullanarak çimento esaslı harçların özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, genişmiş vermikülit içeren çimento esaslı harçların, içermeyen harca göre işlenebilirliği daha yüksek olmuştur. Çalışmalarının sonunda genişmiş vermikülitin gözenekli yapısının su emmeyi arttırdığı ve buna bağlı olarak harcın birim ağırlığının ve basınç dayanımının azalmasına sebep olduğu, birim ağırlığının azalmasına ise harcın ısı direnci ve termal stabilitesi açısından sağlamakta olumlu etkiye sahip olduğu sonucunu elde etmişlerdir (Mo vd., 2018).

Vermikülit ve silis dumanı ile üretilen çimento esaslı hafif sıva harçlarının özellikleri laboratuvar ortamında ve yüksek sıcaklıklarda incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda silis dumanı ilavesinin yüksek özgül yüzeyi sebebiyle vermikülit esaslı sıva harçların akışkanlığını ve gözenekliliğini azalttığı ancak silis dumanı içermeyen harçların vermikülit içeriği arttıkça gözenekliliğinin arttığı, vermikülit içeren harçlarda su emme miktarının arttığı, ısıl iletkenlik katsayısının azaldığı, silis dumanı yüzdesi arttıkça mukavemetinin arttığı sonucu elde edilmiştir. Buna ilaveten yazarlar vermikülitin yangına karşı dayanıklı bir malzeme olduğuna ve dolayısıyla vermikülit içeren harçların da bu açıdan dayanıklı olduğuna değinmişlerdir (Köksal vd., 2015). Ayrıca bu yazarların gerçekleştirdiği başka bir çalışmalarında çelik liflerin ve geliştirilmiş vermikülitin yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarının sonunda, 900°C'ye kadar basınç ve eğilme mukavemetinin korunduğu, basınç ve eğilme mukavemeti için maksimum uygulanabilir sıcaklığın 900°C olduğu, çelik liflerin eklenmesinin mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği, geliştirilmiş vermikülit içeren hafif harçların yüksek sıcaklıklardaki veriminin kullanılan lif miktarı ile bağlantılı olduğu sonuçlarını elde etmişlerdir (Köksal vd., 2014).

Vermikülit ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalara bakıldığında çalışmaların geliştirilmiş/saf vermikülit ile yapıldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar daha detaylı tarandığında vermikülitin elde edilmesi sırasında meydana gelen vermikülit atıkları ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda vermikülitin kullanıldığı yapı malzemesi ve beton içerisinde değerlendirilmesi durumunda, bu malzemeler içerisinde meydana getireceği kimyasal ve mineralojik değişimlerin incelenmediği ve sadece mekanik ve fiziksel özelliklerin üzerinde durulduğu tespit edilmiştir. Bilindiği üzere betonun mekanik ve fiziksel özellikleri çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı, ortam koşulları, kür koşulları gibi dış faktörlerin yanında, betonu oluşturan su, çimento, agrega, çeşitli katkıların varlığı ve bunların miktar ve özellikleri gibi iç faktörlerden etkilenmektedir. Betonu oluşturan bu bileşenler, bir dizi kimyasal reaksiyon sonucu betona dayanım kazandırmaktadır. Bu noktada sertleşmekte olan betonun bünyesinde meydana gelen bu reaksiyonları bu bileşenlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri doğrudan etkilemektedir.

Buradan hareketle bu çalışmada çözülmesi gereken bir çevresel sorun olan vermikülit atıklarının geri kazanılması ve beton içerisinde ince agrega yerine değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu değerlendirme sonucunda betonda meydana gelen kimyasal ve mineralojik değişimler de incelenmiş ve bu değişimler ile betonun basınç dayanımı arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur.

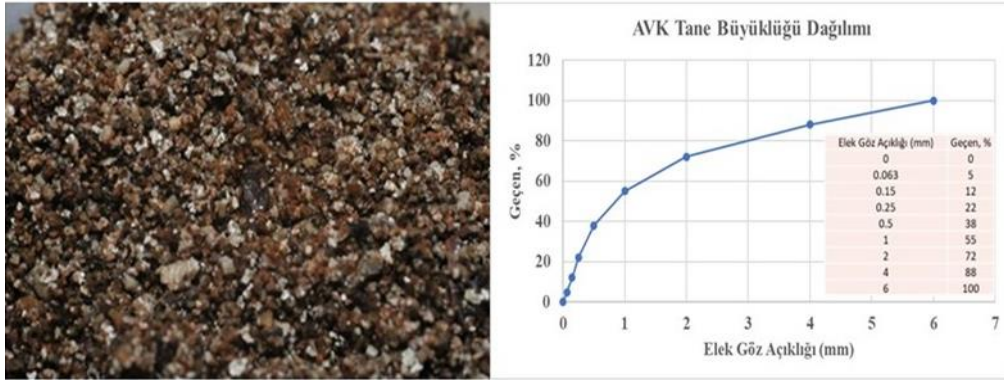
2. Materyal ve metot

2.1. Material and method

2.1.1. Atık vermikülit eldesi

2.1.1. Waste vermiculite

Çalışmada kullanılan atık vermikülit Sivas ilinde faaliyet gösteren MS Madencilik Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Kullanılan atık vermikülit Şekil 2'de verilmiştir. Belirtilen tesis tarafından çıkarılan vermikülitin bir kısmı içerdiği mineralojik safsızlıklardan dolayı geliştirme işlemine tabi tutulamayıp atık haline gelmektedir. Bu nedenle çalışmada bu katkı "atık vermikülit (AVK)" olarak adlandırılmıştır. Temin edilen AVK'nın yoğunluğu 3.27 g/cm³ olup, su emme oranı ağırlıkça %155'tir. Ayrıca kullanılan AVK 6.5 g/cm³ yüzey alanına sahiptir.



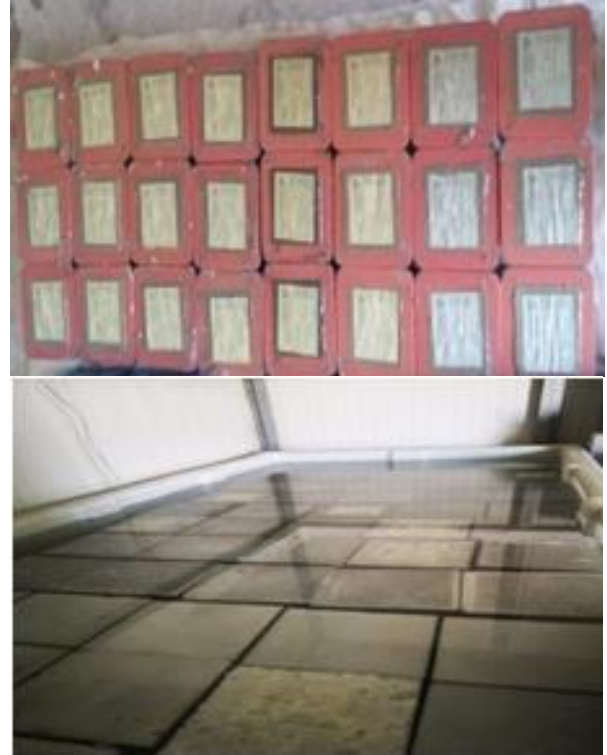
Şekil 2. Atık vermikülit
Figure 2. Waste vermiculite

2.2. Beton karışımının hazırlanması

2.2. Preparation of concrete mixes

Çalışma kapsamında C30 sınıfı küp beton örnekleri hazırlanmıştır. Çimento olarak CEM II 42.5 çimento, agrega (TS206-TS131515 standartlarına uygun), elde edilen atık vermikülit ve şebeke suyu beton harcının hazırlanmasında kullanılmıştır. Agrega, Konya Karaömerler çakıl ocağından temin edilerek, 0-4, 4-11.2 ve 11.2-22.4 mm boyutlarında karışıma dahil edilmiştir. Beton içerisindeki ince agrega C30 beton bileşimi esas alınarak ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında atık vermikülit (AVK) ile yer değiştirilmiştir. Bu yer değiştirme oranlarına esas çalışmaya başlamadan önce çeşitli oranlarda ön denemeler yapılarak karar verilmiştir. Ayrıca referans olarak da katkısız C30 sınıfı beton örneği üretimi yapılmıştır. Karışımlar betoniye içerisinde hazırlanmış olup 10x10x10 cm küp numunelere yerleştirilmiştir. Kalıplardan çıkarılan beton örnekleri 7 ve 28 günlük kür havuzlarında kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3).

Bütün beton karışımlarında çimento miktarı 380 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan su ve agrega miktarları Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Numune kalıplarına dökülmüş taze beton örnekleri ve kürleme işlemi

Figure 3. Fresh concrete samples and curing process

Tablo 1. Kullanılan agrega, çimento ve su miktarları
Table 1. Amounts of aggregate, cement and water

Numune Kodu	Numune adı ve açıklaması	Agrega			Su Lt/m ³	CEM II 42.5 R Kg/m ³	Hacimce Karışım Oranları			
		0-4 mm Kg/m ³	4-11.2 mm Kg/m ³	11.2-22.4 mm Kg/m ³			Agrega	AVK	Su	Çimento
Ş	Şahit (Katkısız)	948	185	538	220	380	%68	-	%22	%10
AVK5	%5 Atık vermikülit içeren beton numunesi	901	185	538	220	380	%59	%9	%22	%10
AVK10	%10 Atık vermikülit içeren beton numunesi	853	185	538	220	380	%51	%17	%22	%10
AVK20	%20 Atık vermikülit içeren beton numunesi	758	185	538	220	380	%42	%26	%22	%10

2.3. Atık vermikülit ve sertleşmiş beton karakterizasyonu

2.3. Characterization of waste vermiculite and concrete

Atık vermikülit ve bu atıklardan üretilen sertleşmiş betonların yüzey topoğrafyası ve elementel bileşiminin belirlenmesi için, atığın ve beton örneklerinin görüntüsünün alındığı taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılım spektroskopisi (SEM-EDS) teknikleri kullanılmıştır. SEM-EDS analizi 28 gün kür işlemine tabi tutulan beton numuneleri üzerinde yapılmıştır. Elektronların yansması için örnekler altın kaplama ile kaplanmış ve Zeiss marka EVO-LS10 taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilerek görüntülenmiştir.

Sertleşmiş betonların ve atık vermikülitin yapısındaki fonksiyonel bileşikleri belirlemek için FTIR analizi tercih edilmiş, Thermo Scientific Nicolet iS5 FTIR Spektrometresi cihazı

kullanılmıştır. Ayrıca tüm numunelerin mineralojik yapısını incelemeye dayalı olarak kalitatif özelliklerini belirlemek için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Bruker marka D8 ADVANCE model X-ışını difraktometresi cihazı kullanılmıştır. Beton numunelerinin basınç dayanımı 200 ton kapasiteye sahip tek eksenli basınç presisi ile tespit edilmiştir.

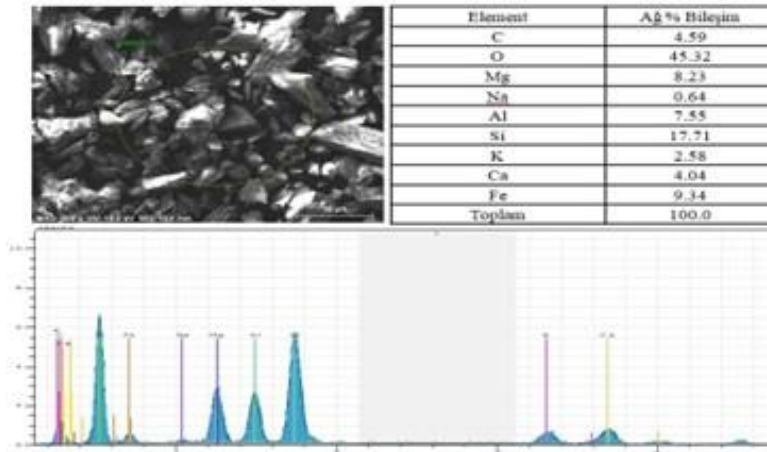
3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Atık vermikülit karakterizasyonu

3.1. Waste vermiculite characterization

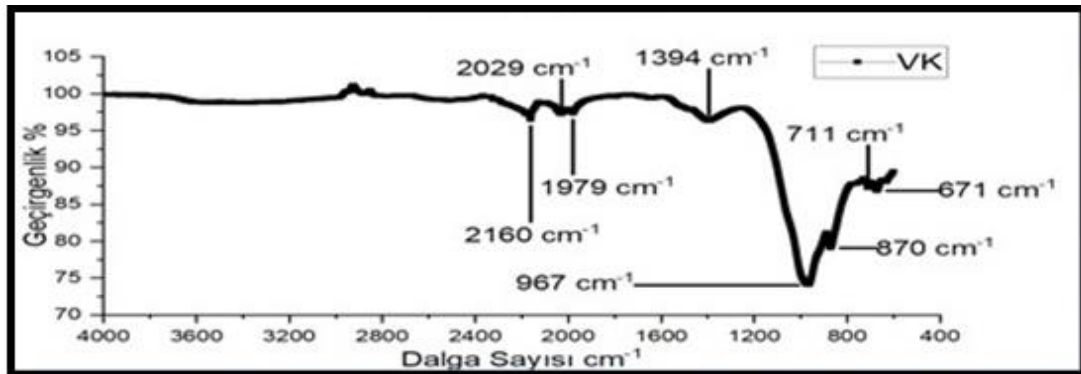
Şekil 4'te atık vermikülitin 500 kat büyütmedeki görüntüsü ve EDS analizi sonuçları verilmiştir. Atık vermikülitte silika bileşimine ilave olarak oksijen, alüminyum, karbon, magnezyum, potasyum, kalsiyum ve demir pikleri tespit edilmiştir.



Şekil 4. Atık vermikülitin (AVK) 500 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 4. Results of SEM-EDS of waste vermiculite

Atık vermikülitin içerdiği fonksiyonel bileşimleri gösteren FTIR spektrumları Şekil 5'te verilmiştir.



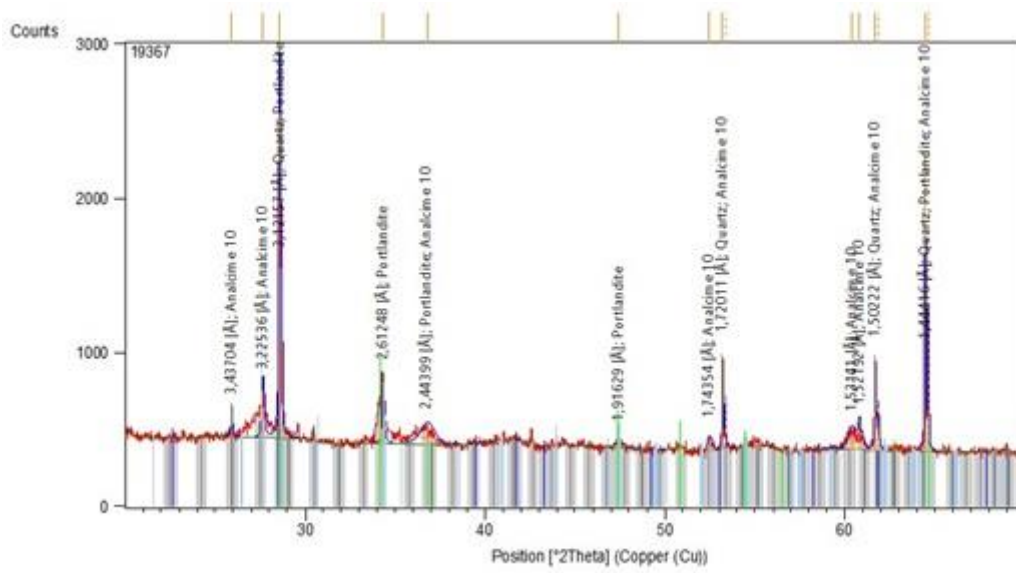
Şekil 5. Atık Vermikülitin (AVK) FTIR spektrumu

Figure 5. FTIR spectra of waste vermiculite

Yapılan FTIR analizine göre, atık vermikülitin mineralojik yapısından kaynaklanan şiddetli gerilme göstermiş S-C=N pikleri (2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1}) tespit edilmiştir. Buna ilave olarak atığın yapısındaki silisyum bileşenlerinden kaynaklı şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri (2034 cm^{-1} , 2030 cm^{-1} ve 2029 cm^{-1}) tespit edilmiştir. Ayrıca zayıf eğilme gösteren C-H pikleri (1979 cm^{-1} , 1978 cm^{-1} , 1634 cm^{-1} ve 1557 cm^{-1}), şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme

sülfonik klorür pikleri (1409 cm^{-1} ve 1394 cm^{-1} 'de) ve C-H-S pikleri ($1300\text{--}700\text{ cm}^{-1}$) belirgin fonksiyonel bileşik pikleridir.

Atık vermikülitin sahip olduğu mineralojik bileşimi belirlemek için gerçekleştirilen XRD analizi sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. AVK numunesinin kimyasal bileşiminden kaynaklanan portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), kuartz (SiO_2) ve analcime ($\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O}$) bileşiklerinin baskın mineral bileşimler olduğu gözlenmiştir.



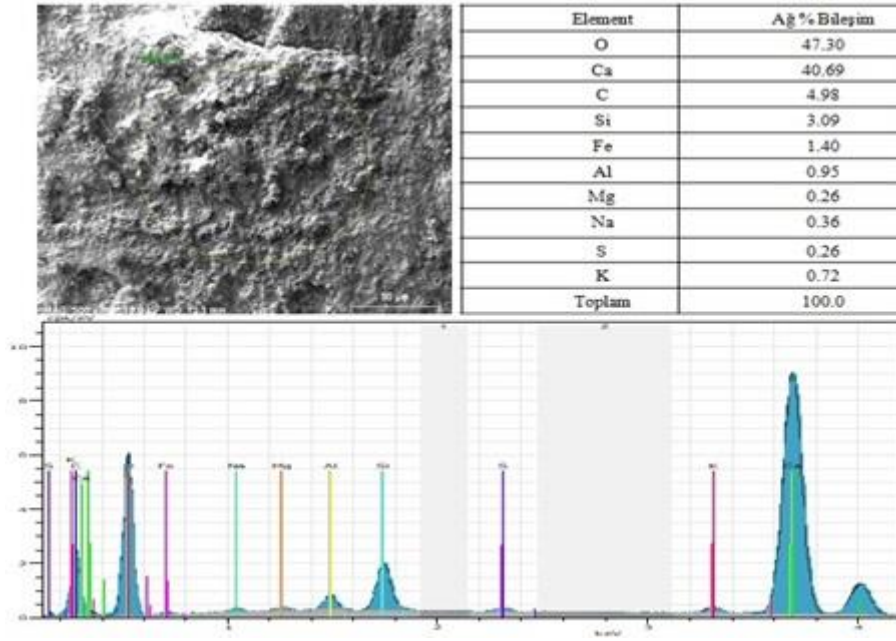
Şekil 6 . Atık Vermikülitin (AVK) XRD grafiği
Figure 6. XRD graphic of waste vermiculite

3.2. Sertleşmiş beton karakterizasyonu

3.2. Characterization of concrete

Şekil 7'de 28 gün küre tabi tutulmuş şahit numuneye (katkısız) ait SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları verilmiştir. Katkısız şahit beton

karışımında betonun inorganik yapısından kaynaklanan oksijen, kalsiyum, karbon, silisyum, demir, alüminyum, magnezyum, sodyum, sülfür ve potasyum pikleri baskın olarak tespit edilmiştir ve ağırlıkça en yüksek orana sahip elementler, çimento bileşiminden kaynaklanan oksijen ve kalsiyum olmuştur.

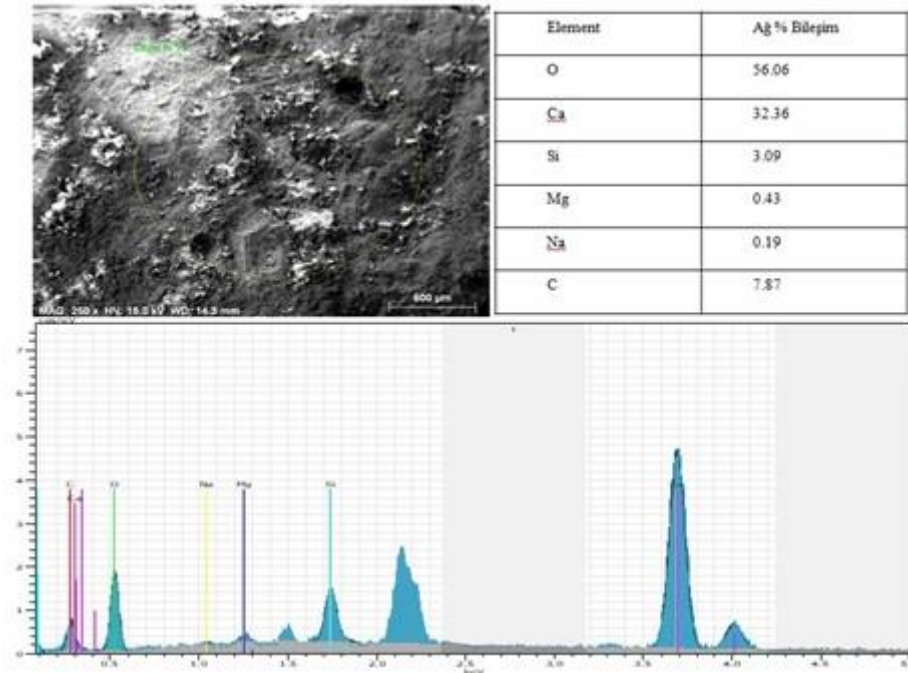


Şekil 7. Şahit beton numunesinin 500 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 7. Results of SEM-EDS of reference concrete

Şekil 8’de ise AVK5 numunesine ait 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi grafiği ve verileri verilmiştir. Ağırlıkça en yüksek orana sahip elementler oksijen ve kalsiyumdur. Bunlara ilaveten silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon pikleri tespit edilmiştir. Katkısız şahit numuneye kıyasla kalsiyum elementinde düşüş, C

ve Mg elemental bileşimlerinde artış tespit edilmiştir. Çimentodaki kireç taşının yapısından kaynaklanan Ca miktarındaki bu düşüşün, atık vermikülitin betonun hidrasyonunda doğrudan etkili olması sonucunda bu hidrasyon olayının hızlanmasından kaynaklı olduğu söylenebilir.

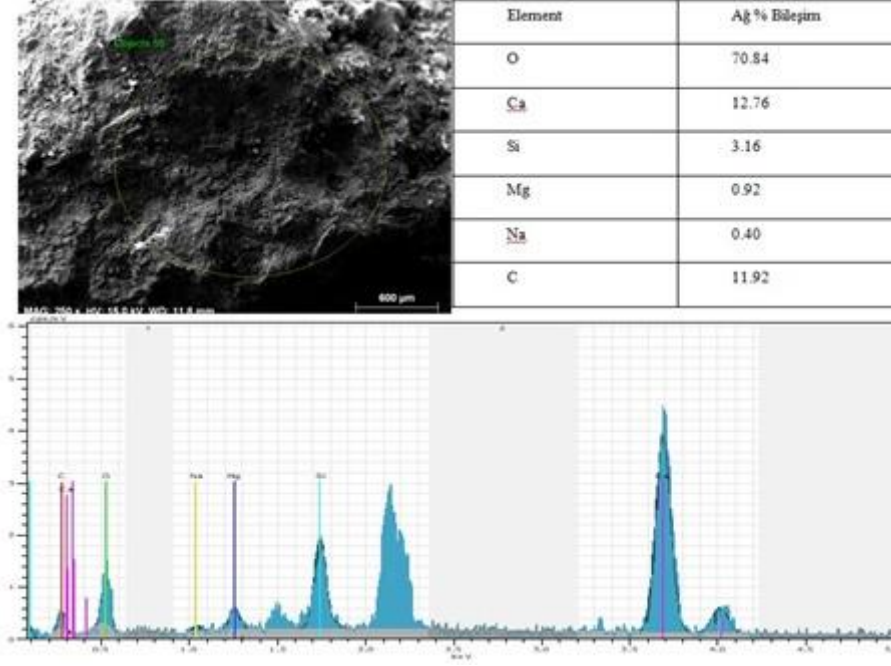


Şekil 8. AVK5 beton numunesinin 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 8. Results of SEM-EDS of AVK5 (x250)

Şekil 9’da verilen AVK10 numunesine ait EDS analizi sonuçlarına bakıldığında, AVK5 numunesine kıyasla, atık vermikülit dozundaki artışa bağlı olarak ağırlıkça oksijen, silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon elementlerinde artış tespit edilmiştir. Bu durum aynı zamanda atık vermikülitin beton içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Şahit numuneye

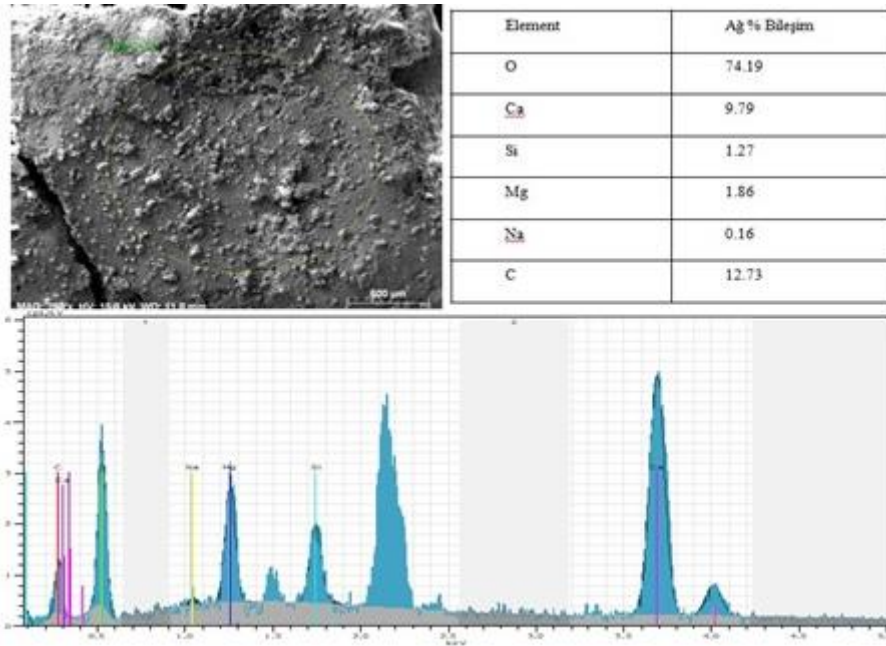
kıyasla kalsiyum elementi oranında düşüş, silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon oranlarında artış olması, betonun hidrasyonu ile ilgili olumlu bir sonuç göstermiştir. Sodyum ve karbon elementlerinin artışını ise kimyasal yapıdan bağımsız olarak atık vermikülit yapısına giren safsızlıklara bağlamak mümkündür.



Şekil 9. AVK10 beton numunesinin 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi
Figure 9. Results of SEM-EDS of AVK10 (x250)

AVK20 numunesi için atık vermikülit dozu arttıkça ağırlıkça oksijen, magnezyum ve karbon elementleri oranında artış, kalsiyum oranında azalma tespit edilmiştir. Atık vermikülit dozu AVK5 ve AVK10 numunelerine göre daha fazla olduğu için mineral bileşimi sağlayan elementlerin miktarının da arttığı pik şiddetlerinden açıkça

gözlenmektedir. Aynı şekilde diğer dozlara göre Ca miktarının daha belirgin azalması atık vermikülit miktarının artışı ile birlikte hidrasyon mekanizmasının daha hızlı gerçekleştiğinin bir göstergesidir (Şekil 10).

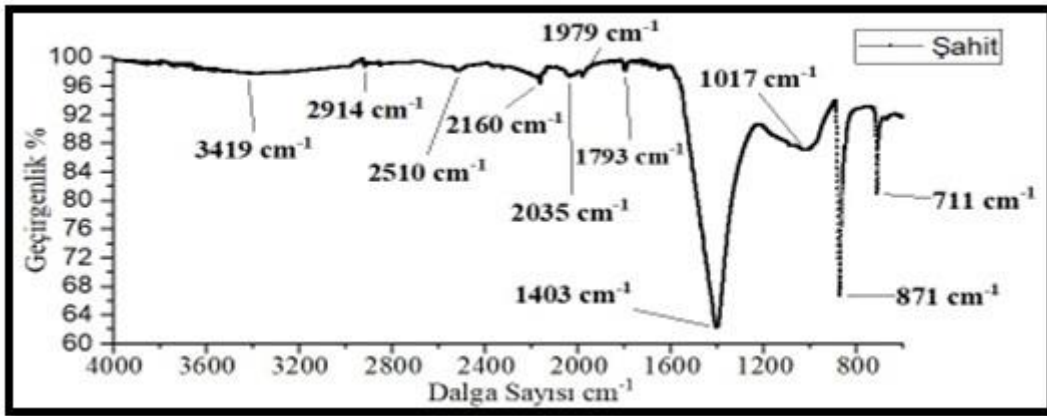


Şekil 10. AVK20 beton numunesinin 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 10. Results of SEM-EDS of AVK5 (x250)

Şekil 11’de katkısız beton numunesinin içerdiği fonksiyonel grupları gösteren FTIR spektrumları verilmiştir. Şahit beton karışımında 3550-3200 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren O-H pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} zayıf gerilme gösteren C-O piki tespit edilmiştir. 3000-2840 aralığında orta gerilme gösteren C-H piki tespit edilmiştir. 2175-2140 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri tespit edilmiştir. 2140-1990 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren

N=C=S pikleri tespit edilmiştir. 2000-1650 cm^{-1} aralığında zayıf eğilme gösteren C-H pikleri, 1815-1785 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren C=O pikleri tespit edilmiştir. 1410-1380 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri tespit edilmiştir. 1300-700 cm^{-1} aralığında kalsiyum silika hidrat varlığını gösteren ve çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran C-S-H pikleri tespit edilmiştir. 1017 cm^{-1} , 871 cm^{-1} ve 711 cm^{-1} pikleri $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bileşiğine atfedilmiştir .



Şekil 11. Şahit numunesinin FTIR spektrumları

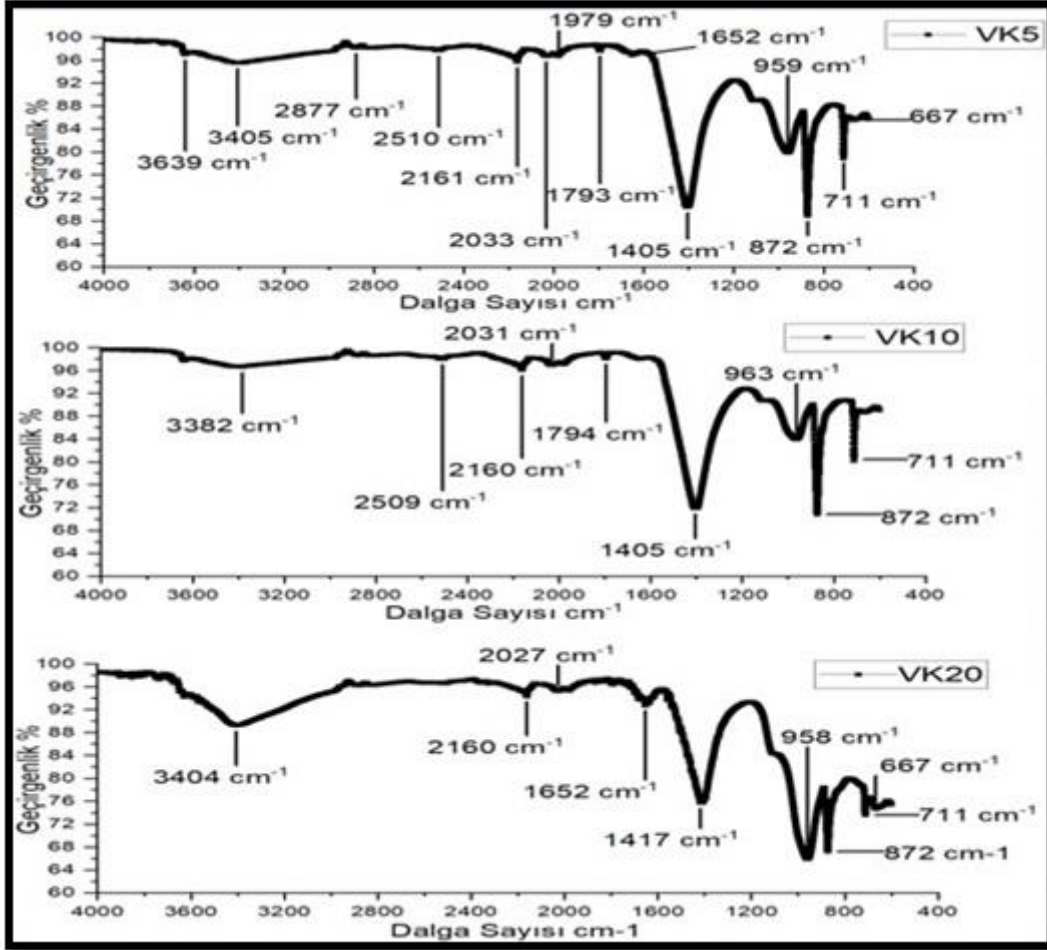
Figure 11. FTIR spectra of reference concrete

Şekil 12’de verilen AVK katkılı betonların FTIR bulgularına göre 3700-3600 cm^{-1} aralığı düşük yoğunluklu O-H bağlarını temsil etmekte olup kil bileşiklerinin varlığına atfedilmiştir (Bosch Reing ve ark., 2002). 3405 cm^{-1} , 3404 cm^{-1} ve 3382 cm^{-1}

’de şiddetli yayvan O-H gerilme pikleri, 2877 cm^{-1} ’de orta gerilme gösteren kalsiyum hidroksit varlığına işaret eden C-H pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} ve 2509 cm^{-1} ’de tespit edilen pikler şahit numunesinde (Şekil 10) de tespit edilmiş olup

beton bileşiminden kaynaklanan CaCO_3 bileşiğine atfedilmiştir. 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri, 2033 cm^{-1} , 2031 cm^{-1} ve 2027 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri tespit edilmiştir. 1979 cm^{-1} , 1794 cm^{-1} , 1793 cm^{-1} ve 1652 cm^{-1} 'de zayıf eğilme gösteren C-H pikleri tespit edilmiştir. VK20 numunesinde 1417 cm^{-1} 'de orta eğilme gösteren

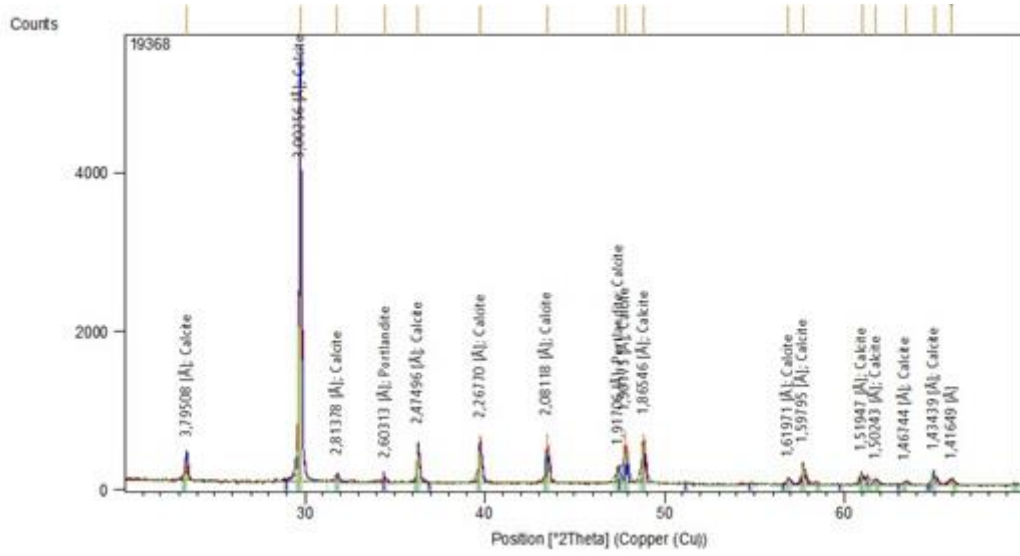
O-H piki tespit edilmiştir. O-H bağları oluşumu tespit edilen piklerde ise vermikülit dozu arttıkça piklerin derinliğinde artış tespit edilmiştir. 1405 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür piki tespit edilmiştir. $1300\text{-}700 \text{ cm}^{-1}$ aralığında C-S-H pikleri tespit edilmiştir. 667 cm^{-1} 'de AlO bağları tespit edilmiştir.



Şekil 12. AVK5, AVK10, AVK20 numunelerinin FTIR spektrumları
Figure 12. FTIR spectra of AVK5, AVK10, AVK20

Şahit beton numunesinin mineralojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 13'te verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre baskın bileşiklerin betonun doğal yapısını temsil eden kalsit (CaCO_3) ve portlandit (Ca(OH)_2) olduğu tespit edilmiştir. Beton karışım suyu

çimentonun yapısından kaynaklanan Ca iyonları ile aşırı doygun hale gelince priz süreci başlamış ve hidrasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit bileşikleri oluşmuştur. Bu sayede betonun dayanım kazanma süreci başlamıştır.



Şekil 13. Şahit numunesinin XRD grafiği
Figure 13. XRD graphic of reference concrete

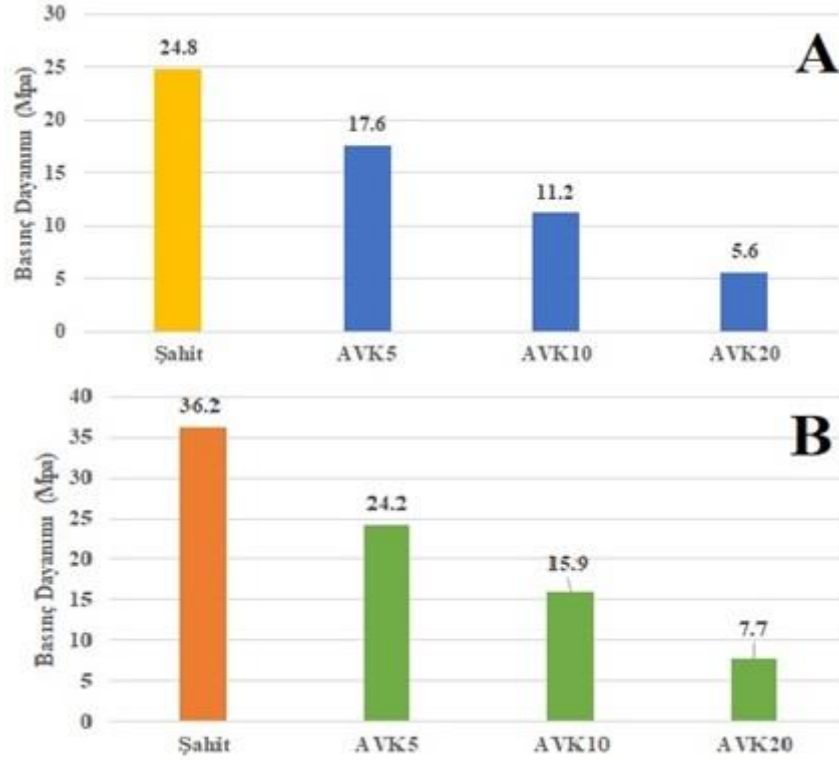
AVK5, AVK10 ve AVK20 numunelerinin mineralojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 14’te verilmiştir. Atık vermikülit içeren beton karışımlarının XRD bulgularına bakıldığında baskın mineralojik bileşiklerin kalsit ve portlandit olduğu gözlenmiştir. %10 atık vermikülit içeren numunelerde ise vermikülitin kimyasal bileşiminden kaynaklanan hollandite

(Ba(Mn₆,Mn₂)O₁₆) bileşiği gözlenmiştir. Atık vermikülit dozu arttıkça hidrasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit miktarlarının azaldığı pik şiddetlerinin azalmasından belli olmaktadır. Buradan hareketle beton bünyesindeki atık vermikülit katkısının betonun hidrasyonunu azalttığı ve betona geç dayanım kazandırdığı söylenebilir.

karışım suyunu absorbe ettiği ve bunun betonun hidrasyonu üzerinde olumsuz bir etki yaratarak ve basınç dayanımının düşmesine neden olduğu söylenebilir. Bu azalma, Şekil 13'teki XRD bulgularında tespit edilen kalsit ve portlandit miktarlarının azalması, Şekil 11'de verilen FTIR spektrumlarında tespit edilen O-H bağlarının artışı ile açıklanmaktadır.

Aynı zamanda FTIR bulgularında, betonun ve vermikülitin kimyasal bileşiminden farklı olarak ortamda görülen ve safsızlık olduğu düşünülen

maddeler ve vermikülit dozunun artışı ile birlikte çimento hidrasyonu vasıtasıyla sağlayarak dayanıklılık sağlayan C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jeli oluşumundaki azalmalar ve buna bağlı olarak meydana gelebileceği düşünülen mikro çatlaklar betonun ihtiyaç duyduğu su miktarını artırarak basınç dayanımının da düşmesine neden olmuştur. Bu durumda vermikülit katkısının kullanıldığı betonlarda su/çimento oranının artırılması ile hidrasyon da hızlandırılarak betona dayanım kazandırılması kuvvetle muhtemeldir.



Şekil 15. Beton karışımlarının 7 (A) ve 28 (B) günlük ortalama basınç dayanımları
Figure 15. 7(A) and 28(B) day compressive strength of concrete mix

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada atık vermikülitin katkı olarak betonda kullanılabilirliği, betonun kimyasal ve mekanik özelliklerini ortaya koyan analizler ile değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- XRD analizi bulgularına göre, atık vermikülit katkısının betonun hidrasyonu üzerinde olumlu rol oynayarak betonun sertleşmesini hızlandırdığı tespit edilmiştir.
- Atık vermikülit dozu arttıkça ortalama basınç dayanım değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, FTIR ve XRD bulgularında da tespit edildiği gibi, vermikülitin yapısındaki zayıf mineralojik yapıların varlığı olduğu gibi,

FTIR bulgularında görülen O-H piklerinin artışı nedeniyle, vermikülitin beton karışım suyunu absorbe ederek hidrasyon üzerinde olumsuz bir etki yaratarak, basınç dayanımının düşmesine neden olduğu söylenebilir.

- %5 oranında atık vermikülit katkılı beton numunelerinde betonun 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerlerinin diğer AVK oranlarına göre daha fazla olup, AVK katkılarının agrega ile %5-20 arasında yer değiştirilerek kullanılması, bu çalışmada elde edilen basınç dayanımlarının yeterli olabileceği yapılar için uygun olabileceği söylenebilir.
- Beton içerisinde atık vermikülit kullanılması ile önemli bir çevresel problem olan bu atıkların geri kazanımı sağlanmış olacaktır. Bu sayede bu atıkların depolanmasının önüne geçilerek özellikle

toprak ve hava ekosistemi için oluşacak tehditler ortadan kaldırılmış olacaktır. Aynı zamanda beton içerisinde kullanılacak olan agrega miktarı da bu katkıların kullanımı ile azaltılmış olacak ve agrega üretimi sırasında meydana gelen doğal kaynakların tüketimi ve tahribatı da engellenmiş olacaktır.

• Ayrıca gerçekleştirilen bu çalışmadan yola çıkarak farklı AVK dozları denenerek, betonun bu çalışmada belirtilen özelliklerinin yanısıra diğer özellikleri araştırılabilir, bu katkılar ile farklı yapısal sistemler tasarlanarak bu sistemlerin mekanik özellikleri araştırılabilir.

Teşekkür

Acknowledgement

Makale yazarları çalışmanın değerlendirilmesinde emek gösteren editör ve hakemlere teşekkürlerini sunar.

Yazar katkısı

Author contribution

Araştırmacılarından Soğancıoğlu Kalem; bulguların değerlendirilmesi ve makalenin yazımında (%50 oranında) katkıda bulunmuştur. Karakaya Harmancı ise bulguların elde edilmesi ve değerlendirilmesinde (%50) katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

Bosch Reig, F., Gimeno Adelantado, J. V., & Moya Moreno, M. C. M. (2002). FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and silica (quartz) mixtures using the constant ratio method application to geological samples. *Talanta*, 58, 811-821. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00372-7](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00372-7)

Çoşar, K. (2020). *Yüksek sıcaklığın genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çimento esaslı hafif harçların özelliklerine etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

DPT (2001). Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri. *III. Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer Çalışma Grubu Raporu*, Devlet Planlama Teşkilatı, 2617, Ankara, 57-68.

Duman, O., & Tunç, S. (2008). Electrokinetic properties of vermiculite and expanded vermiculite: effects of pH, clay concentration and mono and multivalent electrolytes. *Separation Science and Technology*, 0149, 3755-3776. <https://doi.org/10.1080/01496390802219109>

Köksal, F., Gencil, O., & Kaya, M. (2015). Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 88, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021>

Köksal, F., Serreno-Lopez, M., Şahin, M., Gencil, O., & López-Colina Perez, C. (2014). Combined effect of steel fibre and expanded vermiculite on properties of lightweight mortar at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 48(7), 2083-2092. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0294-7>

Loughbrough, R. (1991). Minerals in Lightweight Insulation, *Industrial Minerals*, October, 21-35.

Marcos, C., & Rodriguez, I. (2011). Expansibility of vermiculites irradiated with microwaves. *Applied Clay Science*, 51(1-2), 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.019>

Mo, K. H., Lee, H. J., Liu, M. Y. J., & Ling, T. C. (2018). Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 302-306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219>

Naveenkumar, K., Suriya P. A., Divahar, R., Sangeetha, S.P., & Jayakumar, M. (2021). Experimental investigation flexural behavior of reinforced concrete beam with partial replacement of vermiculite. *Meterials Today: Proceedings*, 46(12), 5885-5888. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.743>

Strand, P.R., (1983). *Vermiculite*, *Industrial Minerals And Rocks*, AIME, 1375-81.

Şahin, M. (2011). *Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çelik tel takviyeli-çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklık dirençleri*. [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Toksoy Köksal, F. (1997). Vermikülit mineraloji jeolojik oluşum endüstriyel kullanım ve Türkiye'deki durumu. 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* (ss. 123-139), İzmir.

Türeyen, A.C. (2019). *Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen köpük betonların fiziksel ve mekanik özellikleri*. [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Talk/EPDM/Polipropilen polimer kompozit köpük üretimi ve üretim şartlarının optimize edilmesi

Production of Talc/EPDM/Polypropylene polymer composite foam and optimizing production conditions

Salih Hakan YETGİN^{*1,a}, Hüseyin ÜNAL^{2,b}

¹ Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya

• Geliş tarihi / Received: 24.12.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 09.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.06.2022

Öz

Bu çalışmada, talk ve etilen-propilen-dien-monomer (EPDM) katkı polipropilen (T-EPDM-PP) kompozit köpüklerin hücre yapısı ve mekanik özelliklerine enjeksiyon proses şartlarının etkisi incelenmiştir. Enjeksiyon basıncı, geri besleme basıncı, enjeksiyon hızı ve ergiyik sıcaklığı gibi farklı proses şartları kullanılmıştır. Mekanik özellikleri belirlemek için ise çekme testi ve darbe testi gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin karşılaştırılabilmesi için köpüklendirilmemiş T-EPDM-PP polimer kompozit numuneleri de üretilmiştir. Elde edilen deneysel veriler Taguchi metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Köpüklerin hücre morfolojisi, farklı proses şartlarına bağlı olarak, stereomikroskop kullanarak kabuk tabakası kalınlığı (KTK), hücre boyutu ve hücre yoğunluğu açısından incelenmiştir. Enjeksiyon basıncı (E.B), enjeksiyon hızı (E.H) ve ergiyik sıcaklığı (E.S)'nin artması ile köpük numunelerin çekme ve darbe dayanımları azalırken geri besleme basıncının artması ile artmıştır. Kabuk tabakası kalınlığının artması ile kompozit köpüğün çekme ve darbe dayanımları artmıştır. Artan E.B ve enjeksiyon hızlarında hücre boyutu azalmıştır. Yüksek enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı ile birlikte düşük geri besleme basıncı ve ergiyik sıcaklığı kullanıldığında yüksek hücre yoğunluğu elde edilmiştir. Artan E.B, E.H ve E.S ile köpük yoğunluğu azalmıştır. T-EPDM-PP esaslı kompozit köpük üretiminde yüksek çekme ve darbe dayanımı elde etmek için optimum proses parametreleri olarak geri besleme basıncı 100 bar, ergiyik sıcaklığı 160 °C, enjeksiyon hızı 60 mm/s ve enjeksiyon basıncı 60 bar olarak tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Enjeksiyon köpük kalıplama, Köpük morfolojisi, PP, EPDM, Talk, Taguchi analizi

Abstract

The effect of injection process conditions on the cell structure and mechanical properties of talc and ethylene-propylene-diene-monomer (EPDM) filled polypropylene (T-EPDM-PP) composite foams was investigated. Different process conditions such as injection pressure, feedback pressure, injection speed and melting temperature were used. Tensile test and impact test were performed to determine the mechanical properties of the foam materials. In order to compare the mechanical properties, unfomed T-EPDM-PP polymer composite samples were also produced. Obtained experimental data were analyzed using the Taguchi method. The cell morphology of the foams was investigated in terms of skin layer thickness, cell size and cell density using a stereomicroscope, depending on different process conditions. With the increase of injection pressure, injection speed and melting temperature, the tensile and impact strengths of foam samples decreased, while it increased with the increase of the feedback pressure. The tensile and impact strengths of the composite foam increased with the increase in skin layer thickness. Cell size decreased with increasing E.B and EB. High cell density was obtained when low feedback pressure and melting temperature were used together with high injection pressure and injection speed. Foam density decreased with increasing E.B, E.H and E.S. In order to obtain high tensile and impact strength in T-EPDM-PP based composite foam production, optimum process parameters were determined as feedback pressure 100 bar, melting temperature 160 °C, injection speed 60 mm/s and injection pressure 60 bar.

Keywords: Injection foam molding, Foam morphology, PP, EPDM, Talc, Taguchi analysis

*a Salih Hakan YETGİN, shyetgin@gmail.com, Tel: (0324) 600 00 33, orcid.org/0000-0002-6068-9204

^b orcid.org/0000-0003-0521-6647

1. Giriş

1. Introduction

2020 yılından sonra üretilen araçlar için daha düşük bir CO₂ emisyon hedefi belirleyen Avrupa Birliği mevzuatı ışığında, araçlardaki yakıt tüketimini ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarını azaltmak için araçların hafifletilmesi temel görevlerden biri haline gelmiştir. Otomobil parçalarının hafifletilmesi için son yıllarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılan yöntemlerden birisi polimer matris bünyesinde çok sayıda gaz kabarcıklarının (hücrelerin) oluşturulmasıdır (Zhen vd., 2010; Yinping vd., 2020). Hücresel veya köpükendirilmiş polimerler farklı metotlarla fiziksel veya kimyasal köpük ajanları kullanılarak üretilmektedir (Zhen vd., 2010; Andrzej & Omar, 2006). Kimyasal köpük ajanları (KKA), proses sıcaklığında bozularak karbondioksit (CO₂) ve nitrojen (N₂) gibi gazları serbest bırakan katı malzemelerdir (Andrzej & Omar, 2006). Endotermik kimyasal köpük ajanları ise hem sitrik asit hem de sitrik asit ester içeren sodyum bikarbonat veya alkali karbonatlardır (Qin, 2006). Bozulma sonucu kalan katı artıklar çekirdekleyici ajan gibi davranır ve daha küçük hücre boyutu elde edilmesini sağlamaktadır (Andrzej & Omar, 2006).

Batch köpüklenme, ekstrüzyon köpüklenme ve enjeksiyon köpük kalıplama gibi birkaç çeşit köpük üretim yöntemi mevcuttur (Zhen vd., 2010). Bu yöntemlerin arasında enjeksiyon kalıplama prosesi, parça ölçü kararlılığı, kısa çevrim zamanı ve hafiflik gibi birçok avantaja sahiptir (Ming-Cheng vd., 2007; Altan & Demirci, 2018; Yinping vd., 2020). Ancak, ekstrüzyon ve batch prosesleri ile karşılaştırıldığında, enjeksiyon hızı, vida adımı ve ütüleme basıncı gibi ilave parametrelerin eklenmesi nedeniyle enjeksiyon köpük prosesinin kontrolü oldukça karmaşık ve zor olur. Her bir proses parametresi polimer köpüğün hücre morfolojisini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden, proses şartlarının kontrolü köpük yapısının optimize edilmesi için oldukça önemlidir. Bununla ilgili literatürde daha önce yapılmış birçok çalışmaya rastlanmıştır. Wei ve arkadaşları (2014), plastik parçaların ağırlığını azaltmak ve ölçü kararlılığını geliştirmek için enjeksiyon kalıplama yöntemini kullanmışlardır. Ürettikleri polimer köpüklere sıcaklık, süre, basınç ve gaz miktarı gibi enjeksiyon proses parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Barzegari ve Rodrigue (2009) alçak yoğunluklu polietilen köpük yapısı üzerine köpük ajanı miktarının etkisi ile kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve ütüleme basıncı gibi enjeksiyon kalıplama proses parametrelerinin etkisini araştırmışlardır.

Villamizar ve Chang (1978), kalıp dolumu ve soğuma aşaması süresince yüksek yoğunluklu polietilen ve polikarbonat polimerlerinde kabarcıkların oluşumu ve büyümesi üzerine proses şartlarının (E.B, E.S ve kalıp sıcaklığı) ve kimyasal köpük ajanı miktarının etkisini çalışmışlardır. Chien ve arkadaşları (2004) proses şartlarının PP esaslı köpük malzemenin çekme dayanımı, eğme dayanımı ve rijitlik gibi mekanik özelliklere etkisini analiz etmişlerdir. E.H, E.S, kalıp sıcaklığı ve ütüleme basıncı gibi proses şartlarının etkisini incelemişler ve ağırlık azalımı ve mekanik özellikleri detaylı bir şekilde çalışmışlardır. Ayçiçek ve arkadaşları (2018) akrilo-nitril-bütadien-stiren (ABS) polimerini farklı oranlarda (%1, 1.5, 2, 2.5,3) kimyasal köpük ajanı kullanarak üretmişlerdir. Çalışmaları sonucunda ABS polimerine ilave edilen köpük ajanı miktarının artması ile polimer köpüğün Shore D sertliği ve darbe dayanımı azalmıştır. Heidari ve Fasihi (2019) %2 oranında azodikarbonamit ve sodyum bikarbonat gibi iki farklı kimyasal köpük ajanı kullanarak ürettikleri talk katkılı PP/poliolefin-elastomer (POE) karışımının darbe dayanımı üzerine hücresel yapının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında sodyum bikarbonatın daha büyük hücre boyutu ve hücre duvar kalınlığı oluşturduğu tespit edilmiştir. Hem katkısız hem de polimer karışımı köpüklerin darbe dayanımlarının köpük özellikleri ve yapısı ile yakından ilişkili olduğu belirlenmiştir. Artan POE miktarı ile polimer karışımı köpüklerin darbe dayanımı %400 oranında artarken hücre boyutu ve hücre duvar kalınlığı azalmıştır. Daha büyük hücre duvar kalınlığına sahip köpüklerin darbe dayanımlarını iyileştirdiği de belirlenmiştir. Palutkiewicz ve arkadaşları (2020) köpük ajanı miktarı (%1-2), talk (%10-20) ve enjeksiyon hızı gibi değişkenlerin PP esaslı kompozit köpüklerin hücre morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında PP polimer bünyesindeki köpük ajanı miktarı ve talk içeriğinin mekanik özelliklere önemli oranda etki ettiği, ağırlıkça %2 oranında köpük ajanı miktarında çevrim zamanının kısaldığı belirtilmiştir. PP bünyesindeki köpük ajanı miktarının artması ile malzemenin çekme dayanımı, sertlik ve darbe dayanımı değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Talk mineral katkısı, parçaların ağırlığını artırırken sertlik, darbe dayanımı ve çekme dayanımını azaltmıştır. Enjeksiyon hızının köpük parçalar üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı gözlenmemiştir. Literatür incelendiğinde farklı polimer malzemeler bünyesinde talk katkımın, köpük ajanı katkı oranı ve proses şartları üzerine çalışmalar olduğu görülmektedir. Ancak talk mineral katkısı ile EPDM elastomeri ve

polipropilen kombinasyonu ile yapılan literatürde daha önce yapılmış bir çalışma olmadığı gözlenmiştir. Özellikle otomotiv sektöründe hafifletmeyi sağlamak ve bu konuya ışık tutmak için otomotiv parçaları arasında oldukça önemli olan ön ve arka tamponların hafifletilmesi için bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

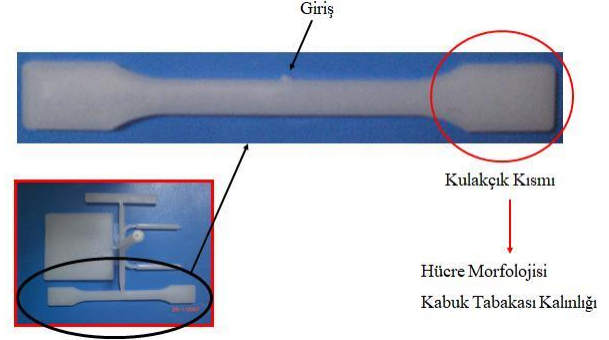
Bu çalışmada, Talk/EPDM katkılı PP esaslı köpükler, E.B, E.H, geri besleme basıncı ve E.S gibi parametreler kullanarak enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Mekanik özelliklerin yanı sıra kompozit köpük malzemenin K.T.K, hücre boyutu ve hücre yoğunluğu gibi köpük morfolojisini etkileyen enjeksiyon proses şartları araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen mekanik özellikler ile K.T.K, hücre boyutu ve hücre yoğunluğu gibi köpük morfolojisini etkileyen enjeksiyon proses şartları Taguchi metodu ile analiz edilmiştir.

2. Materyal ve metot

2.1. Material and method

Bu çalışmada, 17 g/10dak. (230°C/2.16kg) ergime akış indeksine ve 1.0g/cm³ yoğunluğa sahip ağırlıkça %20 oranında talk/EPDM katkılı polipropilen malzemesi kullanılmış olup TRC 103P kodlu Lyondell Basell firmasından temin edilmiştir. Köpüklendirme işlemlerinde, Foaming MB-FA 2984 PE kodlu kimyasal köpük ajanı kullanılmış olup Tosaf firmasından temin edilmiştir. Kimyasal köpük ajanı 140 °C bozulma sıcaklığına ve 130 ml/gr bozulma miktarına sahip olup, köpük ajanı bozduğunda, açığa çıkan gaz, karbon monoksit, karbon dioksit ve bazı amonyak ürünlerini içermektedir. Köpüklendirme işleminde geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılmış olup köpük ajanı miktarı %1 olarak sabitlenmiştir. Köpüklendirilmemiş T-EPDM-PP kompozit üretiminde 100 bar EB, 100 mm/s EH, 100 bar geri besleme basıncı ve 163-160-160 °C sıcaklık dağılımı kullanılmıştır. Köpüklendirme işleminden önce granül formundaki T-EPDM-PP kompoziti ve köpük ajanı mekanik olarak karıştırılmış ve 150 ton kapasiteli geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemi ile köpüklendirme işlemleri yapılmıştır. Üretimlerde çevrim zamanı 27 s ve soğutma zamanı ise 10 s olarak belirlenmiştir. Farklı enjeksiyon parametreleri kullanılarak polimer köpüklerin üretilmesinden sonra hücresel yapıda meydana gelen değişimleri incelemek için Şekil 1'de gösterildiği gibi standartlara uygun olarak hazırlanan çekme numuneleri kullanılmıştır. Polimer köpüğün kulakçık kısımlarında oluşan köpük yapısındaki değişimleri görmek için hücre morfolojisi ve kabuk

tabakası incelemeleri bu bölgede gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kulakçık kısmı, kesikli çizgi ile gösterilen yerlerden kesilmiştir. Kesilen kısımların kesiti alınarak bu bölgelerde hücre morfolojisi ve kabuk tabakası incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

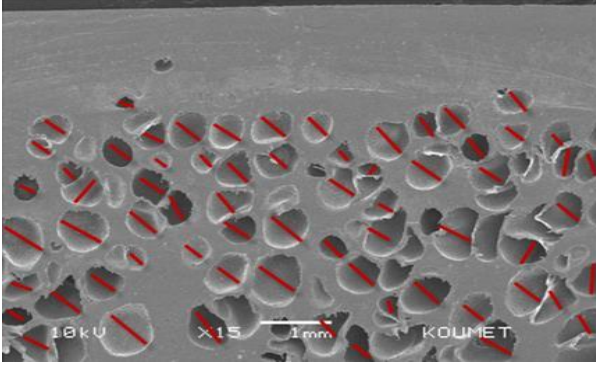


Şekil 1. Standartlara uygun çekme deneyi ve hücre morfolojisi numunesi

Figure 1. Tensile test and cell morphology sample in accordance with standards

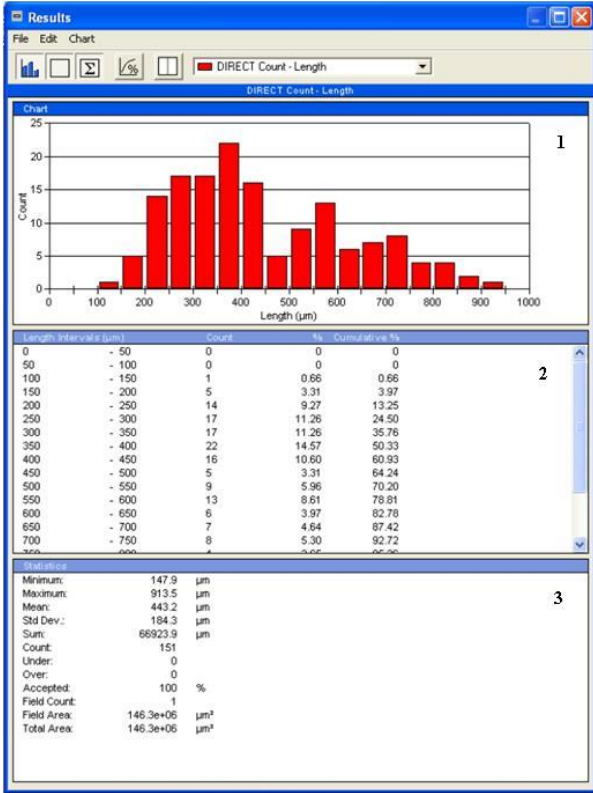
Şekil 2'de ise örnek olarak hücre boyutunun analiz programı yardımıyla belirlenmesi gösterilmiştir. Mikroyapı üzerinde belirgin olan bütün hücrelerin boyut ölçümleri yapılmıştır. Küresel olan hücrelerin boyutları merkezinden geçen tek bir doğru ile belirlenirken elips şeklinde olan hücrelerin boyutlarının ölçümünde büyük ve küçük çaptan geçen iki doğru çizilerek ortalaması alınmıştır. Şekil 3'te ise, Şekil 2'deki ölçümlerin sonucunda elde edilen ve üç kısımdan oluşan sonuç sayfası verilmiştir. Birinci kısımda yer alan grafikte, örneğin hücre boyutu inceleniyorsa, x eksenini hücre boyutu dağılımını, y eksenini ise ölçümü yapılan hücre boyutu sayısını göstermektedir. İkinci kısımda ise ölçüm yapılan hücre boyutlarının hangi aralıkta kaç adet olduğunu gösteren Excel program çıktısı bulunmaktadır. Son kısımda ise minimum, maksimum, ortalama, standart sapma, ölçüm sayısı ve yüzey alanının bulunduğu, analiz sonuçlarının temelini oluşturan kısım bulunmaktadır. Hücre boyutu ölçümlerinin sonucunda elde edilen grafiğin üçüncü kısmı incelendiğinde, "maximum" yazan kısım, maksimum hücre boyutunu, "minimum" yazan kısım minimum hücre boyutunu, "mean" yazan kısım ortalama hücre boyutunu, "Std. Dev." yazan kısım standart sapma miktarını, "Count" yazan kısım birim alanda kaç adet hücre boyutunun ölçüldüğünü, "Field Area" yazan kısım ise incelenen mikroyapının alanını ifade etmektedir. Bu kısımda yer alan, mikro yapının alanı (Field Area) ve mikroyapıda ölçülen hücre boyutu adedi (Count), birim hacimdeki hücre yoğunluğunun hesaplanmasında kullanılmıştır. Deneylerde

kullanılan tüm köpükendirilmiş numunelerin her biri için ortalama hücre boyutunun ve birim alandaki hücre sayısının belirlenmesinde bu işlemler yapılmıştır (Yetgin, 2012). Polimer köpüklerin kabuk tabakası kalınlığı ölçümleri mikroyapı resimleri kullanılarak analiz programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te gösterildiği gibi alt ve üst kabuk tabakası kalınlıkları, numunenin bittiği (referans çizgisi) noktadan ilk hücrenin görüldüğü noktaya olan mesafenin ölçülmesi ile belirlenmiştir.



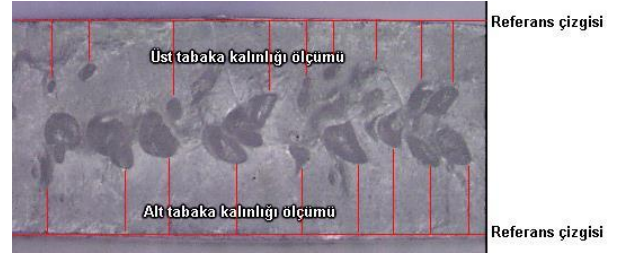
Şekil 2. Hücre boyutunun analiz programı kullanılarak ölçülmesi (Yetgin, 2012)

Figure 2. Measurement of cell size using the analysis program



Şekil 3. Hücre boyutu ölçümü sonrasında elde edilen program çıktısı (Yetgin, 2012)

Figure 3. Program output obtained after cell size measurement



Şekil 4. Alt ve üst tabaka kalınlıklarının ölçülmesi (Yetgin, 2012)

Figure 4. Measurement of the bottom and top layer thicknesses

Çekme testleri MIRC 350 Tensometer test cihazında ASTM 638 standardına uygun olarak 50mm/dak. çekme hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Darbe testleri ISO 179 standardı kullanılarak Zwick B 5113 cihazında oda sıcaklığında (23 °C) yapılmıştır. En az 5 adet test yapılmış ve sonuçların ortalamaları alınmıştır. T-EPDM-PP kompozit köpük numunelerin hücre morfolojisi incelemelerinde ise çekme numunelerinin orta kısmı kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri Clemex Vision Lite görüntü analiz programı adapte edilmiş Nikon Eclipse L150A optik mikroskobu ile yapılmıştır. Köpük yoğunluğu ISO 1183 standardına göre belirlenmiştir.

Denklem 1 ile birim hacimdeki hücre yoğunluğu (N_f) belirlenmiştir (Kumar & Suh, 1990). Burada, N_f : Birim hacimdeki hücre yoğunluğu, hücre/cm³, n : Optik mikroskopta elde edilen hücre sayısı'dır (Bkz. Şekil 3'te, "Count" olarak elde edilen sayıdır), A : Optik mikroskopta elde edilen görüntünün alanı, µm, (Bkz. Şekil 3'te, "Field Area" olarak elde edilen sayıdır), M : Büyütme faktörüdür.

$$N_f = \left(\frac{n \times M^2}{A} \right)^{3/2} \quad (1)$$

Denklem 2 ile köpüksüz numunenin 1 cm³'ündeki hücre sayısı (N_0) belirlenmiştir. Burada, V_f : polimer köpükteki yoğunlukta azalma miktarıdır. Polimer köpük malzemelerindeki yoğunlukta azalma miktarı ise köpüklendirilmemiş ve köpüklendirilmiş polimerlerin yoğunluklarına bağlı olarak Eşitlik 3'teki gibi hesaplanmıştır (Wentao vd., 2006).

$$N_0 = \frac{N_f}{1 - V_f} \quad (2)$$

$$V_f = 1 - \frac{\rho_{köpük}}{\rho_{polimer}} \quad (3)$$

Taguchi deneysel planında L9 ortogonal dizileri Tablo 1'de gösterildiği gibi yapılmıştır. L9 deneyleri, üç farklı seviyede ve dört farklı kalıplama parametresi içermektedir. Deneysel sonuçlar, sinyal/gürültü (signal-to-noise, S/N) oranına dönüştürülmüştür. Bu çalışmanın amacı, enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kalıplanmış numunelerin ortalama hücre boyutunu, kabuk tabakası kalınlığını ve köpük yoğunluğunu en aza indirmek, hücre yoğunluğunu, çekme ve darbe mukavemetlerini ise en üst düzeye çıkarmaktır. Bu nedenle, daha düşük ortalama hücre boyutu, kabuk

tabakası kalınlığı ve köpük yoğunluğu için, Denklem 4'te verilen "küçük olan en iyisi" ve yüksek hücre yoğunluğu, çekme ve darbe mukavemeti için Denklem 5'te verilen "büyük olan en iyisi" S/N fonksiyonları kullanılmıştır. Burada, y_i : deneysel ölçümler ve y_i : deney sayısıdır.

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n} \right) \quad (4)$$

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \dots + 1/y_n^2}{n} \right) \quad (5)$$

Tablo 1. L9 ortogonal dizileri

Table 1. L9 orthogonal arrays

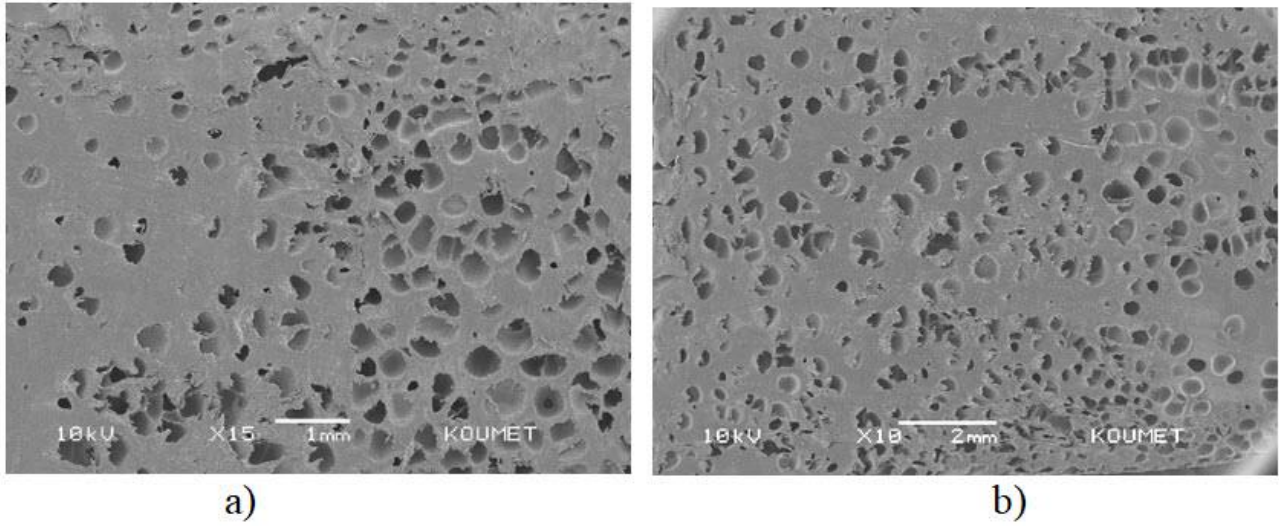
Deneme	Enjeksiyon basıncı, (E.B)		Enjeksiyon hızı, (E.H)		Geri besleme basıncı		Ergiyik sıcaklığı, (E.S)	
	Seviye	Parametre	Seviye	Parametre	Seviye	Parametre	Seviye	Parametre
1	1	60	1	60	1	20	1	160
2	1	60	2	80	2	60	2	170
3	1	60	3	100	3	100	3	180
4	2	80	1	60	2	60	3	180
5	2	80	2	80	3	100	1	160
6	2	80	3	100	1	20	2	170
7	3	100	1	60	3	100	2	170
8	3	100	2	80	1	20	3	180
9	3	100	3	100	2	60	1	160

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Tablo 2'de L9 ortogonal tasarıma göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen morfolojik ve mekanik deney sonuçları verilmiştir. Şekil 5'te ise farklı enjeksiyon kalıplama parametreleri (Deneme 3 ve 5 için) kullanılarak üretilen kompozit hücre yapılarının taramalı elektron mikroskobu (SEM)'nda alınan görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yapıdaki hücreler matris bünyesinde hemen hemen homojen olarak dağılmış ve kapalı gözenek yapısına sahip hücrelerin oluştuğu gözlenmiştir. Polimer köpüklerin hücre morfolojisi, köpük ajanı miktarının yanında enjeksiyon kalıplama proses parametrelerine de

önemli oranda bağlıdır. Şekil 5a ve 5b karşılaştırıldığında Şekil 5a'da daha büyük hücreler gözlenirken 5b' de ise daha küçük hücreler oluştuğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi proses parametreleri ile ilişkilidir. Şekilde görüldüğü gibi E.B, E.H ve E.S dahil olmak üzere diğer kalıplama koşullarının da hücre çekirdeklenmesini ve büyümesini ve dolayısıyla hücre yapısını etkilediği görülmektedir. Çekirdeklenen hücrelerin sayısının artması köpük yapısındaki hücre sayısını artırıp sistemdeki mevcut gazın hızlı bir şekilde tüketilmesini ve dolayısıyla hücre boyutunun daha düşük elde edilmesini sağlayacaktır.



Şekil 5. Farklı enjeksiyon kalıplama proses parametrelerinde T-EPDM-PP kompozitin hücre yapısı, a) Deneme 3 ve b) Deneme 5

Figure 5. Cell structure of T-EPDM-PP composite at different injection molding process parameters, a) Trial 3 and b) Trial 5

Tablo 2. Morfolojik ve mekanik deney sonuçları

Table 2. Morphological and mechanical test results

Deneme	Hücre çapı (μm)	Hücre yoğunluğu (10^3 cells/cm^3)	Kabuk tabakası kalınlığı (μm)	Köpük yoğunluğu (g/cm^3)	Çekme dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı (kJ/m^2)
Köpüklendirilmemiş	-	-	-	-	16.11	146.5
T-EPDM-PP						
1	213	5.65	1920	0.938	13.97	129.2
2	222	6.26	1760	0.916	13.68	131.8
3	236	5.47	1740	0.898	13.00	121.9
4	242	5.10	1678	0.868	12.85	121.2
5	198	6.22	1840	0.887	14.00	123.1
6	166	7.88	1522	0.826	13.02	101.8
7	217	4.58	1610	0.896	13.27	118.1
8	177	7.69	1235	0.804	12.24	101.0
9	159	9.51	1380	0.847	13.04	105.1

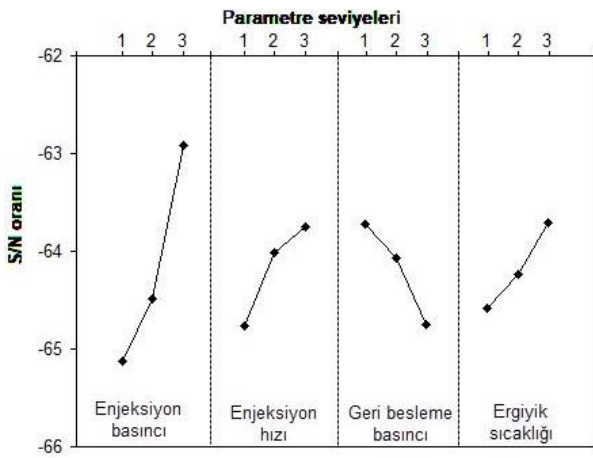
3.1. Proses şartlarının kabuk tabakası kalınlığına etkisi

3.1. Effect of process conditions on skin layer thickness

Şekil 6'da T-EPDM-PP polimer kompozit köpük numunelerin kabuk tabakası kalınlığına proses şartlarının etkisini gösteren S/N ana etki grafiği verilmiştir. Kabuk tabakası kalınlığı için "düşük olan en iyisi" formülü uygulanmıştır. Şekil incelendiğinde yüksek E.B, yüksek E.H ve yüksek E.S ile düşük geri besleme basınçlarında en yüksek S/N oranı elde edilmiştir. Düşük kabuk tabakası kalınlığı için optimum proses şartları 100 bar E.B,

100 mm/s E.H, 20 bar geri besleme basıncı ve 180 °C E.S altında elde edilmiştir. Artan E.B, E.H ve E.S ile kabuk tabakası kalınlığı azalırken artan geri besleme basıncı ile kabuk tabaka kalınlığı artmıştır. Ayrıca, T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin kabuk tabakası kalınlığını etkileyen en önemli parametrenin enjeksiyon basıncı olduğu belirlenmiştir. Enjeksiyon basıncının artması ile kabuk tabakası kalınlığının azalmasının viskozite ve soğuk kalıp ile temas eden sıcak polimerin temas süresinin azalması ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyon basıncı ile artan basınç azalım oranı kabuk tabakası kalınlığını azaltmıştır (Barzegari & Rodrigue, 2009). Kabuk tabakası

kalınlığının hücre boyutu ve hücre sayısı ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir (Heidari & Fasihi, 2019). Ergiyik haldeki polimerin reolojik özellikleri hem hücre büyümesi hem de hücrelerin kararlılığı açısından önemli bir parametredir. İki fazlı polimer-gaz çözeltisinin reolojik özellikleri, kayma oranına, köpük ajanı miktarına, ergiyik ve kalıp sıcaklığına bağlıdır (Barzegari & Rodrigue, 2009). Yüksek kayma viskozitesi, büyük basınç azalımı oluşturur ve daha fazla çekirdeklenme alanlarının oluşumuna katkı sağlamaktadır (Xiangmin vd., 2003). Aynı zamanda, artan viskozite büyüyen hücrelerden gaz kaybı meydana geldiğinde, hücrelerin birleşmesini ve/veya çökmesini engellemektedir (Spitael & Christopher, 2004).



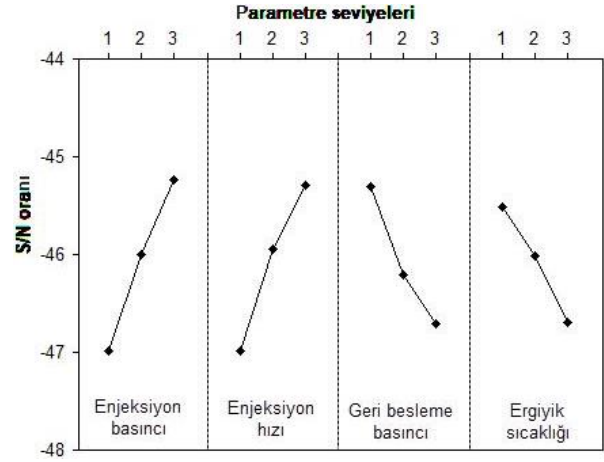
Şekil 6. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının kabuk tabakası kalınlığına etkisi
Figure 6. The effect of the process conditions on the skin layer thickness of T-EPDM-PP polymer composite

3.2. Proses şartlarının hücre boyutuna etkisi

3.2. Effect of process conditions on cell size

Şekil 7’de ise T-EPDM-PP köpük numunelerin hücre boyutuna proses şartlarının etkisini gösteren S/N ana etki grafiği verilmiştir. Küçük hücre boyutu için “küçük olan en iyisi” formülü uygulanmıştır. Şekil incelendiğinde, yüksek E.B ve yüksek E.H ile düşük geri besleme basıncı ve E.S kullanıldığında en yüksek S/N oranı elde edilmiştir. Artan E.B ve enjeksiyon hızlarında hücre boyutu azalmıştır. Yüksek basınç ve hızlarda, kalıp girişinde premature kabarcık oluşma ihtimali azalacaktır. Hücrelerin oluşumu kalıp içerisinde başlayacak ve dolayısıyla hücre boyutu azalacaktır. Ayrıca yüksek basınç altında polimer malzemenin rijitliği artacak ve hücrelerin büyümesi için daha fazla enerji gerekecektir, dolayısıyla hücre boyutu önemli oranda azalacaktır. Tejada ve arkadaşları (2005) ise

polietilen/polipropilen karışımına ilave ettikleri ikinci bir fazın hücrelerin çekirdeklenme oranını artıracak ve köpük numunelerin azalan hücre boyutu ile yüksek hücre yoğunluğuna sahip olacağını belirtmişlerdir.

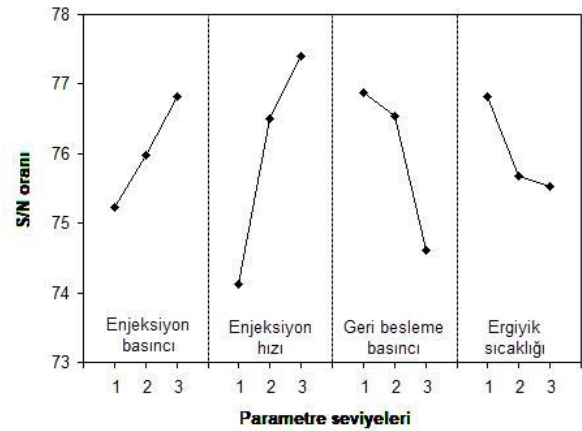


Şekil 7. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının hücre boyutuna etkisi
Figure 7. The effect of the process conditions on the cell size of T-EPDM-PP polymer composite

3.3. Proses şartlarının hücre yoğunluğuna etkisi

3.3. Effect of process conditions on cell density

Barzegari ve Rodrigue (2009) tarafından yapılan çalışmada hücre çekirdeklenme oranının hücre yoğunluğunu önemli oranda etkilediği belirtilmiştir. Eğer, polimer-gaz karışımına ait basıncın, çözünürlük basıncı altına düştüğünde hücrelerin çekirdekleneceği belirtilmiştir. Şekil 8’de köpük hücre yoğunluğu için daha yüksek S/N oranının daha iyi olduğu anlamına gelen “büyük olan en iyisi” S/N formülü uygulanarak elde edilmiş sonuçlar verilmiştir.



Şekil 8. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının hücre yoğunluğuna etkisi
Figure 8. The effect of the process conditions on the cell density of T-EPDM-PP polymer composite

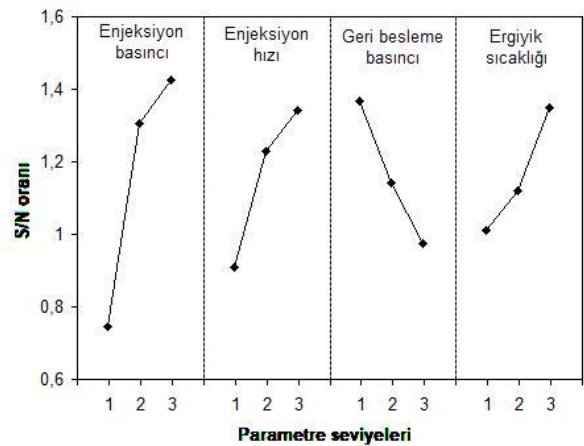
Yüksek enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı ile birlikte düşük geri besleme basıncı ve ergiyik sıcaklığı kullanıldığında yüksek S/N oranı elde edilmiştir. Bilindiği gibi hücre yoğunluğu polimer ergiyik içerisindeki çekirdeklenme oranı ile yakından ilişkilidir. Çekirdeklenme meydana geldiğinde, gaz molekülleri mevcut çekirdeklenen hücelere doğru difüze olacaktır. Dolayısıyla her bir hücrenin büyüme miktarı gazın miktarı ile ilişkilidir. Artan enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı ergiyik polimerdeki köpük ajanının bozunma miktarını ve bozunma sonucu açığa çıkan gaz miktarını artıracaktır. Dolayısıyla hücre çekirdeklenmesi ve hücre yoğunluğu (birim hacimdeki hücre sayısı) artacaktır. Artan ergiyik sıcaklığı ise viskoziteyi ve basınç azalım oranını azaltacağından dolayı çekirdeklenme oranı azalacaktır. Benzer bir açıklama [Heidari ve Fasihi \(2019\)](#) tarafından yapılmış ve %2 oranında azodikarbonamit ve sodyum bikarbonat gibi iki farklı köpük ajanı ile üretilen talk katkılı PP/poliolenin-elastomer (POE) karışımında, çekirdeklenme karakteristiğinin hücre boyutunu azalttığı ve hücre yoğunluğunu (sayısını) artırdığı belirtilmiştir. Hücrelerin çekirdeklenmesi ile birlikte köpük ajanının bozunması sonucu ortaya çıkan gaz molekülleri çekirdeklenmiş hücelere difüze olacaktır. Oluşan hücrelerin büyümesi köpük ajanı miktarı ve polimerin ergiyik dayanımına bağlıdır. Düşük E.B, ergimiş polimerdeki gazın tamamını çözmekte ve daha düşük genleşme oranı elde edilmektedir. Artan E.B ile köpük ajanının bozunması artmakta ve hücre çekirdeklenmesi ve büyümesi meydana gelmektedir ([Barzegari & Rodrigue, 2009](#)). Yüksek E.B ile oluşan yüksek basınç azalım oranı çekirdeklenme için gerekli olan serbest entalpiyi (ΔG^*) azaltmakta ve çekirdeklenme oranı artmaktadır. Hücre sayısı basınç azalım oranının artmasıyla önemli oranda artmıştır ([Larissa vd., 2009](#)). Hücrelerin oluşumu ve hücre büyümesi için sistemdeki mevcut enerjinin hücre oluşum enerjisinden daha yüksek olması gerekmektedir. Eğer sistemdeki bu enerji hücre oluşum enerjisinden daha düşük olduğunda hücreler çökecektir. Homojen hücre çekirdeklenmesi için Eşitlik 6'da verilen aktivasyon enerjisi (Gibbs serbest enerjisinin) (ΔG^*_{hom}) ve basınç azalımı arasındaki ilişki verilmiştir ([Martial vd., 2011](#); [Colton & Suh, 1987](#)). Burada; ΔG^*_{hom} : şekillenen kritik bir çekirdeğin Gibbs serbest enerjisi, γ_{bp} : polimerin yüzey enerjisi, ΔP : kabarcık içerisindeki ve matris çevresindeki gaz basıncı arasındaki fark (gaz doyma basıncı) ([Leung vd., 2012](#); [Christopher & Monika, 2008](#); [Wentao vd., 2006](#)).

$$\Delta G^*_{hom} = \frac{16 \cdot \pi \cdot \gamma_{bp}^3}{3 (\Delta P)^2} \quad (6)$$

3.4. Proses şartlarının köpük yoğunluğuna etkisi

3.4. Effect of process conditions on foam density

Şekil 9'da T-EPDM-PP polimer kompozit köpük numunelerin köpük yoğunluğuna proses şartlarının etkisini gösteren S/N ana etki grafiği verilmiştir. Köpük yoğunluğunu daha düşük elde etmek için "küçük olan en iyisi" formülü uygulanmıştır. Şekil 9'da görüldüğü gibi artan E.B, E.H ve E.S ile köpük yoğunluğu azalmıştır. Enjeksiyon basıncı köpük yoğunluğu üzerine önemli bir etkiye sahipken geri besleme basıncı ve ergiyik sıcaklığı köpük yoğunluğunu daha az etkilemiştir. Azalan köpük yoğunluğu 20 bar geri besleme basıncı, 180 °C E.S, 100 mm/s E.H ve 100 bar E.B şartlarında elde edilmiştir. [Tsivintzelis ve arkadaşları \(2007\)](#), köpük ajanının çözünme miktarının artması ile hücrelerin çekirdeklenmesi ve büyümesi için ve aynı zamanda çekirdek alanlarının oluşması için büyük öneme sahip olan enjeksiyon basıncının yüksek değerlerde kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Tapılan çalışma sonucunda artan enjeksiyon basıncı ile birlikte artan hücre sayısı ve azalan hücre boyutlarına sahip düşük köpük yoğunluklu polimerler elde edildiğini belirtmişlerdir. [Barzegari ve Rodrigue \(2009\)](#), enjeksiyon basıncının polimer köpük yoğunluğunu en çok etkileyen parametre olduğunu belirtmişlerdir. Çekirdeklenme miktarının basınç değişiminden daha fazla etkilendiği belirtilmiştir.



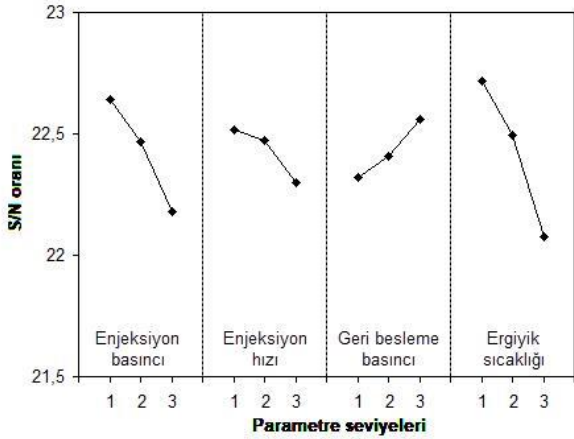
Şekil 9. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının köpük yoğunluğuna etkisi

Figure 9. The effect of the process conditions on the foam density of T-EPDM-PP polymer composite

3.5. Proses şartlarının mekanik özelliklere etkisi

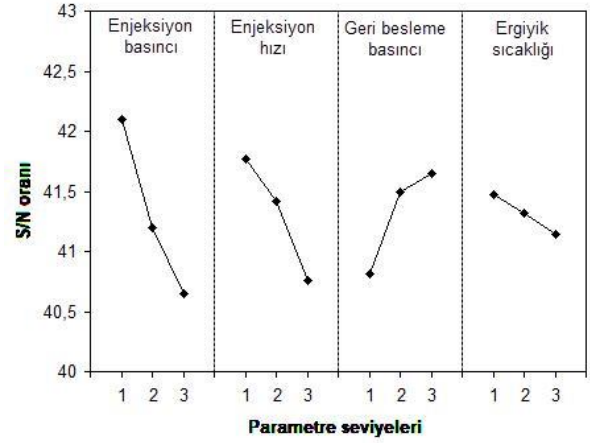
3.5. Effect of process conditions on mechanical properties

Şekil 10’da farklı enjeksiyon kalıplama şartlarının T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin çekme dayanımı üzerine etkileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi köpük numunelerin çekme dayanımlarını etkileyen en önemli parametrenin ergiyik sıcaklığı olduğu gözlenirken sonrasında sırası ile enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı ve geri besleme basıncı olmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi enjeksiyon proses parametrelerinden olan yüksek geri besleme basıncı hücre yoğunluğunu azaltmasına sebep olmaktadır. Bu ise kabuk tabakası kalınlığının artmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda ise köpük malzemenin çekme dayanımı artmaktadır. Ayrıca, yüksek E.B ve E.H, yüksek basınç azalım oranı ile sonuçlanmaktadır ve bu durum çekirdeklenen hücrelerin sayısını artırmakta ve daha küçük hücrelerin oluşumuna sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak köpük malzemenin çekme dayanımı azalmaktadır. En yüksek çekme dayanımı 100 bar geri besleme basıncı, 160 °C E.S, 60 mm/s E.H ve 60 bar E.B kullanıldığında elde edilmiştir.



Şekil 10. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının çekme dayanımına etkisi

Figure 10. The effect of the process conditions on the mechanical properties of T-EPDM-PP polymer composite



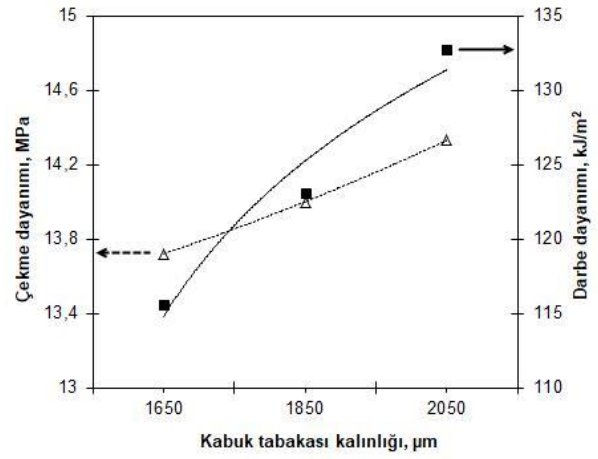
Şekil 11. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının darbe dayanımına etkisi

Figure 11. The effect of the process conditions on the impact strength of T-EPDM-PP polymer composite

Şekil 11’de ise darbe dayanımı için “büyük olan en iyisi” S/N formülü uygulanarak elde edilmiş sonuçlar verilmiştir. T-EPDM-PP polimer köpüklerin darbe dayanımı artan E.B, E.H ve E.S ile azalırken geri besleme basıncı ile artmıştır. Proses şartları içerisinde en etkili parametrenin enjeksiyon basıncı olduğu belirlenmiştir. Yüksek enjeksiyon basıncı daha fazla hücre oluşmasına (Şekil 3) sebep olarak darbe dayanımını azaltmıştır. En yüksek darbe dayanımı 100 bar geri besleme basıncı, 160 °C E.S, 60 mm/s E.H ve 60 bar E.B şartlarında elde edilmiştir. T-EPDM-PP polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin azalmasında artan hücre sayısı ve buna bağlı olarak azalan K.T.K sebep olmuştur. Wong ve arkadaşları (2008) azalan K.T.K ile polimer malzemenin miktarının azaldığı belirtilmiştir. Minoru ve arkadaşları (2007) kesitteki azalma ve gözenekler nedeniyle oluşan gerilim yığılmaları nedeniyle polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin azaldığını belirtmişlerdir. Kabuk tabakasının mekanik özellikler üzerinde baskın olduğu ve köpüklü numunelerin mekanik özelliklerinin hücre boyutu ve dağılımını kapsayan köpük yoğunluğuna da bağlı olduğu belirtilmiştir (Andreas & Altstadt, 2007). Mengeloğlu ve Laurent (2003) yaptığı çalışmada büyük hücre boyutunun çatlak veya hata gibi davrandığı ve hata başlangıcına sebep olduğu ve PVC kompozitlerin rijitliğinin azaldığı belirtilmiştir. Farklı bir açıklama ise Rodriguez-Perez (2009) tarafından yapılmıştır. Hücre boyutunun elastik bölgede çalışması durumunda rijitliği etkilemediği belirtilmiştir. Park ve Cheung (1997) ise yaptığı çalışmada büyük hücre boyutlu ve açık hücreli morfolojinin köpükte düzensiz bir yapı oluşturduğu ve bu durumda gerilim yığılmalarına sebep olduğu belirtilmiştir. Yuan ve

arkadaşları (2004), yaptığı çalışmada küçük ve yoğun mikrohücrelerin oluşması ile yüksek darbe dayanımı elde edildiğini ve aynı zamanda köpüksüz polimer ile karşılaştırıldığında çekme dayanımındaki azalma oranının azaldığını belirtmişlerdir. Ancak, Doroudiani ve Kortschot (2003) ise PS köpüklerde hücre morfolojisinin darbe direncine etkisini inceledikleri çalışmada, hücre boyutunun, köpüğün darbe dayanımını etkilemediğini, köpüğün darbe dayanımı üzerine relatif yoğunluğunun daha fazla etki ettiğini belirtmişlerdir.

Enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretilen numuneler kabuk tabakası bölgesi ve çekirdeklenmiş bölge olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır (Jae & Sung, 2004). Kabuk tabaka bölgesi, köpük numunede köpüklenmemiş bölge olarak adlandırılırken sıcak ergiyik polimer ile soğuk kalıp duvarları arasındaki yüksek ısı transferi nedeniyle oluşmaktadır (Blanchet & Rodrigue, 2004). Oluşan bu kabuk tabakasının kalınlığı köpük malzemenin çekme dayanımı ve darbe dayanımını önemli oranda etkilemektedir. Şekil 12’de enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretilen T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin K.T.K ile çekme ve darbe dayanımlarındaki değişim verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan K.T.K ile çekme ve darbe dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Köpüklenmemiş bölgenin artması nedeniyle bu beklenen bir sonuçtur. Birim alana düşen malzeme miktarı artmış ve bu durum da polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin artmasına neden olmuştur. Zhen ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada da benzer bir sonuç elde etmişlerdir. Daha önce yapılan çalışmalarda polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin köpük yoğunluğu, hücre yapısı ve hücre duvar kalınlığındaki değişimlere bağlı olduğu belirtilmiştir (Heidari & Fasihi, 2019; Barlow vd., 2001). Polimer köpük morfolojilerinde hücre sayısı, hücreler arası mesafe, hücre yoğunluğu ve kabuk tabakası kalınlığı arasında mevcut bir ilişki vardır. Köpük ajanının bozunması ile meydana gelen çekirdeklenme mekanizması sonucu oluşan hücreler ve bu hücrelerin sayısının artması veya azalması hücreler arası mesafeyi, hücre yoğunluğunu ve dolayısıyla oluşan kabuk tabakası kalınlığını etkilemektedir. Hücre sayısının daha fazla olduğu bölgelerde kabuk tabakası kalınlığının daha az, hücre sayısının sınırlı olduğu alanlarda ise kabuk tabakası kalınlığının daha fazla olduğu belirtilmiştir (Yetgin vd., 2013).



Şekil 12. T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin kabuk tabakası kalınlığına bağlı olarak çekme ve darbe dayanımlarındaki değişim
Figure 12. The change in tensile and impact strengths of T-EPDM-PP polymer composite foams depending on the skin layer thickness.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama şartlarının T-EPDM-PP polimer köpüklerin mekanik ve morfolojik özelliklerine etkisi incelenmiş ve analiz edilmiştir. Düşük K.T.K, hücre boyutu, köpük yoğunluğu ve yüksek hücre yoğunluğu, çekme dayanımı ve darbe dayanımına sahip polimer köpük üretimi için optimum şartlar S/N ana etki grafikleri ile analiz edilmiştir. T-EPDM-PP kompozit köpüklerin hücre morfolojisi için enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı en etkili enjeksiyon proses parametreleri olarak tespit edilmiştir. Polimer kompozit köpük malzemelerin çekme ve darbe dayanımları artan enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı ve ergiyik sıcaklığı ile azalırken geri besleme basıncı ile artış göstermiştir. Çekme ve darbe dayanımları kabuk tabakası kalınlığının artması ile artmıştır. T-EPDM-PP polimer kompozit köpük üretiminde yüksek çekme ve darbe dayanımı elde etmek için uygulanması gereken optimum parametreler; 100 bar geri besleme basıncı, 160 °C ergiyik sıcaklığı, 60 mm/s E.H ve 60 bar E.B olarak belirlenmiştir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir. (Proje No: 2014-84). Yazarlar desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilir.

Yazar katkısı*Author contribution*

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Altan, M., & Demirci, M. (2018). Effect of process parameters on shear layer thickness in injection molded short-glass fiber reinforced polypropylene. *International Polymer Processing*, 33(5), 714-720. <https://doi.org/10.3139/217.3585>
- Andreas, N. J. S., & Altstadt, V. (2007). Controlling morphology of injection molded structural foams by mold design and processing parameters. *Journal of Cellular Plastics*, 43(4-5), 313-330. <https://doi.org/10.1177/0021955X07079043>
- Andrzej, K. B., & Omar, F. (2006). Microcellular injection molded wood fiber-PP composites: Part I-Effect of chemical foaming agent content on cell morphology and physico-mechanical properties. *Journal of Cellular Plastics*, 42(1), 63-76. <https://doi.org/10.1177/0021955X06060945>
- Aycicek, M., Sedef, C., & Akın, A. (2018). Prepare foam with injection molding method in acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) matrix using chemical foam agent. *Materials Science: Advanced Composite Materials*, 2(4), 1-4. <http://dx.doi.org/10.18063/msacm.v0i0.917>
- Barlow, C., Kumar, V., Flinn, B., Bordia, R. K., & Weller, J. (2001). Impact strength of high density solid-state microcellular polycarbonate foams. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123(2), 229-233. <https://doi.org/10.1115/1.1339004>
- Barzegari, M. R., & Rodrigue, D. (2009). The effect of injection molding conditions on the morphology of polymer structural foams. *Polymer Engineering and Science*, 49(5), 949-959. <https://doi.org/10.1002/pen.21283>
- Blanchet, J. F., & Rodrigue, D. (2004). The effect of skin thickness on the mechanical properties of structural foams. *Cellular Polymers*, 23(4), 193-210. <https://doi.org/10.1177/026248930402300401>
- Chien, R. D., Chen, S. C., Lee, P. H., & Jien-Sheng, H. (2004). Study on the molding characteristics and mechanical properties of injection-molded foaming polypropylene parts. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(4), 429-444. <https://doi.org/10.1177/0731684404031891>
- Colton, J. S., & Suh, N. P. (1987). The nucleation of microcellular thermoplastic foam with additives: Part II: experimental results and discussion. *Polymer Engineering & Science*, 27(7), 493-499. <https://doi.org/10.1002/pen.760270703>
- Christopher, C. I., & Monika, B. (2008). Current trends in nanocomposite foams. *Journal of Cellular Plastics*, 44(6), 493-515, 2008. <https://doi.org/10.1177/0021955X08097707>
- Doroudiani, S., & Kortschot, M. T. (2003). Polystyrene foams. II. Structure-impact properties relationships. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(5), 1421-1426. <https://doi.org/10.1002/app.12805>
- Heidari, A., & Fasihi, M. (2019). Cell structure-impact property relationship of polypropylene/thermoplastic elastomer blend foams. *eXPRESS Polymer Letters*, 13(5), 429-442. DOI:10.3144/expresspolymlett.2019.36
- Jae, D. Y., & Sung, W. C. (2004). A mold surface treatment for improving surface finish of injection molded microcellular parts. *Cellular Polymers*, 23(1), 39-48. <https://doi.org/10.1177/026248930402300103>
- Kumar, V., & Suh, N. P. (1990). A process for making microcellular thermoplastic parts. *Polymer Engineering & Science*, 30(20), 1323-1329. <https://doi.org/10.1002/pen.760302010>
- Leung, S. N., Anson, W., Lilac, C. W., & Park, C. B. (2012). Mechanism of extensional stress-induced cell formation in polymeric foaming processes with the presence of nucleating agents. *Journal of Supercritical Fluids*, 63, 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.12.018>
- Larissa, Z., Martin, J., & Munstedt, H. (2009). Foaming of thin films of a fluorinated ethylene propylene copolymer using supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*, 49(1), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.11.013>
- Martial, S., Jacques, F., Audrey C., Clemence, N., & Elisabeth, R. (2011). New challenges in polymer foaming: A review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide.

- Progress in Polymer Science*, 36(6), 749–766. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.12.004>
- Mengelöglü, F., & Laurent, M. M. (2003). Mechanical properties of extrusion-foamed rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 9(1), 26-31. <https://doi.org/10.1002/vnl.10058>
- Minoru, S., Iku, H., & Yasushi, M. (2007). Mechanism of strength improvement of foamed plastics having fine cell. *Journal of Cellular Plastics*, 43(2), 157-167. <https://doi.org/10.1177/0021955X06075585>
- Ming-Cheng, G., Marie-Claude, H., & Pierre, J. C. (2007). Cell structure and dynamic properties of injection molded polypropylene foams. *Polymer Engineering and Science*, 47(7), 1070-1081. <https://doi.org/10.1002/pen.20786>
- Palutkiewicz, P., Milena, T., & Elzbieta, B. (2020). The influence of blowing agent addition, talc filler content, and injection velocity on selected properties, surface state, and structure of polypropylene injection molded parts. *Cellular Polymers*, 39(1), 3-30. <https://doi.org/10.1177/0262489319873642>
- Park, C. B., & Cheung, L. K. (1997). A study of cell nucleation in the extrusion of polypropylene foams. *Polymer Engineering and Science*, 37(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/pen.11639>
- Qin, X., Thompson, M. R., & Hrymak, A. N. (2006). Rheological comparison of chemical and physical blowing agents in a thermoplastic polyolefin. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(8), 2734-2740. <https://doi.org/10.1021/ie0510932>
- Rodriguez-Perez, M. A., & Lobos, J. (2009). Mechanical response of polyethylene foams with high densities and cell sizes in the microcellular range. *Journal of Cellular Plastics*, 45(5), 389-403. <https://doi.org/10.1177/0021955X09103946>
- Spitael, P., & Christopher, W. M. (2004). Strain hardening in polypropylenes and its role in extrusion foaming. *Polymer Engineering and Science*, 44(11), 2090-2100. <https://doi.org/10.1002/pen.20214>
- Tejeda, E. H., Carlos Zepeda, S., Ruben Gonzalez, N., & Denis, R. (2005). Morphology and mechanical properties of foamed polyethylene-polypropylene blends. *Journal of Cellular Plastics*, 41(5), 417-435. <https://doi.org/10.1177/0021955X05056959>
- Tsvintzelis, I., Anastasia, G. A., & Costas, P. (2007). Foaming of polymers with supercritical CO₂: An experimental and theoretical study. *Polymer*, 48(20), 5928-5939. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.08.004>
- Villamizar, C. A., & Chang, D. H. (1978). Studies on structural foam processing II. Bubble dynamics in foam injection molding. *Polymer Engineering and Science*, 18(9), 669-710. <https://doi.org/10.1002/pen.760180905>
- Wei, G., Huajie, M., Bei, L., & Xiangyu, G. (2014). Influence of processing parameters on molding process in microcellular injection molding. *Procedia Engineering*, 81, 670-675. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.058>
- Wentao, Z., Jian, Y., Lichuan, W., Weiming, M., & Jiasong, H. (2006). Heterogeneous nucleation uniformizing cell size distribution in microcellular nanocomposites foams. *Polymer*, 47(21), 7580-7589. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.08.034>
- Wong, S., John, W. S. L., Hani, E. N., & Park, C. B. (2008). Effect of processing parameters on the mechanical properties of injection molded thermoplastic polyolefin (TPO) cellular foams. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(7), 605-613. <https://doi.org/10.1002/mame.200700362>
- Xiangmin, H., Changchun Z., Lee, L. J., Kurt, W. K., & David, L. T. (2003). Extrusion of polystyrene nanocomposite foams with supercritical CO₂. *Polymer Engineering and Science*, 43(6), 1261-1275. <https://doi.org/10.1002/pen.10107>
- Yetgin, S. H. (2018). *Otomotiv sektörü için polimer köpük malzeme üretimi ve karakterizasyonu* [Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://hdl.handle.net/20.500.12619/76563>
- Yetgin, S. H., Unal, H., Mimaroglu A., & Fındık, F. (2013). Influence of process parameters on the mechanical and foaming properties of PP polymer and PP/Talc/EPDM composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(5), 433-439. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.748802>
- Yinping, T., Srichand, H., Robert, H., Anselmo, G., & Paulo, J. B. (2020). A study of physico-mechanical properties of hollow glass bubble, jute fibre and rubber powder reinforced polypropylene compounds with and without MuCell® technology for lightweight applications. *Polymers*, 12(11), 2664. <https://doi.org/10.3390/polym12112664>
- Yuan, M., Turng, L. S., Gong, S., Caulfield, D., Hunt, C., & Spindler, R. (2004). Study of injection molded microcellular polyamide-6 nanocomposites. *Polymer Engineering and*

Science, 44(4), 673-686.
<https://doi.org/10.1002/pen.20061>

Zhen, X. X., Zhen, X. Z., Kaushik, P., Jong, U. B., Sung, H. L., & Jin, K. K. (2010). Study of microcellular

injection-molded polypropylene/waste ground rubber tire powder blend. *Materials & Design*, 31(1), 589-593.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.002>

Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of surface roughness on friction behavior in hydrodynamic radial plain bearings

Hasan BAŞ^{*1,a}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 21.10.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 09.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 25.06.2022

Öz

Hidrodinamik kaymalı yataklarda, sürtünme katsayısı, yağ film kalınlığı, basınç dağılımı, yağ debisi, vb gibi parametreler yatak tasarımı ve optimum enerji verimliliği açısından oldukça önemli tasarım kriterleridir. Bu çalışmada, hidrodinamik kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, yatak malzemesi aynı olan üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yatak zarfı kullanılarak farklı yüklerde ve sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün, özellikle sınır ve karışık sürtünme bölgesinde sıvı sürtünme bölgesinden daha fazla etkin olduğu belirlenmiştir. Artan yüzey pürüzlülüğü ile birlikte yağ filmi oluşum kabiliyeti azalırken, aşınma ve yataktaki güç kaybının arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hidrodinamik yağlama, Radyal kaymalı yatak, Triboloji, Yüzey pürüzlülüğü.

Abstract

In hydrodynamic plain bearings, parameters such as friction coefficient, oil film thickness, pressure distribution, oil flow, etc. are very important design criteria in terms of bearing design and optimum energy efficiency. In this study, in order to investigate the effects of surface roughness on bearing performance in hydrodynamic plain bearings, experiments were carried out at different loads and temperatures using two bearing envelopes with the same bearing material and with different surface roughness. As a result of the experiments, it was determined that the surface roughness was more effective especially in the boundary and mixed friction region than in the fluid friction region. It was determined that while the oil film formation ability decreased with increasing surface roughness, wear and power loss in the bearing increased.

Keywords: Hydrodynamic lubrication, Radial plain bearing, Tribology, Surface roughness.

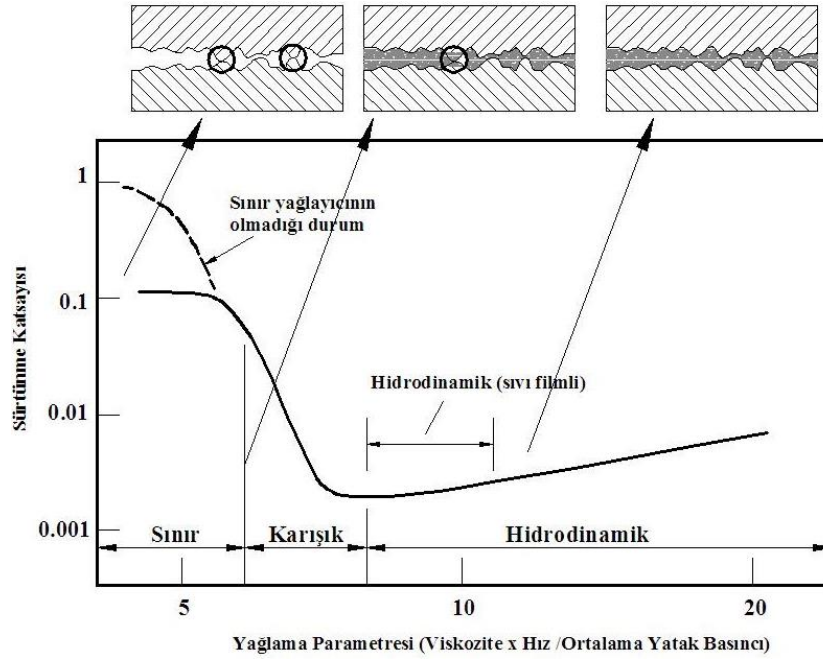
*a Hasan BAŞ; bas@ktu.edu.tr, Tel: (0462) 377 29 43, orcid.org/0000-0002-5653-3813

1. Giriş

1. Introduction

Mekanik sistemlerdeki güç kayıplarının azaltılmasında kaymalı yatakların fonksiyonu oldukça fazladır. Endüstride, özellikle enerji santrallerinde kullanılan hidrodinamik radyal kaymalı yatakların uzun ömürlü olması ve minimum güç kaybına sahip olması enerji verimliliği açısından zaruridir. Eş çalışan yüzey çiftlerinde uygun yağ kullanımı güç kaybını azaltmaktadır. Ayrıca, yüzey pürüzlüğünü minimum seviyede tutmak sürtünme kaybını azaltırken, gereğinden fazla düşürmek ise üretim maliyetini artırmaktadır. Kararlı bir kaymalı yatağın çalışma koşullarında, yüzeyler arasında yeterli yüzey pürüzlülüğü sağlandıktan sonra, çalışma süresince de yüzeyler arasındaki pürüz değerleri kararlı kalmalı yani artmamalıdır. Bu nedenle, kaymalı yataklarda, yatağı devreye alırken metal-metal teması çalışma durumu zorunlu olmaktadır. Çalışma süresince kullanılan kaymalı yatakların uzun ömürlü olabilmesinde,

sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde mümkün mertebe düşük yüzey pürüzlüğüne sahip yüzey çifti etkili olmaktadır, (Baş, 2021a). Bunun yanı sıra, sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde çalışan yatakların uzun ömürlü olabilmesinde diğer bir alternatif ise yüzey çiftlerinin tribolojik özelliklerini iyileştirmede katkılı yağların kullanılmasıdır, (Baş, 2021b; Baş, 2022; Baş & Karabacak, 2022; Baş vd., 2022). Hidrodinamik etkili kaymalı yataklarda “Stribeck Eğrisi” olarak adlandırılan (Alford, 1911; Cuvalci & Baş, 2004; Chong & De la Cruz, 2014; Chong, & Hamdan, 2019; Delprete & Razavykia, 2018; Lu, 2006; Lu vd., 2006; Mang, 2014; Mathias, 2010; Sanchez, 2011; Westerfield, 2016) ve Şekil 1’de görülen grafik yardımıyla (Salman, 2011) çalışma esnasında oluşan sürtünme katsayısı, yatakta kullanılan yağlayıcının viskozitesi, yatak tarafından taşınan dış yükün sisteme uyguladığı zorlanma ve yüzeylerin kayma hızları arasındaki izafi hız farkı anlamlı olarak görülebilmektedir. Bu da makinalarda veya sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1. Hidrodinamik kaymalı yataklarda Stribeck diyagramı

Figure 1. Stribeck diagram for hydrodynamic plain bearings

Şekil 1’de görüldüğü gibi, sürtünme katsayısı düşey eksende olup, yatay eksen ise milin dönme hızı (devir sayısı) veya $\eta n/P$ boyutsuz ifade yer almaktadır. Burada n kayma hızını, η yağlayıcı akışkanın dinamik viskozitesini ve P ise yatak yükünün yataktaki izdüşümü alanına yani birim yatak yüzeyine bölünmesiyle oluşan yatak basıncını temsil etmektedir. $\eta n/P$ değerinde yer alan devir sayısı minimum bir değere düşüncüye kadar azaltıldığında, sürtünme katsayısı da

düşmekte iken, belli bir değerden sonra sürtünme katsayısı artışa geçmektedir. Sürtünme katsayısını minimum değere yaklaştıran bu devreye geçiş devir sayısı denir. Genel bir yatak için bu minimum $\eta n/P$ değeri yaklaşık 0,001 - 0,002 aralığında olduğunda ideal hidrodinamik yağlama şartının sağlandığı ifade edilebilmektedir. Bu durum hareketli yüzeylerde metal teması başlangıcına işaret etmektedir ve sonrasında sürtünme katsayısı artmaktadır. Temasın artması ile sürtünme

katsayısındaki artış devam edeceğinden bu bölgeye karışık yağlama bölgesi denir. Bu bölge için tipik sürtünme katsayısı değerinin ise yaklaşık 0,02-0,10 arasında olabileceği değerlendirilmektedir. Akabinde yağ film çok ince olduğunda, sürtünme katsayısı metal-metal temasıyla artar ve bu artışta yağlayıcının viskozitesi ve milin dönme hızı baskın olmayıp, bu artış 0,25 gibi değere erişebilir. Bu bölge ise kaymalı yatakta sınır yağlama şartları olarak isimlendirilir. (Sanchez, 2011). Bu yağlama bölgeleri, çalışma şartlarındaki kaymalı yataklarda metal-metal temasının olup olmadığı hakkında bilgi vermesi ve yatak performans değerlendirmesinde kolaylık sağlaması açısından önemlidir.

Hidrodinamik etkili bir kaymalı yatak devreye alınırken, henüz yağ teşekkülünün oluşmadığı sınır sürtünme bölgesinden oldukça kısa sürede sıvı çalışma bölgesine geçerek bu bölgede kararlı çalışmaya devam etmek, yine yatak ömrü üzerindeki en önemli hususlardan biridir. Güç kaybını en alt seviyede muhafaza edebilmek için ise, aynı şekilde sıvı çalışma bölgesine minimum sürede geçiş sağlandıktan sonra, geçiş devir sayısı diye adlandırılan ve yağ filmi oluşumuna tekabül eden devir sayısı değerinin yaklaşık 3 katı olan devirlerde çalışmak en uygun olmakta ve optimum çalışma devri olarak kabul edilmektedir. Daha yüksek devirlerde çalışmak minimum film kalınlığı açısından fevkalâde emniyetli iken, artan hızla birlikte yatakta kullanılan yağın viskoz etkisi nedeniyle sürtünme ısısı artmakta, bu da yatakta ısı kaybı olarak ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak ısınan yağın viskozitesi azalacağından, bir önceki çalışma şartlarında muhafaza edilebilen minimum yağ film kalınlığı bu durumda azalarak, yatak ile mil arasındaki metal-metal temasına ve yatak yüzeylerine ait pürüz değerlerinin daha da yükselmesine yol açmaktadır.

Çalışma süresince kullanılan kaymalı yatakların uzun ömürlü olabilmesinde, Şekil 1'de (Salman, 2011) görülen sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde mümkün mertebe düşük yüzey pürüzlüğüne sahip yatak malzemesinin seçimi önem arz etmektedir. Adhezyon aşınmasının minimize edilmesinde beyaz maden ya da çinko-alüminyum esaslı yatak kullanımı oldukça yaygındır. Bununla birlikte, karışık sürtünme bölgesinde çalışılması sonucu yatak yüzey pürüzlülüğünün artış göstermesi minimum yağ film teşekkülünü daha da zorlaştırmaktadır. Yapılan çalışmalar pürüzlüğün azalmasıyla birlikte yataktaki yük taşıma kapasitesinin arttığını ortaya koymaktadır, (Burwell vd., 1941). Yüzey pürüzlülüğünün yatak performansına etkilerinin literatürde birçok yaklaşım modellerine ait nümerik ve analitik çalışmalar oldukça mevcut

iken (Bhaskar vd., 2013; Eric vd., 1999; Saraç, 2022; Bhuvaneshwari vd., 2014), gerçek şartlarda yüzey pürüzlülüğünün deneysel çalışmaları ise sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada özellikle sınır ve karışık sürtünme bölgesinde yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak ele alınmıştır.

Yapılan deneylerde farklı yatak ve mil yüzeyine ait pürüz profillerinin sürtünme üzerindeki etkileri farklı yük değerlerinde detaylıca incelenmiştir. Özellikle yağ filmi oluşumunun gerçekleştiği devir sayılarında yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

Yapılan çalışmada, yüzey pürüzlüğü etkisinin yatak performansı üzerinde etkilerini incelemek için üç farklı pürüzlüğe sahip üç yatak zarfı kullanılmıştır. Yatakta baz yağ olarak Shell Tellus 10 motor yağı kullanılmıştır. Yatakta oluşan sınır, karışık ve sıvı film bölgelerindeki sürtünme değerleri grafiklerle detaylı olarak verilmiştir. Film oluşumunu beslemek için 50 cm³/dk akış hızında yağın yatak ile mil arasına iletimi sağlanmıştır. Sistem üzerinde, üç yüzey arasında yağ filmi oluşumunun var olup olmadığını gösteren direnç ölçüm devresi gerçekleştirilerek, deneyler esnasında karışık sürtünme bölgesinden sıvı sürtünme bölgesine geçişin, yani metal-metal temasının olmamasını sağlayan devir sayılarının tespiti yapılmıştır. Yatakta kullanılan test yağının viskozite değerleri, viskozite-sıcaklık katalog değerlerinden alınmış olup (Türekim, 2022), Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yatakta kullanılan yağın fiziksel özellikleri

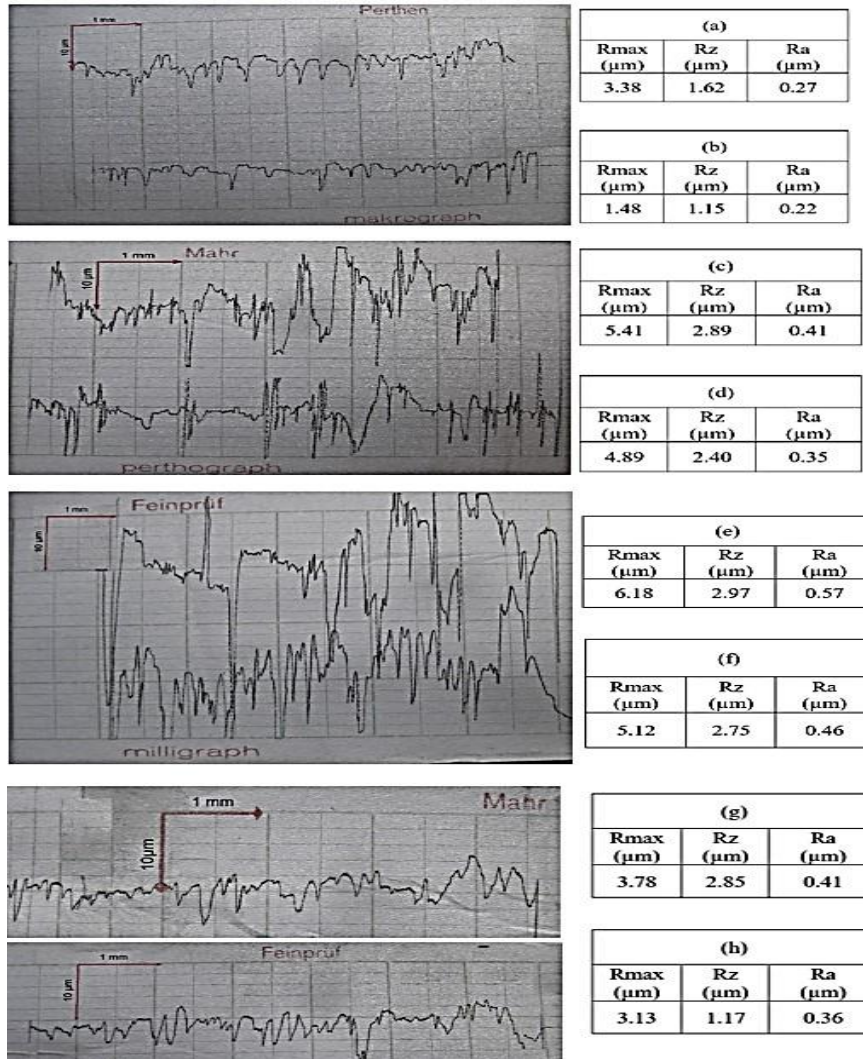
Table 1. Physical properties of the oil used in the bearing

Shell Tellus C 10	
ISO Viskozite Değeri ISO 3448	10
ISO Yağ Tipi	HL
Viskozite	40 C
	@ 0 °C
Viskozite İndeksi (II* 34)	70
Yoğunluk @ 15 °C kg/l (IP 160)	0.877
Akma Noktası °C (11* 15)	-30
[Parlama Noktası °C (PMCC) (IP 34)	166
Nötr. Sayısı, mg KOII/g (IP 139)	0.03
Sudan Ayrılabilme Özelliği Dakika 50 °C	20
Köpürme Özelliği/Kararlılık	
Sızdırmazlık elemanları ile uyuşabilme	14

Yatak sıcaklığına karşılık gelen dinamik viskozite 0.02 Ns/m^2 olarak belirlenmiştir. Deneyler $20\text{-}25^\circ\text{C}$ aralığında ve 253N ile 553N yatak yükü (1.22 ve 2.66 MPa yatak basıncı) değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Mil ve farklı pürüzlülük değerlerindeki üç adet ZA-27 alaşımli yatak zarflarının yüzey pürüzlülükleri, yüzey pürüzlülük test cihazı olan DIN 4768 Mahr-Germany Perthen Perthometer kullanılarak ölçülmüş, ortalama pürüz değerleri R_a , ortalama pürüz derinliği R_z ve maksimum pürüz yüksekliği R_{max} değerleri profil görünümleriyle birlikte Şekil 2’de verilmiştir. Test cihazıyla tarama uzunluğu 4.8 mm ve tarama hızı 0.5 mm/s izleme hızında

yüzeylerin profilleri kaydedilerek karbonlu kâğıda yazdırılmıştır. Farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip 1, 2 ve 3 nolu yatak zarfları ile milin çalışmadan önce ve sonra olmak üzere R_a ortalama yüzey pürüz değerlerinin sıra ile; $0.27\text{-}0.22$, $0.41\text{-}0.35$, $0.57\text{-}0.46$ ve $0.41\text{-}0.36 \mu\text{m}$ olduğu görülmektedir, Şekil 2. Şekil 2’den de görüldüğü gibi yüzeylerin deneylerden önce ve sonraki pürüzlülük değerlerinde azalma yönünde ortalama $0.05 \mu\text{m}$ kadar bir fark görülmüştür. Bu farklılık, yağlı ortamda çalışan yüzey çiftlerinin, malzeme farklılığı sebebiyle adhezyon aşınmasından ziyade yatakların abrazyon aşınmasına maruz kaldığına işaret etmektedir (Baş, 2021a).



Şekil 2. Deneylerde kullanılan mil ve yatak zarflarının yüzey pürüzlülükleri profilleri; 1 nolu yatak zarfının, (a) deneyden önce, (b) deneyden sonra; 2 nolu yatak zarfının, (c) deneyden önce, (d) deneyden sonra; 3 nolu yatak zarfının, (e) deneyden önce, (f) deneyden sonra; Yatak milinin, (g) deneyden önce, (h) deneyden sonraki yüzey pürüzlülükleri
Figure 2. Surface roughness profiles of shaft and bearings used in the experiments; Bearing 1, (a) before the test, (b) after the test; Bearing 2, (c) before the test, (d) after the test; Bearing 3, (e) before the test, (f) after the test; Surface roughness of the bearing shaft (g) before the test, (h) after the test

2.1. Yatağın kimyasal analizi

2.1. Chemical analysis of the bearing

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar içerisinde ZA-27 alaşımı diğer ticari alaşımlardan daha üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilemesi nedeniyle yatak uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir (Cuvalci & Baş, 2004). Bu çalışmada farklı yüzey pürüzlülük değerlerinde üç adet ZA-27 yatağı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de testlerde kullanılan ZA-27 alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 2. ZA-27 alaşımının kimyasal bileşimi
Table 2. Chemical composition of ZA-27 alloy

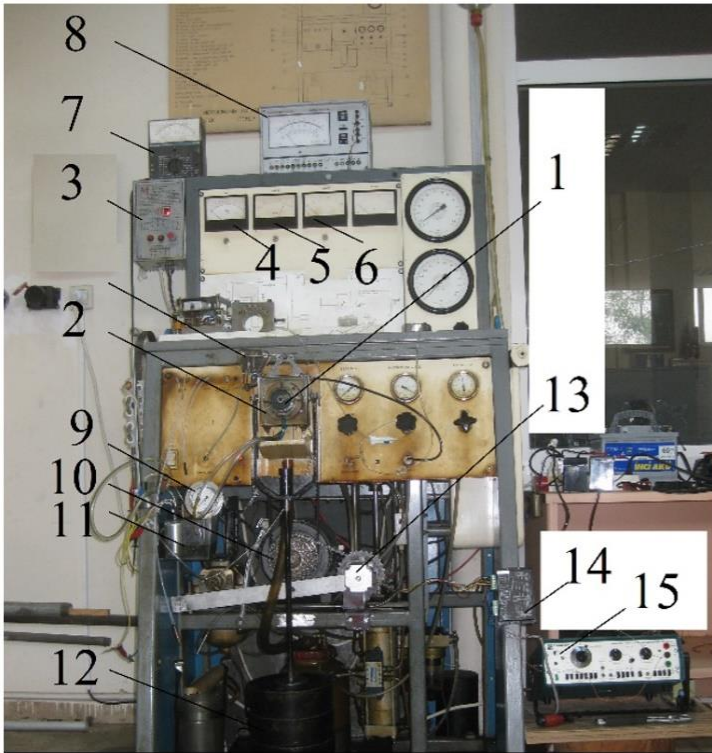
Alaşım	Kimyasal bileşim (% Ağırlık)			
	Zn	Al	Cu	Mg
ZA-27	70.8	27.2	2.01	0.02

Hidrodinamik etkili kaymalı yatak setinde kullanılan alaşımlı yatak zarfı genişliği 18 mm, maksimum çalışma basıncı 2.66 MPa değerindedir. Mil ve yatağın çapları sırasıyla 50.760 mm ve 50.850 mm olup, yatak boşluğu 45 µm’dir.

2.2. Deneysel düzeneği

2.2. The experimental setup

Deneysel düzeneğine ait görünüm Şekil 3’te verilmiştir. Düzenekte pnömatik silindirin hidrolik silindiri tahrik etmesiyle çalışan basınçlı yağlama sistemi, kaymalı yatak ve hidrolik yastığın yağ beslemesini sağlamaktadır. Yağ basınçlarını kontrol eden iki adet vana sistemde mevcuttur. Yatağın çalışma hızını 0-1100 rpm (0-2.88 m/s) aralığında kontrol edebilen DC hız kontrol ünitesi mevcuttur. Çok düşük devirlerdeki sınır sürtünme bölgesinde testlerin daha kararlı yapılabilmesini sağlamak amacıyla, tek yönlü dişli kavrama ve adım motoru (2.7 A, 30V) ve 2H504 iki fazlı step motor sürücüsü sisteme ilave edilmiştir. Step sinyalinin temini için de 0-1 kHz frekansında dalga jeneratörü sisteme dâhil edilmiştir. Moment ölçümüne ait göstergeye ilave olarak, sınır sürtünmeli çalışma bölgesinde ölçüm sınırlarının üzerinde seyreden sürtünme momenti değerlerinin okunmasını sağlayan multimetre sisteme bağlanmıştır. Düşük devirlerin hassas ölçülmesi ve okunması için sisteme devir ölçüm sistemi ilave edilerek hassas devir okuma ekranı ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, testler süresince yatakta oluşan metal-metal temasını gösteren elektronik ölçüm devresi ile göstergeden görülebilmesi mümkün olabilmektedir.



1. Mil
2. Yatak
3. DC Hız Kontrol Ünitesi
4. Devir Sayıcı
5. Moment Ekranı
6. Metal-Metal Teması Ekranı
7. Hassas Devir Ekranı
8. Hassas Moment Ekranı
9. Yatak Yağ Basınç Ekranı
10. Tek yönlü Dişli Kavrama
11. Test Yağı Haznesi
12. Yatak Yüğü
13. Adım Motoru
14. Adım Motor Kontrol Kartı
15. Dalga Jeneratörü (Hassas Hız Kontr.)

Şekil 3. Kaymalı yatak deneysel düzeneği

Figure 3. Plain bearing test setup

2.3. Sürtünme momentinin ölçümü

2.3. Measurement of friction torque

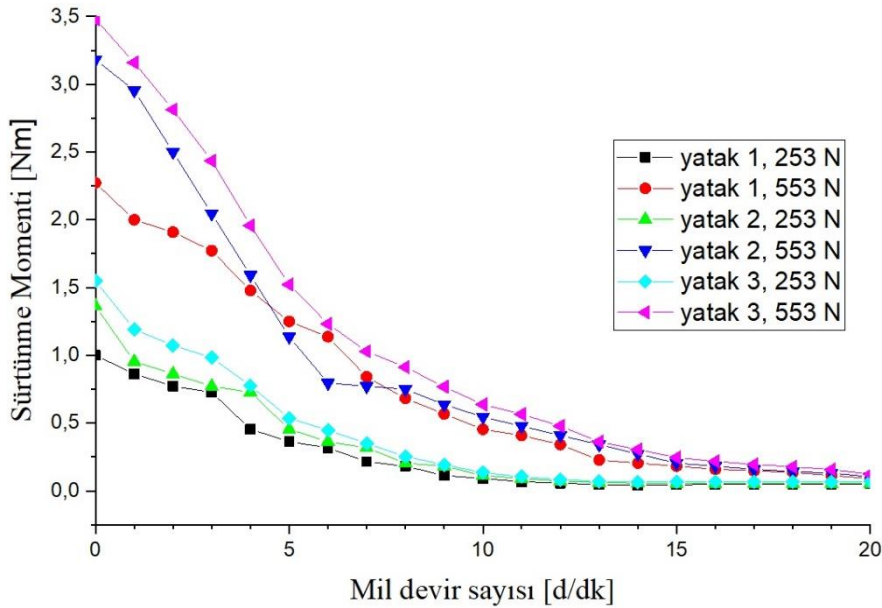
Bir kaymalı yatak sıvı film bölgesinde çalıştığında mil ile yatak arasında metal-metal teması ortadan kalkar. Sürtünme momenti yalnızca yağın viskoz kuvvetlerine bağlıdır. Yatağın yarıçapı R , genişliği L , açılma hızı ω , radyal boşluk c , kullanılan yağın viskozitesi η ile tanımlanırsa sürtünme kuvveti; $F = 2\pi RL\eta \frac{\omega R}{c}$ ve birimi [N]'dir. Sürtünme katsayısı; $\mu = \frac{Ms}{\omega R}$ şeklindedir. Sürtünme momenti ise; $Ms = FR = 2\pi R^2 L\eta \frac{\omega R}{c}$ olup, birimi [Nm]'dir. Yapılan yatak deneylerinde mil sabit olup yatak hareketlidir. Yükleme ağırlıklar vasıtasıyla yatak üzerinden yapılmaktadır. Yük, yatağın dönmesinden bağımsız kalabilmesi için yatak üzerine hidrostatik yastık yerleştirilmiştir. Böylece yük yatağa uygulanmakta, fakat milin sürtünmesiyle dönmek isteyen yatağın dönmesine engel teşkil etmemektedir. Sürtünme momenti, yataktaki serbest dönmeyi dengeleyen giriş üzerine

wheatson köprü devresi kurularak ölçülmüştür. Devre ile elde edilen sinyal değerleri kalibre edilerek sürtünme momenti ölçülmüştür. Deneyler başlamadan önce yataklar 153 N yatak yükünde ve 500 d/dk da 10 dk çalıştırılarak rodaj evresi tamamlanmıştır. Daha sonra, 253N ve 553 N yatak yüklerinde üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yatak zarfı (1, 2, ve 3 no'lu yataklar) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Hidrostatik yatak ve kaymalı yatak yağ basınçları 1.2 ve 0.1 MPa değerlerinde sınırlandırılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünün yataкта oluşan sürtünme momenti üzerindeki etkilerini belirlemek için farklı pürüz değerindeki 1 ve 2 ve 3 no'lu yataklar kullanılmıştır. Yatakların yüzey pürüzlülüklerine ait değerler Şekil 2'de her bir yatağın deneyden önce ve sonraki değerleri pürüz profilleriyle birlikte verilmiştir.

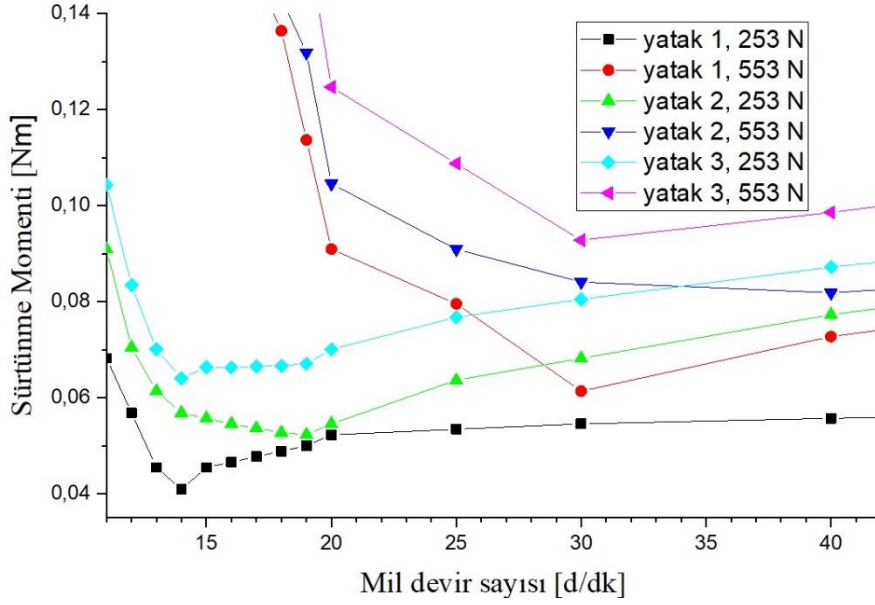


Şekil 4. Sınır sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme momenti değişimi

Figure 4. Variation of friction moment for different surface roughness and bearing load tests in the boundary friction region

Pürüz değeri en yüksek olan 3 no'lu yatak deneylerinde, pürüz değeri daha düşük olan 1 ve 2 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme momenti değerleri elde edilmiştir, Şekil 4. Benzer şekilde, 2 no'lu yatak deneylerinde de pürüz değeri düşük olan 1 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme momenti değerleri ölçülmüştür. Bu farklılıklar, sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde daha da belirgin olmaktadır. Örneğin, sınır sürtünme bölgesinde 253N ve 553N

yatak yükünde 1. 2. ve 3.ncü yatak deneylerindeki sürtünme momentinde sıra ile ortalama 1.26, 1.83 ve 1.9 Nm'lik bir artış gözlenmiştir. Artan yatak yükü ile birlikte yataкта oluşan sürtünme momenti değerlerinin daha da arttığı görülmektedir. Neticede, metal-metal teması olan çalışma koşullarında yüzey pürüzlülüğü etkisinin sürtünme momenti üzerinde baskın olduğu tespit edilmiştir. Sıvı film bölgesinde yüzey pürüzlülüğü etkisinin ise fazla olmadığı belirlenmiştir.

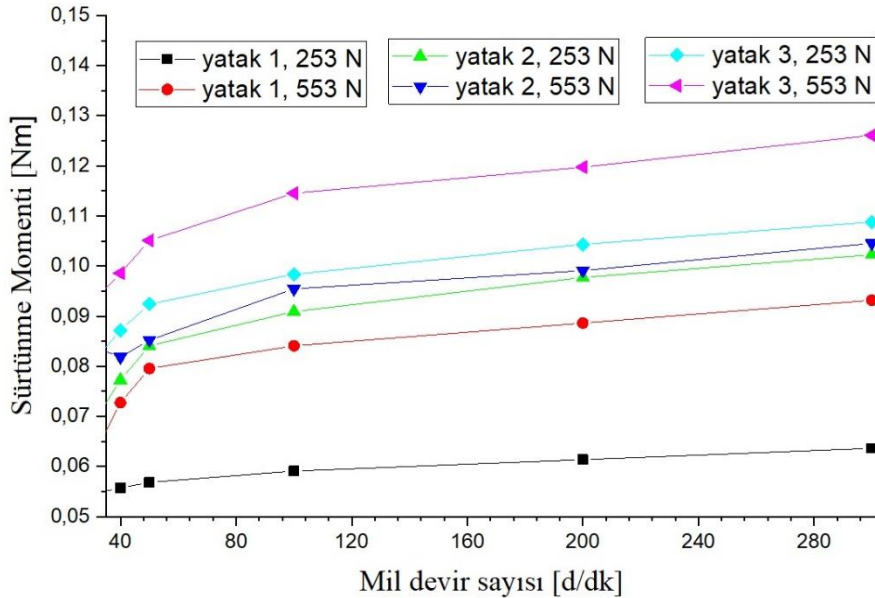


Şekil 5. Karışık sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme momenti değişimi

Figure 5. Variation of friction moment for different surface roughness and bearing load tests in the mixed friction region

253 N'lık yatak yükünde 1 ve 2 ve 3 nolu yatak testlerinde geçiş devir sayısı birbirlerine çok yakın olmakla birlikte 14-19 d/dk aralığında değişirken, 553N yatak yükünde bu fark artmakta ve yaklaşık 30-40 d/dk aralığında olduğu görülmektedir, Şekil 5. Geçiş devir sayılarında yani metal-metal temasının ortadan kalkmaya yüz tuttuğu, yağ film

teşekkülünün başladığı durumlarda yatakta oluşan moment değişimindeki bu fark, düşük yükte (253N) yaklaşık 0.022 Nm iken, büyük yükte (553N) 0.035 Nm'dir. Deneylerden görülmektedir ki farklı yüzey pürüzlü yataklarda yükün artmasıyla birlikte yatakta oluşan sürtünme momentlerindeki fark aralığı da artmaktadır.



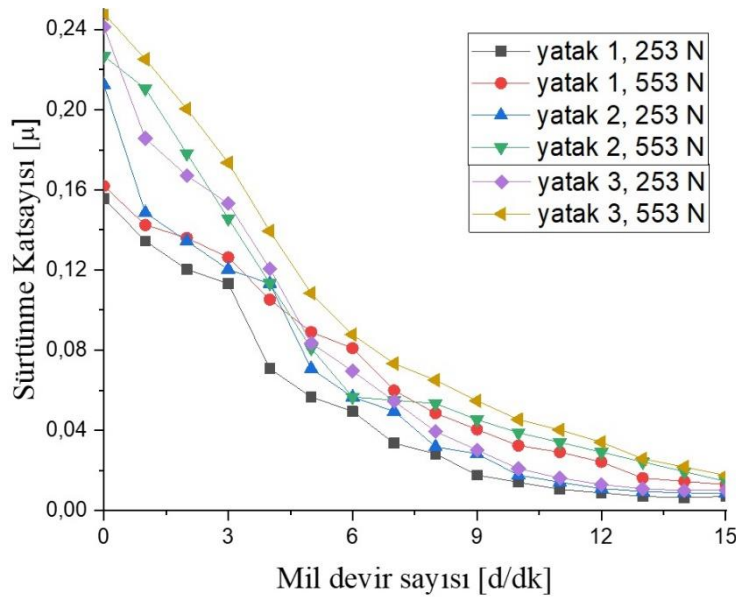
Şekil 6. Sıvı sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme momenti değişimi

Figure 6. Variation of friction moment for different surface roughness and bearing load tests in the fluid friction region

Kaymalı yataklarda ideal çalışma devri olarak geçiş devrinin üç katı civarında olduğu dikkate alındığında, yaklaşık 60 d/dk'dan sonra yağ film teşekkülünün emniyetli bir şekilde oluştuğu ifade edilebilir. Bu durumda sıvı sürtünme bölgesinden rahatlıkla söz edilebilmekle birlikte, metal-metal temasının tamamen ortadan kalktığı, yağ film teşekkülünün tam manasıyla oluştuğu hususu, mil-yatak arasında kontak olup olmadığını gösteren ölçüm devresiyle birlikte doğrulanmış ve deneylerde gözlenmiştir. Sıvı film oluşumuyla birlikte, farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yatakta oluşan moment değişimindeki değer farklılığı düşük yükte (253N) yaklaşık 0.022 Nm iken, büyük yükte (553N) 0.035 Nm olarak ölçülmüştür. Şekil 6'da görüldüğü gibi, gittikçe artan farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip 1, 2 ve 3 nolu yatak deneylerinde, yükün artmasıyla birlikte yatakta oluşan sürtünme momentlerindeki minimum ve maksimum değer farkları sırayla 0.024, 0.03 ve 0.085 Nm olarak ölçülmüştür. Buradan da görülmektedir ki, yatak deneylerinde yüzey

pürüzlülüğündeki artışın, sınır sürtünme bölgesindeki sürtünme momenti artışı üzerinde daha fazla etkili olduğu belirlenmiştir. Sıvı sürtünme bölgesindeki sürtünme momenti artış farkları ise çok az olmaktadır. Bu bölgede artan devir sayısı ile birlikte sürtünme momentinin artış göstermesi, yüzey pürüzlerinden ziyade yağ molekülleri arasındaki viskoz sürtünmeler sebebiyle meydana gelmektedir.

Kaymalı yataktaki sürtünme katsayısını belirlemek için, ilk olarak yataktaki çevresel sürtünme kuvveti değerleri ölçülmüş, daha sonra bu sürtünme kuvvetinin yatak yüküne oranı alınarak yatakta oluşan sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Farklı yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri sınır sürtünme bölgesi için Şekil 7'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün yatakta oluşan sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini belirlemek için farklı pürüz değerindeki 1 ve 2 ve 3 no'lu yataklar kullanılmıştır.

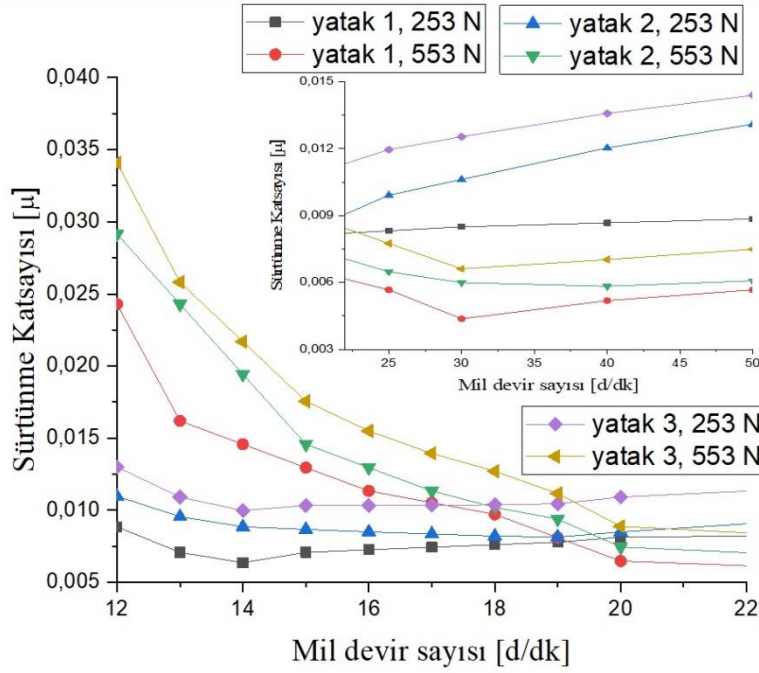


Şekil 7. Sınır sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü yatak yükü testlerinde sürtünme katsayısı ile yatak hızının değişimi

Figure 7. The variation of bearing speed and friction coefficient at different surface roughness and bearing load tests in the boundary friction region

Şekil 7'de verilen grafikte de görüldüğü gibi, pürüz değeri en yüksek olan 3 no'lu yatak deneylerinde, pürüz değeri daha düşük olan 1 ve 2 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. 2 no'lu yatak deneyleri de, pürüz değeri düşük olan 1 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri göstermiştir. Bu farklılıklar, sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde daha da belirgin olmaktadır. Örneğin, sınır sürtünme

bölgesinde 253N ve 553N yatak yükünde 1 2 ve 3 nolu yatak deneylerindeki sürtünme katsayılarında sıra ile ortalama 0.00619, 0.0143 ve 0.00651 kadar bir artış gözlenmiştir. Artan yatak yükü ile birlikte yatakta oluşan sınır sürtünme bölgesindeki sürtünme katsayısı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Netice itibarıyla metal-metal teması olan çalışma koşullarında yüzey pürüzlülüğü artışının sürtünme katsayısını da artırdığı tespit edilmiştir.

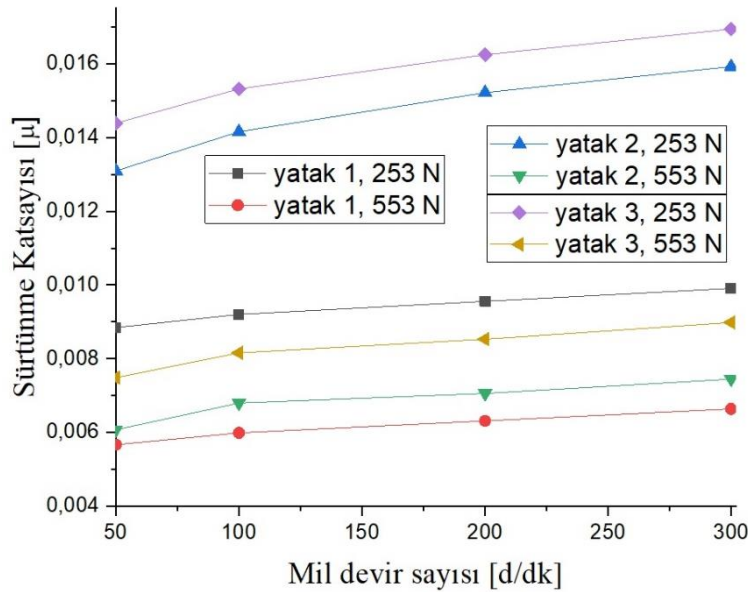


Şekil 8. Karışık sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme katsayısı ile yatak hızının değişimi

Figure 8. The variation of bearing speed and friction coefficient at different surface roughness and bearing load tests in the mixed friction region

Şekil 8'de ise, sıvı film bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü etkisinin sürtünme katsayısı üzerinde daha az etkiye sahip olduğu görülmektedir. Örneğin 253 N'luk yatak yükünde 1 ve 2 ve 3 nolu yatak testlerinde geçiş devir sayısı 14-19 d/dk aralığında değişirken, 553 N'da devir artmakta ve yaklaşık 30-40 d/dk aralığında olduğu görülmektedir, Şekil 8. Geçiş devir sayılarında yani

yağ film oluşumunun başladığı durumlarda yatakta oluşan sürtünme katsayısı değişimindeki bu fark düşük yükte (253N) yaklaşık 0.0307 değerinde iken, büyük yükte (553N) 0.00415 değerindedir. Deneylerden görülmektedir ki farklı yüzey pürüzlü yataklarda yükün artmasıyla birlikte yatakta oluşan sürtünme katsayılarındaki fark aralığı da artmaktadır.



Şekil 9. Sıvı sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme katsayısı ile yatak hızının değişimi

Figure 9. The variation of bearing speed and friction coefficient at different surface roughness and bearing load tests in the fluid friction region

Kaymalı yataklarda sıvı sürtünme bölgesinde yani metal-metal temasının tamamen ortadan kalktığı, yağ film teşekkülünün tam manasıyla oluştuğu durumda (yaklaşık 50 d/dk için) farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yataklarda oluşan sürtünme katsayısı değişimindeki fark, düşük yükte (253N) 0.015 iken, büyük yükte (553N) 0.0013 değerlerindedir. Şekil 9'daki grafikte görüldüğü gibi, yapılan deneylerden de görülmektedir ki gittikçe artan farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip olan 1, 2 ve 3 nolu yatak testlerinde, yüzey pürüzlülüğündeki artışın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi sıvı sürtünme bölgesinde az iken, karışık ve sınır sürtünme bölgesinde daha fazla olmaktadır.

Yapılan deneylerde, yatakların yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olarak, artan yatak yükü ile birlikte hidrodinamik kaymalı yatakta oluşan sürtünme momentinin de arttığı, sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmüştür. (Çakır, 2014; Koç, 2012). Azalmanın sebebi, yatak yükündeki artışın, yatakta oluşan sürtünme kuvvetine kıyasla değer olarak daha fazla olması, ya da yükün artmasıyla yüzeyler arasındaki yağ filminin incilmesi sonucu yağın iç sürtünmesinin azalmasından kaynaklanmış olabilir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Hidrodinamik etkili statik yüklü radyal kaymalı yatakta, yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkilerini belirlemek için, malzeme ve geometrik boyutları aynı olan farklı pürüzlülük değerlerindeki üç adet yatak zarfı kullanılarak, iki farklı yükte deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Artan yatak yükü ile birlikte hidrodinamik kaymalı yatakta oluşan sürtünme momentinin de arttığı, sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmüştür.
2. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça yatakta oluşan sürtünme momenti ve sürtünme katsayısı da artış göstermektedir. Bu artış miktarı, sıvı sürtünme bölgesinde az iken, sınır sürtünme bölgesinde daha fazladır.
3. Eş çalışan mil ve yatak yüzeylerindeki yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte geçiş devir sayısının da arttığı gözlenmiştir.
4. Artan geçiş devir sayısı yağ filmi oluşumunu geciktirdiğinden, yatağın her çalışma başlangıcında metal-metal temas sürecinin

artmasına, dolayısıyla yatak ömrünün azalmasına ve performansının düşmesine sebep olmaktadır.

5. Deney süresince yüzeylerin pürüzlülük değerlerinde çok az bir azalma olmuştur. Bu da yağlı ortamda çalışan yüzey çiftlerinde farklı mil ve yatak malzemesi nedeniyle adhezyon aşınmasından ziyade abrazyon aşınmasına işaret etmektedir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Yazar bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt eder.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Alford, L. P. (1911). Bearings and their lubrication. *The American Machinist*, Print book, New York.
- Baş, H. (2021a). Investigation of effects of surface roughness on performance of cam mechanisms. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(1), 67-73. <https://doi.org/10.18245/ijaet.843229>.
- Baş, H. (2021b). Investigation of effects of boron additives on performance of cam mechanisms. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(1), 60-66. <https://doi.org/10.18245/ijaet.843193>
- Baş, H., & Karabacak, Y.E. (2022). Investigation of tribological properties of TiO₂, MoS₂ and CaF₂ particles as vegetable oil additives and their effects on gearbox performance. *Journal of Bio Tribo Corrosion* 8, 66. <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00664-2>
- Baş, H. (2022). Tribological properties of MoS₂ particles as lubricant additive on the performance of statically loaded radial journal bearings. *Turkish Journal of Engineering*, 7(1), 42-48. <https://doi.org/10.31127/tuje.1016153>
- Baş, H., Özen O., & Beşirbeyoğlu M. (2022). Tribological properties of MoS₂ and CaF₂ particles as grease additives on the performance

- of block-on-ring surface contact. *Tribology International*, 168, 107433. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107433>
- Bhaskar, S.U., Manzoor H. M., & Yousuf A. M. (2013). Stability analysis on plain journal bearing with effect of surface roughness. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4, 3. <http://www.ijser.org>
- Bhuvaneshwari, R. H., Benchalli, S. S., Ramakrishna P., & Sapare N. S. (2014). The effect of couple stress and surface roughness on journal bearing using cavitation boundary conditions with respective load. *European Journal of Applied Engineering and Scientific Research*, 3(4), 22-26, <http://scholarsresearchlibrary.com/archive.html>.
- Burwell, J. T., Kaye, J., Nymegen, D. W., & Morgan, D. A. (1941). Effects of surface finish on journal bearing performance. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 8, A49–A58, <https://asmedigitalcollection.asme.org/article-pdf>
- Chong, W. W. F., & De la Cruz, M. (2014). Elastoplastic contact of rough surfaces: a line contact model for boundary regime of lubrication. *Meccanica*, 49, 1177–119, <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9861-1>
- Chong, W. F., & Hamdan S.H. (2019). Modelling transitions in regimes of lubrication for rough surface contact. *Tribology of Powertrain Systems*, 7(9), 77, <https://doi.org/10.3390/lubricants7090077>
- Cuvalci, H., & Baş, H. (2004). Investigation of the tribological properties of silicon containing zinc-aluminum based journal bearings. *Tribology International*, 37(6), 433-440, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2003.10.006>
- Çakır, E. (2014). *Demiryolları buraj makineleri agregası ünitesinde kullanılan kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Delprete, C., & Razavykia A. (2018). Piston dynamics, lubrication and tribological performance evaluation: A review: *P I Mechanical Engineering, International Journal of Research* 1-17, <https://doi.org/10.1177/1468087418787610>
- Eric W. S., & Daniel H. B. (1999). The effect of journal surface finish on journal bearing load capacity – A radiometric method, *SAE Transactions* 108, 3: Journal of Engines, 429-436, <https://www.jstor.org/stable/44743382>
- Koç E., & Yıldızlı K. (2012). Hidrodinamik radyal kaymalı yatak performans deneyi. Samsun. http://mak.muhendislik.omu.edu.tr/tr/belgeler/deneysel-foyleri/Radyal_yatak_denyi.pdf
- Lu, X. (2006). *Tribological Aspects of Journal Bearings Focusing on the Stribeck Curve* [Doctoral Dissertations, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College].
- Lu, X., Khonsary, M.M., & Gelinck, E.R.M. (2006). The stribeck curve: Experimental results and theoretical prediction. *Journal of Tribology*, 128(4), 789-794, <https://doi.org/10.1115/1.2345406>
- Mang, T. (2014). *Encyclopedia of lubricants and lubrication*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2>
- Mathias, W., & Rolf, W. (2010). The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens. *Wear*, 268(11-12), 1542-1546.
- Salman, Ö. (2011). *Yağlama yağı için bitkisel yağların ve esterlerinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Sanchez, C. J. (2011). *Tribological characterization of carbon based solid lubricants*. [M.Sc Thesis, Texas A&M University].
- Saraç, İ. (2022). Investigation of the effects of surface roughness on stress distribution and moment carrying capacity at shrink-fitted joints. *Material Science & Engineering Technology*, 53(1), 1-127 <https://doi.org/10.1002/mawe.202100136>
- Sun, J., Zhu, X., Zhang, L., Wang X., Wang, C., Wang, H., & Zhao X. (2014). Effect of surface roughness, viscosity-pressure relationship and elastic deformation on lubrication performance of misaligned journal bearings. *Industrial Lubrication and Tribology*, 66(3), 337-345. <https://doi.org/10.1108/ilt-12-2011-0110>
- Türekim-Endüstriyel Yağlar. (2022, Haziran 18). <http://www.turekim.com/shell5.html>
- Westerfield, Z., Liu, Y., Kim, D., & Tian, T. (2016). A Study of the friction of oil control rings using the floating liner engine. *SAE International Journal of Engines*, 9(3), 1807-1824, <https://doi.org/10.4271/2016-01-1048>

Farklı ısı işlemlerin takım çeliklerinin yorulma mukavemeti üzerine etkileri

The effects of different heat treatments on the fatigue strength of tool steels

Ruhi YEŞİLDAL*^{1,a}

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum

• Geliş tarihi / Received: 26.04.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 13.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 25.06.2022

Öz

İstenilen kullanım amacına bağlı olarak çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli ısı işlemler uygulanmaktadır. Bu çalışmada, bir GS 550 banyosunda H13 sıcak iş takım çeliğinin ısı işleme yorulma dayanımının değişimi araştırılmıştır. Birinci ön ısıtma, ikinci ön ısıtma, sertleştirme ve ikinci sertleştirme olmak üzere dört farklı ısı işlem uygulanarak incelenmiştir. Her numune grubu, ısı işleminden sonra oda sıcaklığında döner eğmeli yorulma testine tabi tutulmuştur. Isıl işlem görmemiş numunelerin yorulma dayanımı 470 MPa olarak belirlenmiştir. İkinci sertleştirme yapılmış temperlenmemiş numunelerin (1. Grup) yorulma mukavemeti 610 MPa'ya yükselmiştir. Sertleştirmeden sonra ikinci bir ısı işlem olarak 550°C'de iki saat tavlama olan üçüncü ısı işlemin uygulanmasıyla numunelerin (3. Grup) yorulma dayanımı 720 MPa olarak bulunmuştur. Dördüncü ısı işleme tabi tutulmuş ve sertleştirmeyi takiben 550°C'de iki saat ve ardından 635°C'de iki saat temperlenmiş numunelerin (4. Grup) yorulma mukavemeti 710 MPa olarak belirlenmiştir. Uygulanan tüm ısı işlemlerin H13 sıcak iş takım çeliğinin yorulma mukavemetini olumlu etkilediği gözlemlenmiştir. Tüm ısı işlemler artan yorulma mukavemeti ile sonuçlanırken, en yüksek yorulma mukavemeti, ilk ön ısıtma ve su verme işleminden sonra çift tavlama ısı işlemi (550 °C ve 610 °C iki saat) ile elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: H13 sıcak iş takım çeliği, Isıl işlem, Yorulma

Abstract

Various heat treatments are applied to improve the mechanical properties of steels depending on the intended use. In this study, the variation of fatigue strength of H13 hot work tool steel with heat treatment in a GS 550 bath was investigated. It was investigated by applying four different heat treatments as first preheating, second preheating, hardening and second hardening. Each batch of samples was subjected to rotating bending fatigue test at room temperature after heat treatment. The fatigue strength of the untreated samples was determined as 470 MPa. The fatigue strength of the second hardened untempered samples (Group 1) increased to 610 MPa. The fatigue strength of the samples (Group 2), which were annealed for two hours at 550°C as a second heat treatment after hardening, was measured as 630 MPa. The fatigue strength of the samples (Group 3) was found to be 720 MPa by applying the third heat treatment, which was annealing at 550°C for two hours and at 610°C for two hours. The fatigue strength of the samples (Group 4), which were subjected to the fourth heat treatment and tempered for two hours at 550°C and then at 635°C for two hours after hardening, was determined as 710 MPa. It has been observed that all applied heat treatments positively affect the fatigue strength of H13 hot work tool steel. While all heat treatments resulted in increased fatigue strength, the highest fatigue strength was obtained with double annealing heat treatment (550 °C and 610 °C two hours) after initial preheating and quenching.

Keywords: H13 hot-work tool steel, Heat treatment, Fatigue

*a Ruhi YEŞİLDAL; ryesisil@atauni.edu.tr, Tel: (0506) 515 91 31, orcid.org/ 0000-0001-7677-1600

1. Giriş

1. Introduction

Kritik çekme ve akma gerilmelerinin çok altındaki gerilmelerde bile, makine parçaları alternatif gerilme altında kırılabilir. Bu durum, aşınma, yırtılma ve plastik deformasyon gibi diğer mekanizmalarla birleşerek makine parçalarının hizmet ömrünü azaltır (Barraua vd., 2003). Alaşımli çelik ve sıcak metal şekillendirme durumunda tipik bir bileşen olan kalıplar, hem hassasiyet hem de güvenilirlik açısından büyük önem taşıyan kritik bir bileşendir. Kalıplar, aşındırıcı ortamlarda mekanik yüklem altında hizmet vermelerinin yanı sıra, oldukça değişken sıcaklık değişimlerine bunun sonucunda mekanik ve termal yorulmaya maruz kalırlar (Wizer vd., 2014). Bu nedenle kalıplar genellikle, mukavemetlerini artırmak, böylece hizmet ömrünü uzatmak, verimliliği artırmak ve maliyetleri azaltmak için sıcak iş çeliğinden imal edilirler (Perssona vd., 2004).

Sıcak iş takım çeliğinin yorulması, tipik olarak, alternatif gerilme altındaki sığ yüzey çatlaklarından başlar (Sun vd., 2004; Akata, vd. 2004). Sıcak iş çeliklerinin yorulması üzerine yapılan araştırmalar, çatlak yayılmasını sınırlayarak veya geciktirerek çalışma ömrünü uzatmaya odaklanmıştır. Sıcak iş çeliğinin mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik araştırmalar kapsamında, farklı sıcak iş çeliği malzemelerini farklı servis sıcaklıkları, karmaşık geometriler ve yüzey iyileştirme araçları, su verme ve temperleme gibi ısıl işlem aşamaları altında değerlendiren çok sayıda çalışma yapılmıştır (Sun vd., 2004; Akata, vd. 2004; Fares, vd. 2012; Çöl & Koç, 2015; İynen, vd. 2021; Özdemir & Dilipak, 2021).

Özellikle sıcak iş prosesi için, termal yorgunluğa karşı direnci geliştirmek için istenen özellikler arasında, yeterli süneklik ve tokluk, yüksek sürünme mukavemeti ve boyutsal kararlılık, düşük

termal genleşme katsayısı, yüksek termal iletkenlik, yüksek sıcaklık akma mukavemeti, iyi temperleme ve şok direnci özellikleri sayılabilir (Fares vd., 2012), Bununla birlikte, her sıcak iş süreci belirli özellikler gerektirebilir ve farklı malzemelere ve/veya farklı ısıl işlemlere ihtiyaç duyulabilir veya farklı işlemler için uygun olabilir. Örneğin, dört farklı sıcaklık altında östenitlenen ve ardından temperlenen martensitik krom sıcak iş çeliğinde termal yorulma çatlak büyümesi, östenitleme sıcaklığı ve servis sıcaklığından güçlü bir şekilde etkilenmiştir. Çeliklerin karmaşık yüklem koşulları altındaki davranışını değerlendirdikten sonra (Valey vd., 2006), mikroyapının ve kırılma direncinin östenitleme ve tavlama işlemlerinden etkilendiği bildirilmiştir (Souki vd., 2004). Östenitleme sıcaklığının yorulma direnci üzerinde önemli bir etkisi olmamasına rağmen, temperleme sıcaklığı kırılma tokluğunu ve çatlak yayılmasını önemli ölçüde etkiler. Bu bağlamda, bu çalışma, östenitlemeyi takiben farklı sıralı ısıl işlemlerin oda sıcaklığında hizmet veren H13 çeliğinin yorulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

AISI H13 tipi çelikler tipik olarak hafif metal sıkıştırma kalıplarında ve ekstrüzyon preslerinde, nitrasyondan sonra kalıp, silindir, besleyici, matris, zimba ve ceket olarak kullanılır. Yüksek tokluğa ve çatlak oluşumuna karşı yüksek dirence sahiptir ve ayrıca yüksek sıcaklıklarda termal iletkenliğini, sertliğini ve aşınma direncini önemli oranda korur. Bununla birlikte, sertleştirme özelliklerini bir dereceye kadar etkileyebilir. Bu çalışmada, nominal kimyasal bileşime sahip (Tablo 1) AISI H13 çeliğinden ASTM-E 466 numuneleri kum saati geometrisinde 9.35mm ana çap ve 6.35mm boyun çapında hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır.

Tablo 1. H13 çeliğin kimyasal bileşimi (% Ağırlık)

Table 1. Chemical composition of H13 grade steel (W%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	F	S	Al	Co	Cu	Ti	W
Ağırlık(%)	0.47	0.87	0.35	5.22	1.37	0.25	0.85	0.01	0.001	0.02	0.03	0.09	0.005	0.07

Molibden ve krom karbür içeriği, 1010 °C'de bir saatlik östenitlemeden sonra ayrışır, buna karşın vanadyum karbürler (VC) çözülmeden kalır. 550-635 °C'de çift tavlama, kalan osteniti tavlama martensite dönüştürebilir, ilk tavlama artık osteniti martensite dönüştürür ve ikinci tavlama bu yeni martensiti temperlenmiş martensite dönüştürür. H13, nispeten düşük alaşımli, ferrit te dağılmış

alaşımli karbürleri (Mo₆C, Cr₂C₃, VC) %3,5 oranında içerir (Smith vd., 1993).

Bu çalışmada 5 adet işlem parametresi belirlenmiş, her bir işlem şartı için 50 adet ve toplamda 250 adet numune hazırlanmıştır. 1020 °C sıcaklıkta ön ısıtma malzeme deformasyonunu nispeten önlemiştir. H13'ün maksimum tokluğuna ulaşmak için bir GS-550 banyosunda 550'de sertleştirme

işlemi yapılmıştır (Lin vd., 2016). Tokluğu sağlamak için sertleştirmeyi takiben yapılan 3. Tavlama, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplarında yaygın olarak kullanılan bu özelliği sağlamıştır. 4. sırada 635 °C'de üçüncü tavlama yapılmıştır.

Oksit tabakası gibi kalıntıları gidermek için zımparalama (sırasıyla 200, 400, 800 ve 1200 tane büyüklükleri ile) ve çuha üzerine aşındırıcı toz (1 µm) ile polisaj yüzey işlemleri uygulanmıştır. R. R. Moore marka döner eğmeli yorulma test makinesi ile istenilen gerilme değerlerine göre yükleme Denklem 1'deki hesaplamalara göre yapılmıştır (Bannantine vd., 1990).

$$\bar{\sigma} = 16.W.L / \pi.D^3 \quad (1)$$

$\bar{\sigma}$: Minimum kesitte numunenin en dış yüzeyindeki gerilme değeri, W: Uygulanan toplam yük, L: Moment kolu ve D: En küçük çap.

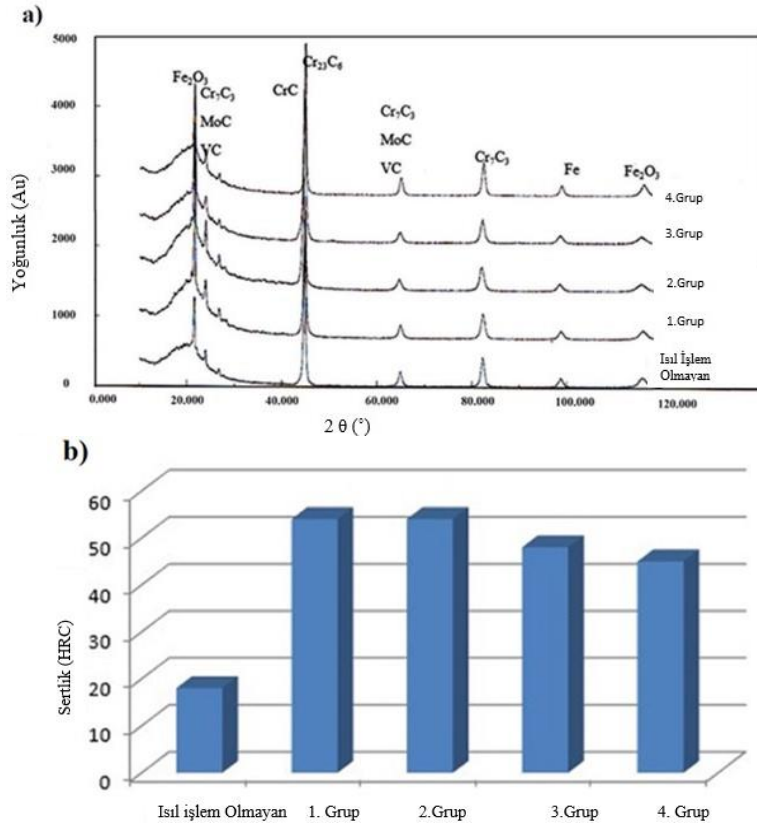
L sabit tutulduğundan, bu denklem belirli bir çap ve gerilim gereksinimi için yalnızca bir W değeri verir.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

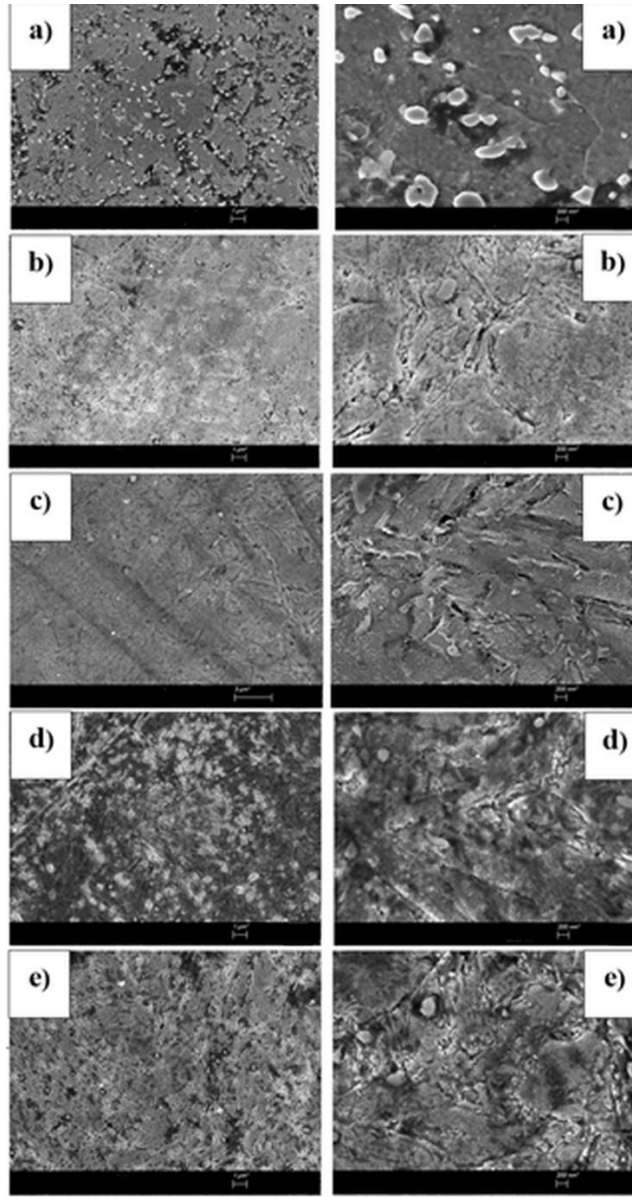
Uygulanan tüm ısıl işlemlerin yorulma mukavemetinde belirgin bir artışa neden olduğu

görülmektedir. Fakat bu artış birinci ve ikinci ısıl işlemler ile üçüncü ve dördüncü ısıl işlemlerin kendi aralarında yaklaşık aynı kalmıştır. Fakat çift temperlemenin yorulma mukavemetinin maksimum değere ulaşmasını sağladığı da açıkça ortaya çıkmıştır. Birinci temperleme sonucu oluşan artık östenitin ikinci temperleme ile temperlenmiş martenzite dönüşmesi yorulma mukavemetinin maksimum değere ulaşmasında önemli rol oynamıştır. Ayrıca ısıl işlemler sonucunda daha homojen ve ince taneli bir iç yapının oluşması yorulma mukavemetini artıran bir diğer etken olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Isıtma işleminde, karbür şeklindeki alaşım elementleri yavaş yavaş östenitik kafese entegre olur (Roux vd., 2013). Literatürden bilindiği gibi ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla alaşım elementlerinin entegrasyonu artmıştır (Souki vd., 2011). Şekil 1 ve 2'de görüldüğü gibi alaşım elementleri martensit yapının sertliğini artırmıştır. Martensitik dönüşüm difüzyonsuz olduğundan, karbon ve alaşım elementleri martensit kafesinde kalır ve sertliği artırır. Şekil 1b'de görüldüğü gibi yapıda CrC ve MoC'nin bulunması özellikle 1. Grup ve 2. Grup'un sertliğini artırmıştır. Şekil 2a, H13'ün orijinal mikro yapısını, 8-10 µm tane boyutuna sahip ferrit içindeki karbürleri ve ayrıca perlit tanelerini göstermektedir.



Şekil 1. Malzeme analizi, a) XRD analizi, b) malzemelerin sertlik analizi

Figure 1. Material analysis, a) XRD analysis, b) the hardness analysis of the materials



Şekil 2. Numunelerin mikroyapısı, a) Isıl işlem yok, b) 1. Isı işlem sırası, c) 2. Isı işlem sırası, d) 3. Isı işlem sırası, e) 4. Isı işlem sırası

Figure 2. Microstructure of specimen set, a) No heat treatment, b) 1st heat treatment sequence, c) 2nd heat treatment sequence, d) 3rd heat treatment sequence, e) 4th heat treatment seq

Şekil 2b, 1. ısıl işlem dizisi olan su vermenin, martenzit yapı ve östenit taneciklerinin küçük ve tek biçimli olmasıyla tane sınırlarının kaybolmasına ve boyutlarının %50 oranında azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Sertleştirmeden sonra çift tavlamanın, H13 ün yorulma mukavemetini 720 MPa'ya yükselttiği rapor edilmiştir (Smith vd., 1993). Bu çalışmadaki en yüksek değer budur ve kalıntı östenitin uygun sıcaklıkta çift temperleme ile temperlenmiş martensite dönüştürüldüğü maksimum yorulma mukavemeti ile açıklanmaktadır (Guanghua vd., 2010). Ayrıca, çift tavlama ile daha kararlı karbür oluşumu, malzemenin mekanik özelliklerini ve dolayısıyla yorulma mukavemetinin değişimini

açıklayabilir. Mo_6C , Cr_2C_3 , VC, önceki çalışmalarla tutarlı karbürler (Kumar vd., 2015). 2. sıra numuneleri ile 1. sıra numuneleri karşılaştırıldığında, taneler daha büyük, daha görünür ve daha net bir şekilde martenzitiktir. M_6C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 ve MC ferrit karbürleri gösteren Şekil 2c'de kalınlaşmış tane sınırlarındaki bir ağ görülmektedir. M_6C esas olarak Fe, Cr ve Mo alaşımlarının karbürleridir, $M_{23}C_6$ ve M_7C_3 esas olarak Fe ve Cr ve MC, V ve Mo'dur. VC baskındır (Sjöström vd., 2004). XRD analizinin sonuçları bu bulguyla uyumludur (Smith vd., 1993).

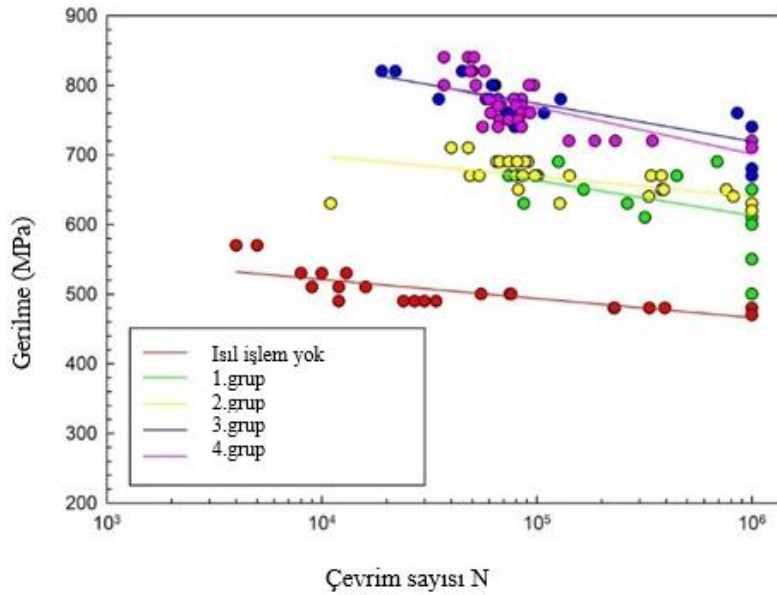
Karbürlerin çoğu, östenitleme sırasında katı çözelti içinde çözülmüştür (Şekil 2d). Mikro yapı, yoğun karbürlerin (östenitleme sırasında çözünmeyen

karbürlerin) dağılımında, ince karbürlerin dağılımıyla (tavlama sırasında çözünmeyi önler) birlikte temperlenmiş martenziti ortaya çıkarır. Kaba karbür parçacıklarının Şekil 1b'de M_7C_3 (örneğin, CrC) olması beklenir. Kaba karbürler, östenit tane büyümesini engelleyerek yüksek aşınma direncine neden olur. Ayrıca, bu karbür parçacıklarının şekli ve dağılımı, anizotropik mekanik özelliklere neden olur. İri karbür parçacıkları arasında M_6C , $M_{23}C_6$ ve M_7C_3 tipi karbürler bulunur. MC tipi karbürler (VC) daha dirençli oldukları ve sertleştikten sonra iç yapıyı sağladıkları için çözünmezler. Kalıntı östenit, martensit ve alaşımli karbürden oluşur (Shi vd., 2017).

Şekil 2e, 3. ve 4. dizi numunelerinin benzer mikro yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 2. sıra numuneleriyle karşılaştırıldığında, tane sınırları daha az belirgindir ve ince taneli bir yapı oluşmuştur. Kürlendikten sonra M_7C_3 (Cr_7C_3) 550 °C'de çözünür ve ikincil bir sertleşme etkisi

gösterir. Dolayısıyla karbon oranındaki azalmaya rağmen sertlikte azalma olmamıştır. Kalıntı östenit, martensite dönüşmüştür. Martensit düzlemsel değil lineerdir ve karbürlerin ayrışmasından kaynaklanan azaltılmış karbon içeriği nedeniyle oluşur (Shi vd., 2017).

Deneylerde uygulanan maksimum gerilime, literatüre ve buna göre oluşturulan Woehler eğrilerine göre çekme geriliminin %70'i kadardır. Sonsuz ömür değerleri, eğri azalmasının başlangıcından 10^6 çevrime ulaşılan kadar küçük artışlarla uygulanan gerilimler artırılarak belirlendi. Woehler eğrileri, uygulanan ısıl işlemlerin H13'ün yorulma mukavemeti üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Isıl işlemlerin yorulma mukavemeti üzerindeki etkilerini anlamak ve ısıl işlem görmemiş numunelerle karşılaştırmak için bulunan 470 MPa' değeri ısıl işlem sonucu oluşan değerlerle test edildi (Şekil 3).



Şekil 3. Numunelerinin Woehler eğrileri

Figure 3. Woehler curves of all specimen sets

2., 3. ve 4. gruplara göre ısıl işlem görmüş numunelerin yorulma mukavemeti sırasıyla 630, 720 ve 710 MPa olmuştur. Woehler eğrileri, H13'ün yorulma mukavemetinin ısıl işlemlerle arttığını, ancak özellikle sıra 1. Grup ile 2. Grup arasında veya 3. Grup ile 4. Grup arasında Cr, Mo ve V karbürlerin daha iyi difüzyonu nedeniyle ısıl işlemlerle çeliğin mekanik özelliklerinin arttığını göstermiştir.

550 °C'de iki saat (2. Grup) temperlenen numuneler, sertleştirilmemiş numunelere (1. Grup) yakın olan 630 MPa'lık bir yorulma mukavemetine sahiptir. Burada temperleme, yorulma mukavemetinde çok az iyileşmeye yol (20 MPa)

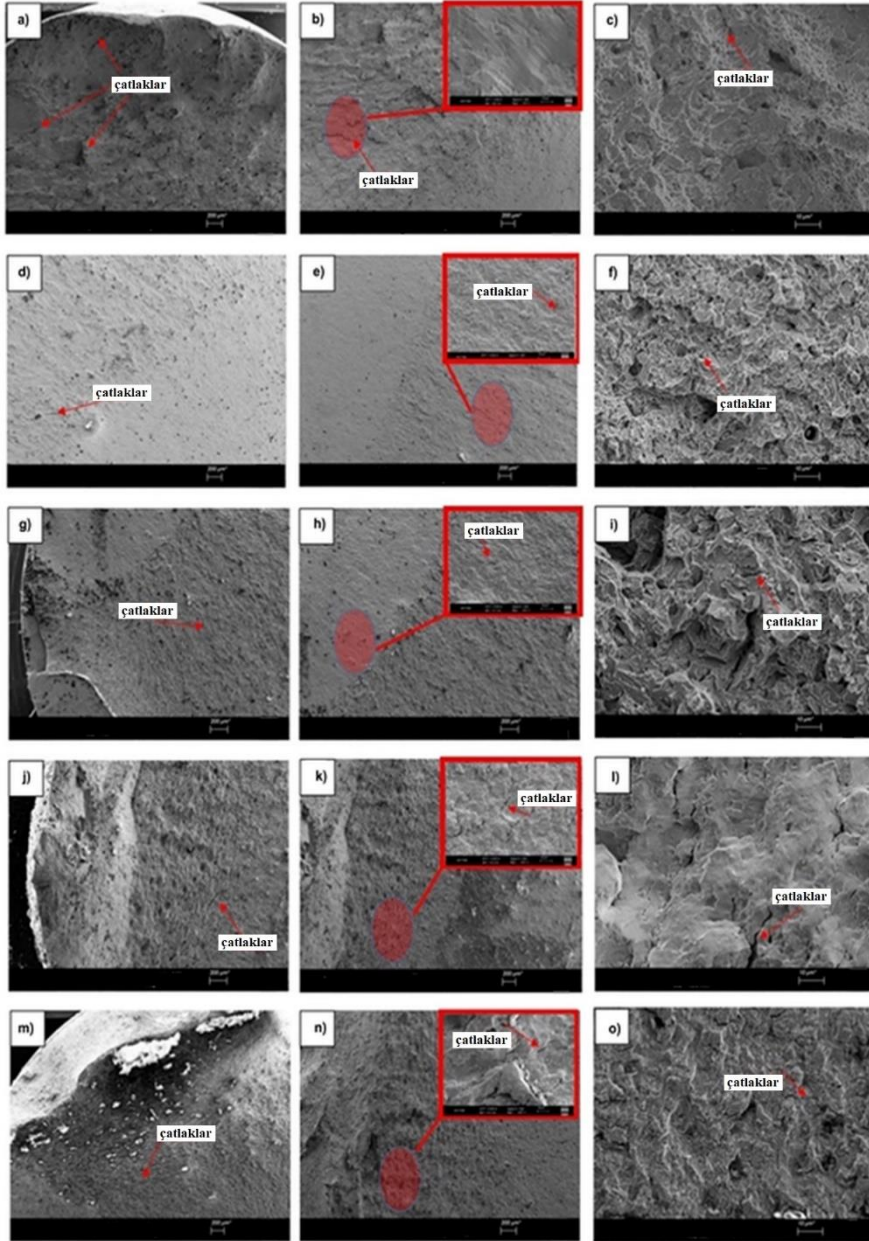
açmıştır. Sertleştirmeyi takiben tek bir tavlama işleminin yorulma mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Bununla birlikte, tüm gruplar için 550 °C'de iki saatlik ve 610 °C'de iki saatlik ikinci bir tavlama işlemi ile maksimum yorulma mukavemeti (720 MPa) ile en iyi değere ulaşmıştır (Tablo 2). Bu çeliğin uygun sıcaklıklarda çift tavlama, artık östenitin martensite dönüşmesini sağlar (Smith vd., 1993). İkinci tavlama, yeni oluşturulan karbürler, malzemeye geliştirilmiş mekanik özellikler ve dolayısıyla daha iyi yorulma mukavemeti vererek daha kararlı hale gelir (Lin vd., 2016).

Tablo 2. Woehler eğrisi Yorulma deney sonuçları**Table 2.** Woehler curve fatigue test results

Numune	Isıl işlem Görmemiş	1. Grup	2. Grup	3. Grup	4. Grup
Yorulma Limiti (MPa)	470	610	630	720	710
Cevrim sayısı (N)	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶

Yorulma deneyleri (n=50), Şekil 3'te verilmiştir. Isıl işlem görmemiş numunelerin en düşük limitte ve çift temperli numunelerin en yüksek olduğu durumlarda, her bir ısıl işlem dizisi, bir miktar yorulma mukavemeti iyileştirmesi sağlamıştır.

(Şekil 3). Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi mikroyapısal özelliklere bağlıdır ve makroyapısal durumda belirleyici bir rol oynar, bu da ısıl işlemin mikro yapı üzerindeki etkisini açıklayarak yorulma direncinin artmasını sağlar (Şekil 4).



Şekil 4. Numune kırılma yüzeyi fotoğrafları; a, b, c ısıl işlem yapılmamış, d, e, f 1. Isıl işlem, g, h, i, 2. Isıl işlem j, k, l 3. Isıl işlem, m, n, o 4. Isıl işlem yapılmış numuneler.

Figure 4. Breaking point surface images of specimens a, b, c) no heat treatment specimens, d, e, f) 1st heat treatment sequence specimens, g, h, i) 2nd heat treatment sequence specimens, j, k, l) 3rd heat treatment sequence specimens, m, n, o) 4th heat treatment sequence specimens, macro, mezzo, micro respectively.

Kırılmalar, (Şekil 4-a, b ve c) tane sınırlarında yer alan karbürlerin tane sınırlarının çatlaması ile oluşmuş, taneler arası kırılma tipinde çatlaklara neden olmuştur. Şekil 4- (d ve e), daha parlak yorulma bölgesinden kırılma bölgesine geçişi gösteren dairesel bir yayı göstermektedir. Kırık tane sınırları boyunca ilerlemiş, karbür parçacıkları tarafından zayıflatılmış ve taneler arası kırılmaya neden olmuştur (Şekil 4-e ve f). Kırılma alanı, kırılma sırasındaki plastik deformasyonun neden olduğu daha mattır. Karbür tanecikleri tane sınırlarında yer alarak taneler arası kırılmaya ve en zayıf düzlemleri takip ederek ilerlemeye neden olmuştur (Şekil 4-g, h, ve i). Kırılan taneler arasında ilerleyen ve tane sınırındaki karbürler nedeniyle taneler arası kırılmalara yol açan hasar meydana geldiğinde plastik deformasyonu gösteren kırılma yüzeyinde oluşan kesme bölgesini göstermektedir. Ancak kayma bölgesinin I grubundan (1. ısıl işlem dizisi) daha geniş olması sünekliğin arttığını gösterir (Şekil 4-j, k ve l). Şekil 4-(m, n ve o), yorulma bölgesinden ayırt edilen kırılma bölgesi ile taneler arası kırılma tipini göstermektedir.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Alaşım elementlerinin varlığının, su verme sıcaklığı ile H13'ün sertliğini arttırdığı gözlenmiştir. Uygulanan tüm ısıl işlemler malzemenin yorulma mukavemetini iyileştirmiştir. Sertleştirmeden sonra iki saat boyunca 550 °C'de tek bir tavlama, tek başına sertleşmeye göre yorulma mukavemetini beklenen ölçüde iyileştirmemiştir. İkinci tavlama sıcaklığının 610 °C'den 635 °C'ye yükseltilmesi yorulma mukavemetini etkilememiştir. Maksimum yorulma mukavemeti, ilk ön ısıtma ve su verme işleminden sonra çift tavlama ısıl işlemi (birinci tavlama 550 °C'de iki saat ve ikinci tavlama 610 °C'de iki saat) uygulanarak elde edilmiştir. Tüm gruplarda kırık tipi ve yayılma paterni intergranüler idi. Yükleme frekansı değişmediği ve fazlar yük tekrarına tabi tutulmadığı için kırılma yüzeylerinde yorulma çizgileri görülmemiştir. Maksimum yorulma mukavemetinin elde edildiği 3.Grubun kırılma yüzeyinde, tek bir çatlak cephesi oluşturmak için bir araya gelen birçok çatlaktan oluşan basamak çizgileri görülmüştür. Yorulma çatlaklarının ilerlemesinden kaynaklanan alan makroskopik olarak düz ve daha parlaktır.

Stabil bir iç yapının meydana gelmesi malzemenin mukavemetini ve dolayısıyla mikro ölçekte özelliklerini birinci derecede etkileyecektir. Isıl işlemler vasıtasıyla alaşım karbürlerinin homojen

dağılması ve tane boyutunun küçülmesi akma mukavemetinin artmasına neden olacaktır. Plastik deformasyon kayma sonucu meydana gelen şekil değişimidir. Plastik deformasyonun artması dislokasyon yoğunluğunu ve bunların noktasal hatalar ve ikincil fazlarla etkileşimini artıracaktır. Tanelerin küçük olması dislokasyonların daha fazla tane sınırı ile etkileşmelerini gerektirecek bu da dislokasyon hareketini zorlaştıracaktır.

Yapılan ısıl işlemlerin hepsi malzemenin yorulma mukavemetini iyileştirmiştir. H13 sıcak iş takım çeliği için en iyi yorulma mukavemetinin sertleştirmeyi takiben 550°C'de birinci menevişleme ve 610°C'de ikinci menevişleme ile 3. Grupta elde edilmiştir. Karbür yapının içinde vanadyum, krom ve molibden tespit edilmiştir. En düşük yorulma mukavemet değeri ikinci sertleştirme yapılmış ve temperlenmemiş 1. Grup numunelerinde elde edilmiştir.

Yazar katkısı

Author contribution

Çalışmada bir başka yazarın katkısı yoktur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

Akata E., Altınbalık T., & Can Y. (2004). Three point application in single tooth bending fatigue test for evaluation of gear blank manufacturing method. *International Journal of Fatigue*, 26, 785–789. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.11.003>

- Bannantine J. A., Comer J. J., & Handrock J. L. (1990). *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis* (1st Ed.), Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Barraua O., Bohera C., Grasb R., & Rezai-Aria F. (2003). Analysis of the friction and wear behavior of hot work tool steel for forging. *Wear*, 255, 1444–1454. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00280-1)
- Çöl M., & Koç F. G. (2015). Effect of homogenization heat treatment on toughness and wear resistance of plastic mold steel. *Materials Testing*, 57(11-12), 942–946. <https://doi.org/10.3139/120.110807>
- Fares M. L., Moussa A., Khelfaoui Y., & Khetache A. (2012). An investigation into the effects of conventional heat treatments on mechanical characteristics of new hot working tool steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 28, 012–042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/28/1/012042>
- Guanghua Y., Xinmin H., Yanqing W., & Xingguo Q. (2010). Effects of heat treatment on mechanical properties of H13 steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 52(7–8), 393 – 395. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9288-4>
- İynen O., Ekşi A. K., Özdemir M., & Akyıldız H. K. (2021). Experimental and numerical investigation of cutting forces during turning of cylindrical AISI 4340 steel specimens. *Materials Testing*, 63(5), 402–410. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0069>
- Kumar R., Behera R. K., & Sen S. (2015). Effect of Tempering temperature and time on strength and hardness of ductile cast iron. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 75 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/75/1/012015>
- Lin M., Zhao X., Han L., Liu Q., & Gu J. (2016). Microstructural evolution and carbide precipitation in a heat-treated H13 hot work mold steel. *Metallography Microstructure and Analysis*, 5, 520–527. <https://doi.org/10.1007/s13632-016-0318-5>
- Özdemir M., & Dilipak H. (2020). Numerically modeling spring back and spring go amounts and bending deformations of Cr-Mo alloyed sheet. *Materials Testing*, 62(12), 1265–1272. <https://doi.org/10.3139/120.111613>
- Persson A., Hogmark S., & Bergström J. (2004). Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels, *International Journal of Fatigue*, 26, 1095–1107. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.03.005>
- Roux S. L., Medjedoub F., Dour G., & Rézaï-Aria F. (2013). Role of heat-flux density and mechanical loading on the microscopic heat-checking of high temperature tool steels under thermal fatigue experiments. *International Journal of Fatigue*, 51, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.02.004>
- Shi Y.J., Wu X.-C., Li J.-W., & Min N. (2017). Tempering stability of Fe-Cr-Mo-W-V hot forging die steels. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 24(10), 1145–1157. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1505-3>
- Sjöström J., & Bergström J. (2004). Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments. *Journal of Material Processing Technology*, 153, 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.158>
- Smith W. F. (1993). *Structure and Properties of Engineering Alloys* (2nd Ed.), McGraw-Hill Science/Engineering/Math, New York, USA.
- Souki I., Delagnes D., & Lours P. (2011). Influence of heat treatment on the fracture toughness and crack propagation in 5% Cr martensitic steel. *Procedia Engineering*, 10, 631–637. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.105>
- Sun Y., Hanaki S., Yamashita M., Uchida H., & Tsujii H. (2004). Fatigue behavior and fractography of laser-processed hot work tool steel. *Vacuum*, 73, 655–660. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2003.12.161>
- Wilzer J., Kuepferle J., Weber S., & Theisen W. (2014). Influence of alloying elements, heat treatment, and temperature on the thermal conductivity of heat treatable steels. *Steel Research International*, 86, 1234–1241. <https://doi.org/10.1002/srin.201400294>
- Velay V., Bernhart G., & Penazzi L. (2006). Cyclic behavior modeling of a tempered martensitic hot work tool steel. *International Journal of Plasticity*, 22, 459–496. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.03.007>

Aras Vadisi'nde yetişen yerel şeftali genotiplerinde (*Prunus persica*L.) varyasyonun değerlendirilmesi

Evaluation of variation local peach (Prunus persica L.) genotypes grown in Aras Valley

Kezban ALTAY^{1,a}, Mücahit PEHLUVAN^{*2,b}, Rafet ASLANTAŞ^{3,c}

¹Silivri İlçe Gıda Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü, 34594, İstanbul

²Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Suveren, 76000, Iğdır

³Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 26160, Eskişehir

• Geliş tarihi / Received: 22.03.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 31.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 25.06.2022

Öz

Bu çalışma Aras Vadisinde Zeferan ve Ağşeftali yerel isimleri ile bilinen iki şeftali popülasyonu içerisinde daha önce seçilmiş 38 genotip ve iki standart çeşide ait meyvelerin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini içeren toplamda 13 kantitatif karakter bakımından genotipler arasındaki farklılık, benzerlik ve varyasyonun belirlenmesi amacı ile yürütülmüştür. Bunun için temel bileşenler (PCA) ve kümeleme analizi kullanılmıştır. PCA sonucunda ilk dört faktör genotipler arasında toplam varyasyonun % 79.89'nu oluşturmuştur. Kümeleme analizinde ise şeftali genotiplerinin 5 grupta sınıflandığı saptanmıştır. Bölgede meyve özellikleri bakımından şeftali genetik kaynaklarının değerlendirildiği bu çalışma ile meyve ıslahçıları için önemli bilgiler üretildiği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Aras Vadisi, Çok değişkenli analizler, Şeftali genetik kaynağı

Abstract

This study was carried out with the aim of determining the differences, similarities and variations in terms of some physical and chemical properties including 13 quantitative characters between 38 peach genotypes pre-selected from two native peach populations called as "Zeferan" and "Ağşeftali" and two standard cultivars in Aras Valley. Principal component (PCA) and cluster analysis were performed for this purpose. PCA showed the first four principal component made up 79.89% of total multivariate variation between genotypes. Cluster analysis illustrated genotypes divided into 5 groups. It is considered that this work evaluating the peach population in point of some fruit traits in the region, has produced important information for fruit breeders.

Keywords: Aras Valley, Multivariate analysis, Peach germplasm

^{*b} Mücahit PEHLUVAN; mpehluvan@gmail.com Tel: (0476) 2230048-4069, orcid.org/0000-0002-9092-202X

^a orcid.org/0000-0002-2085-5917

^c orcid.org/0000-0002-1368-5673

1. Giriş

1. Introduction

Milattan önce yaklaşık olarak 2000'li yıllarda şeftali (*Prunus persica* L.) yetiştiriciliği yapılmaya başlanmıştır (Jules, 2007). Şeftali ıslah endüstrisi, ılıman iklim meyve türleri arasında her yıl piyasaya yeni çeşitler sunan çok dinamik bir yapıya sahiptir. Bunun nedenleri arasında gençlik kısırılık periyodunun kısa olması (2-3 yıl), kontrollü melezlerin kolay elde edilmesi ve yüksek derecede kendine uyuşur bir tür olması sayılabilir. 1991-2001 yılları arasında yaklaşık 1000 yeni şeftali çeşidi piyasaya sürülmüştür. Elde edilen yeni çeşitlerin % 43-61'i kontrollü melezlemeler ile, % 15-21'i açık tozlanma ile, % 4-5'i tomurcuk mutasyonları ile ve % 15-30'u ise türler arası melezleme sonucu elde edilmiştir (Fideghellivd., 1998; Li vd., 2013).

Yıllara göre değişmekle birlikte Ülkemiz şeftali üretiminde dünya sıralamasında ilk beş veya altıda yer almasına rağmen kendine ait çeşit veya çeşitler bulunmamaktadır. Genellikle yurt dışından introduksiyon yolu ile getirilen çeşitlerde adaptasyon çalışmaları yapılmıştır. Kontrollü melezleme çalışmaları ise iki melezleme programı ile (1994 Çukurova Üniversitesi, 2008 Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü) sınırlı kalmıştır (Özdemir Eroğlu & Mısırlı, 2012).

İslahta genetik zenginliğin, doğası, büyüklüğü ve tanımlanması ıslah programları için gerekli ve önemlidir. Bunun için çok değişkenli analiz teknikleri kullanılmaktadır. Bazı morfolojik, fenolojik ve verim değişkenleri kullanarak multivaryete analizi ile Türkiye'de kayısı genetik kaynakları değerlendirilmiştir (Asma & Öztürk, 2005). Diğer yandan Meksika'da (Perez vd., 1993), Sırbistan'da (Nicolíć vd., 2010) şeftali genetik kaynaklarını multivaryete analizleri ile değerlendirerek bu kaynakları kullanım amaçlarına göre yorumlamışlar ve ümit var genotipleri belirleyerek ıslah programlarına alınmalarını tavsiye etmişlerdir.

Iğdır Türkiye'nin doğuya açılan kapısı ve eski ticaret yolları üzerinde bulunması nedeniyle bazı ılıman iklim meyve türlerinde olduğu gibi şeftali türünde de zaman içerisinde bir genetik çeşitliliğin oluşmasına yol açmıştır. Yörede yıllardan beri çekirdekten yetiştirilen şeftalilerin kendilerine has özel tat, koku ve aromaları olmasının yanı sıra meyve irilikleri bakımından da ticari çeşitler ile boy ölçüşebilecek özelliklere sahiptirler. Bu çalışma, yerel şeftalilerin sahip olduğu varyasyonun genişliğini, incelenen parametreler

arasındaki ilişkileri ve genotipler arasında en ayırt edici değişkenlerin tespiti amacıyla yürütülmüştür.

2. Materyal ve metot

2. Material and Methods

Araştırmanın yürütüldüğü Iğdır Ovası Aras Vadisinde konumlanmış olup Doğu Anadolu Bölgesinin mikro klima özelliği gösteren düşük rakımlı ve yüz ölçümü en geniş olan ovalarından biridir. Doğu Anadolu gibi yüksek platolar ve dağlık bölgelerin geniş yer kapladığı bir bölgede bulunan ve havza olarak belirlenen Iğdır ili çevresine göre gerek iklim gerekse toprak ve bitki örtüsü gibi doğal çevre özellikleri bakımından oldukça değişik özelliklere sahiptir. Uzun yıllara ait ortalama sıcaklığın ise 13.50 °C, nispi nemin % 53.43 ve yıllık toplam yağışın 250.2 mm olduğu bildirilmektedir (MGM., 2015). 2013-2014 yılları arasında yürütülen çalışmada Iğdır yöresinde Necefali ve Kadıkışlak köylerinde yaygın bir şekilde yetiştiriciliği yapılan Ağşeftali ve Zeferan populasyonlarından toplam 38 genotip ve 2 standart çeşit (RichLady ve RoyalGlory) toplamda 40 genotip bu çalışmanın materyalini oluşturmuştur. Şeftali meyvesinde fiziksel özelliklerin belirlenmesinde her bir genotip için 10 meyve kullanılmıştır. Kimyasal analizlerde her bir genotipten elde edilen meyve sularında üç tekrarlı okuma yapılmıştır.

2.1. Analizler

2.1. Analysis

2.1.1. Fiziksel analizler

2.1.1 Physical analysis

Meyve ağırlığı (MA) ve çekirdek ağırlığı (ÇA) 0.01 g hassasiyetindeki terazi ile g olarak, meyve eni (ME), meyve yüksekliği (MY), sap çukuru genişliği (SÇG), sap çukuru derinliği (SÇD), 0.1 mm'ye duyarlı dijital kumpas ile mm olarak, meyve hacmi (MH) meyvenin taşıdığı su miktarı cm³ cinsinden (Kurnaz, 1989 ; Demirsoy, 1993; Bilginer vd., 1998; Bayazıt vd., 2012), meyve kabuğu L*değeri (MKL*); L* parlaklığı ifade etmekte olup 100 değeri rengin beyaz, 0 ise siyah olduğunu gösteren bu değer Doğan (2002) tarafından belirtilen metot kullanılarak tarayıcıda elde edilen veritif uzantısına dönüştürüldükten sonra bilgisayarda photoshop programı (600 dpi çözünürlük. 16 bit. HP Scan Jet 3500c. Hewlett Packard Co. Palo Alto. CA. USA) yardımıyla, olgunlaşma gün sayısı (OGS) tam çiçeklenme döneminden hasat tarihine kadar geçen süre gün olarak hesaplanarak belirlenmiştir.

2.1.2. Kimyasal analizler

2.1.2. Chemical analysis

C vitamini belirlemede, askorbik asitin 2 6 diklorofenolindofenol boyasının rengini açması ilkesine dayanan deneyde bir miktar meyve numunesi, belli oranda metafosforik asit çözeltisinde ezilip, süzöldükten sonra büretteki boya çözeltisi ile titre edilmiş ve harcanan hacim üzerinden hesaplanarak belirlenmiştir (Anonymous., 1983). Titrasyon asitliği (TA) bir miktar meyve suyu seyreltikten sonra 0.1 N NaOH ile pH 8.1 oluncaya kadar titre edilerek g/100ml malik asit cinsinden, suda çözünen kuru madde miktarı (SÇKM) masaüstü refraktometre ile (WAY-2S. Seoul. South Korea) % olarak, meyve suyu pH sı (pH) bir miktar meyve suyu taşınabilir pH metre ile (Jenco Instruments Inc. San Diego. USA) ölçülerek belirlenmiştir (Williams, 1984).

2.1.3. Verilerin değerlendirilmesi

2.1.3. Data analysis

Şeftali genotipleri arasındaki varyasyonu ve değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için Temel Bileşenler Analizi (PCA) SPSS Version 19.0 paket programı ile yapılmıştır. PCA analizinde eigen değerinin 1'in üzerinde olması dikkate alınmıştır. Faktör skorları ve temel bileşen yükleri Varimax rotasyon metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Temel bileşen yükü sadece 0.6 ya eşit veya büyük olan katsayılar temel bileşen olarak dikkate alınmıştır. Hiyerarşik kümeleme analizi JMP paket programı ile genotipler arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları belirlemek için yapılmıştır. Sınıflamada Ward's minimum varyans metodu kullanılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Genotiplere ait genel değerlendirme

3.1. General evaluation of genotypes

İncelenen şeftali genotiplerine ait 13 değişken Çizelge 1'de verilmiştir. Veriler incelendiğinde meyvenin fiziksel özellikleri bakımından MA 115.2-258.4 g, ÇA 7.3-15.9 g, MH 113.5-250.0 cm³ ve MK L* 30.1-74.1 değerleri arasında olduğu saptanmıştır. Çalışmada kıyaslama için bulundurulmuş standart şeftali çeşitlerini MA bakımından geçebilen Ağşeftali populasyonundan 4, 8 ve 12 nolu genotipler, Zeferan populasyonundan 12, 16 ve 17 nolu genotipler iri meyveleri ile ön plana çıkmışlardır. Öte yandan genotiplerin C vitamini içerikleri 4.3-22.1 mg/L, TA malik asit cinsinden %0.3-1.2 ve SÇKM % 9.9-

17.5 aralıklarında olduğu tespit edilmiştir. Lokal genotiplerin standart çeşitlere göre genel manada SÇKM, C vitamini, pH değerlerinin daha yüksek, fakat TA'nın daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tam çiçeklenmeden itibaren OGS hesaplanan lokal genotiplerin geççi ya da çok geççi oldukları tespit edilmiştir (Çizelge 1). Önceki çalışmalar incelendiğinde, Eğirdir ekolojik koşullarında 16 şeftali çeşidi üzerinde yapılan bazı pomolojik araştırmalarda MA 133.40 -258.9 g, TA %0.46-%0.74, SÇKM %10.68-%16.60 arasında (Gür & Pırlak, 2011), Lapseki ekolojik koşullarında yine 16 farklı şeftali çeşidi üzerinde yürütölen bir çalışmada MA 154-468 g, TA %0.26-%1.24, SÇKM %7.53-%14.50 arasında bildirilmiştir (Gür vd., 2020). Sırbistan'da farklı 30 şeftali genetik kaynağının değerlendirildiği çalışmalarda ise MA 42.1-99.7 g, TA % 0.37-%1.10 ve SÇKM %13.0-18.5 değerleri arasında rapor edilmiştir (Nicolic vd., 2010). Mevcut çalışma sonuçları literatür ile karşılaştırıldığında Eğirdir ekolojik koşullarında yürütölen çalışma ile kıyaslanabilir olduğu, Sırbistan'da yürütölen çalışmaya göre bulgularımız MA bakımından yüksek, Lapseki ekolojik koşullarında yürütölen çalışmaya göre MA bulgularımızın düşük bununla beraber TA ve SÇKM bakımından bulgularımız araştırmacıların bulguları ile uyum içerisinde olduğu görölmektedir. MA bakımından bulgularımızın farklı olması çalışılan materyalin farklı olmasıyla beraber araştırmaların yapıldığı ekolojik koşullarında farklı olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

3.2. Korelasyon analizi ve değerlendirme

3.2. Evaluation of correlation analysis

İncelenen parametrelerden MA, ÇA, ME, MY, SÇG, SÇD ve MH gibi ağırlık ve meyve boyutlarını içeren değişkenler arasındaki ilişkinin pozitif ve önemli, sadece ÇA ve SÇG arasındaki ilişkinin önemsiz olduğu tespit edilmiştir. Şeftalinin ağırlık ve boyut ölçülerini içeren değişkenler arasındaki ilişkilerin önemli ve pozitif olduğu daha önceki çalışmalarda rapor edilmiştir (Nicolic vd., 2010; Li vd., 2014). Çalışmamızda özellikle MA ile TA arasında (r=0.403), ÇA ile SÇKM arasında (r=0.374) önemli ve pozitif ilişkiler tespit edilmiştir. Öte yandan ME ile TA arasında (r=0.489) pozitif, ME ile pH arasında (r=-0.417) negatif korelasyon belirlenmiştir. MY ile SÇKM arasında r=0.344, SÇD ile SÇKM arasında r=0.363 ilişkilerin pozitif ve önemli olduğu saptanmıştır. Mevcut çalışmada ayrıca MH ile TA arasında (r=0.342), MKL* ile TA arasında (r=0.342) pozitif; MKL* ile pH arasında (r=-0.413) negatif ilişkiler olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1. Şeftali genotiplerinde incelenen parametreler
Table 1. Data of parameters examined in peach genotypes

Genotipler	MA ^a	ÇA	ME	MY	SÇG	SÇD	MH	MKL*	OGS	C Vit	TA	SÇKM	pH
RichLady	195.4	10.8	71.0	67.2	21.6	11.9	198.7	62.9	103	5.6	1.2	10.6	3.6
RoyalGlory	204.8	8.0	70.1	63.5	26.2	11.3	202.2	30.1	102	4.3	0.9	10.2	3.9
Ağşeftali 1	152.6	8.2	67.5	58.8	21.5	11.7	177.0	39.0	164	19.1	0.7	12.8	4.1
Ağşeftali 2	129.3	8.6	64.0	57.4	19.3	10.7	127.5	38.7	164	14.2	0.7	12.2	3.8
Ağşeftali 3	148.8	9.1	69.2	60.8	19.1	10.2	131.0	57.6	164	19.8	0.6	11.7	4.0
Ağşeftali 4	214.4	9.6	76.4	66.9	21.2	11.6	206.0	47.8	164	16.8	0.6	13.1	3.8
Ağşeftali 5	131.4	8.3	61.9	62.4	21.2	11.1	129.5	74.1	163	22.1	0.6	9.9	3.7
Ağşeftali 6	177.6	8.7	70.4	67.1	25.0	12.1	154.5	58.4	163	17.2	0.8	13.5	3.7
Ağşeftali 7	193.9	10.3	71.6	70.4	25.4	12.0	187.5	56.9	163	18.2	0.8	13.7	3.8
Ağşeftali 8	214.3	11.7	73.1	79.9	20.4	9.0	198.0	64.4	163	17.8	0.8	14.0	3.7
Ağşeftali 9	121.0	8.7	60.4	54.3	16.9	10.5	119.0	41.8	167	16.9	0.7	15.1	3.8
Ağşeftali 10	174.4	10.3	66.6	64.2	19.4	13.6	158.5	53.3	167	15.8	0.8	16.2	3.9
Ağşeftali 11	144.1	8.8	63.9	60.6	16.5	10.2	140.0	69.4	152	17.5	0.5	12.4	4.1
Ağşeftali 12	245.6	13.0	77.5	71.7	18.9	8.4	240.0	42.2	152	11.6	0.8	11.8	3.8
Ağşeftali 13	180.1	11.0	68.4	64.7	17.6	11.4	180.0	37.8	152	10.9	0.6	12.3	4.0
Ağşeftali 14	202.1	12.1	71.8	68.5	18.1	8.5	199.5	52.6	152	12.5	0.7	11.6	4.0
Ağşeftali 15	162.9	10.4	67.0	62.9	17.0	9.3	158.5	54.1	152	19.8	0.6	11.0	3.9
Zeferan 1	150.3	10.2	64.5	64.2	17.8	10.4	159.5	41.7	162	17.2	0.3	10.6	4.5
Zeferan 2	151.8	8.8	64.3	63.0	17.4	8.9	149.0	42.0	162	17.8	0.4	11.3	4.3
Zeferan 3	161.1	9.5	64.8	61.5	15.3	10.1	160.0	43.2	162	18.8	0.5	10.3	4.1
Zeferan 4	145.4	9.5	62.1	71.5	19.0	11.8	145.0	39.4	162	17.8	0.4	12.8	4.3
Zeferan 5	156.7	11.1	64.1	64.8	17.7	10.7	155.6	50.9	162	17.5	0.5	12.3	4.2
Zeferan 6	175.7	10.4	66.6	73.3	18.3	10.2	171.7	43.9	162	17.5	0.4	10.1	4.3
Zeferan 7	229.0	13.0	75.3	87.6	26.2	10.7	227.5	35.7	161	21.1	0.3	12.6	4.3
Zeferan 8	133.8	9.2	58.5	77.6	23.0	8.9	132.0	41.3	161	17.8	0.3	11.9	4.4
Zeferan 9	194.1	10.6	67.2	79.2	23.8	13.0	192.5	39.7	161	16.8	0.6	12.3	4.4
Zeferan 10	201.9	9.5	68.4	82.0	26.6	14.1	201.0	37.7	161	18.2	0.6	12.3	4.4
Zeferan 11	209.8	15.9	66.4	80.0	23.2	11.7	202.5	43.4	161	18.5	0.6	15.5	4.1
Zeferan 12	239.5	14.3	75.1	81.6	26.8	14.2	233.5	56.9	161	17.2	0.5	17.5	4.3
Zeferan 13	147.7	10.8	61.6	65.2	19.1	10.0	146.0	51.6	161	18.2	0.6	14.5	4.2
Zeferan 14	184.6	13.5	67.9	75.3	21.3	15.0	177.0	42.2	161	15.5	0.5	15.0	4.2
Zeferan 15	199.3	11.3	68.9	69.5	23.7	13.3	198.0	60.5	161	18.8	0.6	12.1	4.5
Zeferan 16	229.8	15.3	73.2	82.5	22.9	15.1	227.5	43.5	161	19.1	0.7	14.8	4.2
Zeferan 17	215.1	12.3	69.3	70.4	16.1	12.9	217.0	57.6	165	16.8	0.6	13.9	4.2
Zeferan 18	116.1	9.0	57.6	55.7	14.6	8.4	125.5	40.7	165	20.1	0.3	11.0	4.4
Zeferan 19	158.7	7.3	64.2	72.1	19.9	13.9	158.0	50.9	165	18.8	0.3	13.0	4.4
Zeferan 20	258.4	15.1	78.7	73.2	22.4	13.7	250.0	52.1	165	19.1	0.8	10.3	3.9
Zeferan 21	210.7	14.6	72.5	68.4	20.2	12.7	183.0	60.6	165	19.5	1.0	12.6	3.7
Zeferan 22	117.4	7.4	59.6	57.7	15.5	11.6	115.0	50.4	180	20.5	0.6	10.9	4.4
Zeferan 23	115.2	9.6	56.4	70.9	17.5	7.3	113.5	32.7	180	19.1	0.4	14.2	4.4
Minimum	115.2	7.3	56.4	54.3	14.6	7.3	113.5	30.1	102	4.3	0.3	9.9	3.6
Maksimum	258.4	15.9	78.7	87.6	26.8	15.1	250	74.1	180	22.1	1.2	17.5	4.5
Ortalama	177.4	10.6	67.5	68.7	20.3	11.3	173.7	48.5	159.4	17	0.6	12.6	4.1
Standart Sapma	38.57	2.3	5.5	8.1	3.4	1.9	36.9	10.3	14.4	3.6	0.2	1.8	0.3
Varyasyon Katsayısı	21.8	21.1	8.1	11.9	16.6	17.2	21.3	21.2	9.0	21.3	33.0	14.3	6.5

^a İncelenen parametrelere ait kısaltmaların anlamı materyal ve yöntemde verilmiştir.

OGS ile vitamin C arasında $r=0.826$; OGS ile pH arasında $r=0.348$ önemi ve pozitif; OGS ile TA arasında $r=-0.493$ negatif önemli ilişkiler belirlenmiştir. Vitamin C ele alındığında TA ile

arasında önemli $r=-0.510$ negatif; pH ile önemli $r=0.348$ pozitif korelasyon olduğu belirlenmiştir. TA ile pH arasında ise önemli ($r=-0.780$) ve negatif ilişkinin olduğu saptanmıştır (Çizelge 2).

Tablo 2. Şeftali genotiplerine ait korelasyon matrisi
Table 2. Correlation matrix of peach genotypes

	MA ^a	ÇA	ME	MY	SÇG	SÇD	MH	MKL*	OGS	VitC	TA	SÇKM	pH
MA	1.00												
ÇA	0.75	1.00											
ME	0.92	0.59	1.00										
MY	0.66	0.62	0.46	1.00									
SÇG	0.56	NS	0.50	0.64	1.00								
SÇD	0.44	0.32	0.37	0.36	0.51	1.00							
MH	0.98	0.71	0.89	0.64	0.54	0.43	1.00						
MKL*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	1.00					
OGS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	1.00				
VitC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.83	1.00			
TA	0.40	NS	0.49	NS	NS	NS	0.34	0.34	-0.49	-0.51	1.00		
SÇKM	NS	0.37	NS	0.34	NS	0.36	NS	NS	NS	NS	NS	1.00	

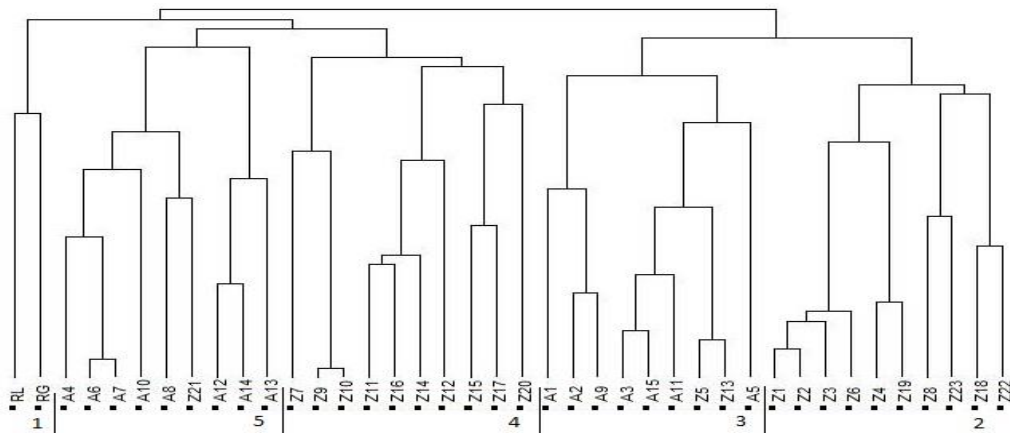
^a İncelenen parametrelere ait kısaltmaların anlamı materyal ve yöntemde verilmiştir. Korelasyon katsayıları için $P \leq 0.05$ düzeyinde önemlidir. NS; not significant.

3.3. Kümeleme Analizi

3.3. Cluster Analysis

Kümeleme analizi sonucunda genotipler arasındaki benzerlikler ve farklılıkların dendogramı Şekil 1’de verilmiştir. Dendogramda 5 grubun oluştuğu tespit edilmiştir. İlk grupta standart çeşitler (RL, RG) yer almıştır. Bu gruptaki genotiplerin erkenci, titrasyon asitliğinin yüksek ve vitamin C, SÇKM ile pH değerlerinin düşük olması nedeni ile diğer gruplardan ayrılmıştır. İkinci grup Zeferan (Z1, Z2, Z3, Z6, Z4, Z19, Z8, Z23, Z18 ve Z22) genotiplerinden oluşmuştur. Bu grubu oluşturan genotiplerin diğer gruplardan en önemli farkı çok geççi olmamalarının yanında küçük meyve oluşturması ve meyve suyu pH sınır yüksek olmasıdır. Üçüncü grubu 2 Zeferan ve 7 Ağşeftali genotipi (A1, A2, A9, A3, A15, A11, Z5, Z13, A5) oluşturmuştur. Bu gruptaki genotiplerin meyvelerinin küçük olmasının yanı sıra MKL* parlaklık değerinin diğer gruplardan yüksek olması ile ayrılmıştır. Dördüncü grubu toplam 10 adet

Zeferan genotipi oluşturmuştur (Z7, Z9, Z10, Z11, Z16, Z14, Z12, Z15, Z17, Z20). Özellikle iri meyvelere sahip ve aynı zamanda meyvelerin sap çukuru derinliğinin fazla olması bu gruba farklılık katmaktadır. Beşinci grubu sırasıyla A4, A6, A7, A10, A8, Z21, A12, A14 ve A13 genotipleri oluşturmuştur. Bu gruptaki meyveler orta irilikte geniş yanaklı olmaları ve incelenen diğer parametreler bakımından orta değerlere sahip olması nedeni ile diğer gruplardan ayrılmaktadır. Kümeleme analizi sonucunda genotiplerin benzerlik katsayıları (d) 0.92 ile 12.45 arasında değişim göstermiştir. Benzerlik bakımından birbirine en yakın genotipler $d=0.92$ değeri ile Z9 ve Z10 genotipleri olurken, $d=12.45$ değeri ile en uzak Royal Glory ve A1 genotipleri olmuştur (Şekil 1). Benzer şekilde Sırbistan’da şeftali genetik kaynaklarına ait değerlendirmede kümeleme analizi ile büyük ve küçük meyveli genotipler birbirinden ayrılmış, anaçlık ve sofralık genotipler belirlenmiştir (Nicolić vd.,2010).



Şekil 1. 40 şeftali genotipine ait kümeleme dendogramı
Figure 1. Clustering dendrogram of forty peach genotypes

3.4. Temel Bileşenler Analizi

3.4. Principal Component Analysis (PCA)

Çalışmada kullanılan veri seti içerisinde en önemli değişkenleri tanımlamak için PC analizi kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda Meksika ve Sırbistan'da şeftali genetik kaynaklarını incelemek için PC analizi kullanılmıştır (Perez vd.,1993; Nicolićvd.,2010). Mevcut çalışmada elde ettiğimiz bulgularda eigen değeri 1'in üzerinde çoklu varyasyonun % 79.89 oranında temsil eden ilk 4 PC Çizelge 3'de verilmiştir. Temel bileşen analizinde incelenen özellikler bakımından bileşenlerdeki ağırlık değerleri 0.6 ve üzeri olduğu takdirde önemli ağırlığa sahip oldukları kabul edilmektedir (Jeffers, 1967). Analiz sonucunda varimax metoduna göre rotasyona tabi tutulan verilerde toplam varyasyonun % 30.02'si ni oluşturan PC1 ekseninde ağırlıklı olarak meyvenin fiziksel özellikleri (MA, MH, ME, ÇA ve MY) yer almıştır. Toplam varyasyonun %18.88'ini oluşturan PC2 ekseninde vitamin C ile olgunlaşma

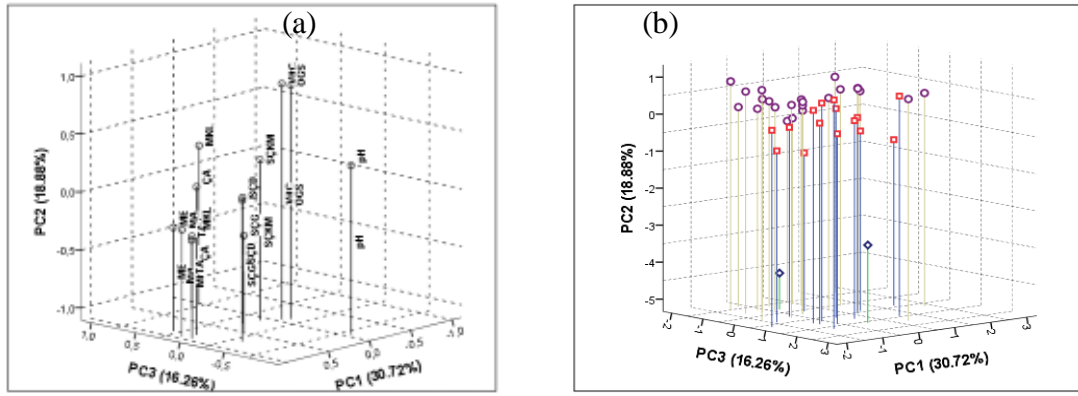
gün sayısı (OGS); %16.26'sını oluşturan PC3 ekseninde MKL*değeri, meyve suyu pH ve TA; %14.03'ünü oluşturan PC4 ekseninde ise meyvenin sap çukuru ölçüleri ile suda çözünen kuru madde (SÇD, SÇD ve SÇKM) değişkenleri yer almıştır (Tablo 3). Korelasyon analizi ve kümeleme analizi sonuçları ise PC analizini desteklemektedir. Ayrıca ilk üç temel bileşenin değişkenler üzerindeki yükü ve bileşen skorları sırasıyla Şekil 2.a ve Şekil 2.b'de verilmiştir. Şekil 2.b incelendiğinde PC1 negatif ekseninde kümelenen genotiplerin meyve iriliklerinin küçük, pozitif ekseninde kümelenenlerin ise meyve irilikleri orta yada büyük sınıfta yer almaktadır. PC2'nin negatif ekseninde olgunlaşma gün sayısı daha kısa ve vitamin C içeriği daha az genotipler, pozitif kısmında olgunlaşma gün sayısı uzun ve vitamin C içeriği yüksek genotipler kümelmiştir. PC3 pozitif ekseninde yüksek titrasyon asitliği ve düşük pH ya sahip genotipler, negatif kısımda tam tersi duruma sahip genotipler yer almaktadır.

Tablo 3.Değişkenlere ait ilk dört temel bileşen (PC) eksenleri

Table 3. The first four principal component (PC) axis of variables

Değişkenler	Temel Bileşenler			
	PC1	PC2	PC3	PC4
MA ^a	0.939			
MH	0.930			
ME	0.848			
ÇA	0.816			
MY	0.724			
VitC		0.919		
OGS		0.904		
pH			-0.832	
MKL*			0.782	
TA			0.726	
SÇD				0.770
SÇKM				0.740
SÇG				0.624
Eigen Değeri	5.02	2.74	1.59	1.03
% Varyasyon	30.72	18.88	16.26	14.03
Toplam Varyasyon	30.72	49.60	65.87	79.89
KMO	0.664			
Bartlett Testi	X ² ; 463.2, sd; 78, P; 0.000			

^a İncelenen parametrelere ait kısaltmaların anlamı materyal ve yöntemde verilmiştir.



Şekil 2. Temel bileşen analizine (PCA) ait grafikler. (a) incelenen değişkenler için ilk üç temel bileşen (PC) yükleri ve (b) Şeftali genotipleri için ilk üç temel bileşen (PCs) Skorları, o: Zeferanpopulasyonu, □: Ağşeftalipopulasyonu, ◇: Standart çeşitler.

Figure 2. PCA analyses chart. (a) the loads of the first three Principal Component (PC) for the studied variables and (b) the first three PC scores for peach genotypes, o: zeferan pop., □: ağşeftali pop., ◇: St. cultivars.

4. Sonuç

4. Conclusion

Zeferan ve Ağşeftali popülasyonlarına ait genotipler arasında varyasyonun olduğundan söz etmek mümkün olduğu gibi iki yerel çeşide ait popülasyon arasında da farklılıkların olduğu kaydedilmiştir. Özellikle kümeleme analizi sonucunda dördüncü ve beşinci grupta bulunan genotiplerin iri meyvelerinden dolayı sofralık ve taze tüketim için önemli genotipler olduğu ve üzerinde durulması gerektiği belirlenmiştir. Bu gruplarda yer alan genotiplerden özellikle Ağşeftali4, Ağşeftali8 ve Ağşeftali12 ile Zeferan7, Zeferan12, Zeferan16, Zeferan17, Zeferan20 ve Zeferan21 genotipleri iri meyvelerinden dolayı dikkat çekmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda belirtilen bu genotiplerin aşı ile çoğaltılarak verim ve verim bileşenleri ile meyve kalitesi bakımından daha detaylı araştırmaların yapılması tavsiye edilmektedir.

Teşekkür / Katkı Belirtme

Acknowledgments

Bu çalışma Mücahit PEHLUVAN danışmanlığında ve Rafet ASLANTAŞ ortak danışmanlığında yüksek lisans Öğrencisi Kezban ALTAY'ın yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Bu çalışmayı 2013-FBE-L10 nolu proje ile destekleyen Iğdır Üniversitesi BAP birimine teşekkürlerimizi sunarız.

Yazar katkısı

Author contribution

Kezban ALTAY'ın yüksek lisans tezinden üretilen bu çalışmada öğrencinin hem arazi ve hem laboratuvar aşamalarında yoğun ve büyük gayretleri olmuştur. Kendi tez çalışması olduğu için bu makalede ilk isim olarak yer almıştır. Mücahit PEHLUVAN 1. Tez danışmanı olarak yayınlanan bu makalenin daha önce projelendirilmesinde, uygun metodolojinin seçilmesinde ve makalenin yazılmasında katkısı olmuştur. Rafet ASLANTAŞ 2. Tez danışmanı olarak çalışma konusunun belirlenmesi projenin kurgulanması makale yazım aşamasında makalenin olgunlaştırılması gibi birçok aşamada katkısı olmuştur.

Etik beyanı

Ethical statement

Çalışma etik kurul onayı gerektiren bir çalışma olmadığı gibi, makalede bütün bilgiler akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak hazırlanmıştır.

Çıkar çatışması

Conflict of interest

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

References

Anonymous (1983). *Gıda Maddeleri Muayene ve Analiz Yöntemleri*. T. O. ve K. B. Gıda İşleri Genel Müdürlüğü Yayınları. Genel Yayın No: 65, Özel Yayın No: 62-105.

- Asma, B. M., & Öztürk, K. (2005). Analysis of morphological, pomological and yield characteristics of some apricot germplasm in Turkey. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 52, 305-313.
- Bayazıt, S., İmrak, B., & Küden, A. (2012). Erkenci şeftali ve nektarin çeşitlerinde uç alma uygulamalarının verim ve meyve kalitesine etkileri. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17(1), 23-31.
- Bilginer, Ş. K., Demirsoy, H., & Beyhan, N. (1998). Samsun'da yetiştirilen bazı şeftali çeşitlerinde paclobutrazol uygulamalarının vegetatif gelişme ve meyve kalitesi üzerine etkileri. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 22, 425-434.
- Demirsoy, H. (1993). *Çarşamba ovasının şeftali potansiyeli ve şeftali çeşitlerinin pomolojik özelliklerinin saptanması üzerinde bir araştırma*. [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Doğan, İ. S. (2002). A new approach of measuring colours in biscuit as quality criteria. *Proceedings of the 7th Turkish Food Congress* (pp. 357-362), Ankara.
- Fideghelli, C., Della Serada, G., Grassi, F., & Marico, G. (1998). The peach industry in the world present situation and trend. *Acta Horticulturae*, 465, 29-40. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.465.1>
- Gür, E., Gündoğdu, M. A., & Şeker, M. (2020). Lapseki ekolojisinde yaygın bir şekilde yetiştirilen şeftali çeşitlerinin pomoloji özelliklerinin belirlenmesi. *Lapseki Meslek Yüksekokulu Uygulamalı Araştırmalar Dergisi*, 1(2), 90-100.
- Gür, İ., & Pırlak, L. (2011). Eğirdir ekolojik şartlarında yetiştirilen bazı şeftali çeşitlerinin fenolojik ve pomolojik özelliklerinin tespiti. *Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derim Dergisi*, 28(2), 27-41.
- Jeffers, J. N. R. (1967). Two cases studies in the application of principal component analysis. *Applied Statistics*, 16(3), 225-236.
- Jules, J. (2005). The origins of fruits, fruit growing, and fruit breeding, plant breeding. In J. Jules (Ed.), *Plant breeding reviews* (25, 255-320). Wiley.
- Kurnaz, Ş. (1989). *Bazı önemli şeftali ve nektarin çeşitlerinin derim öncesi ve derim sonrası üzerinde araştırmalar*. [Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Li, X., Zhang, A., Atungulu, G., McHugh, T., Delwiche, M., Lin, S., Zhao, L., & Pan, Z. (2014). Characterization and multivariate analysis of physical properties of processing peaches. *Food Bioprocess Technology*, 7, 1756-1766. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1269-y>
- Li, XW., Meng, XQ., Jia, HJ., Yu, M. L., Ma, R. J., Wang, L. R., Cao, K., Shen, Z. J., Niu, L., Tian, J. B., Chen, M. J., Xie, M., Arus, P., Goa, Z. S. & Aranzana, M. J. (2013). Peach genetic resources: diversity. Population structure and linkage disequilibrium. *BMC Genetics*, 14, 84.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2015). *İğdir Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü Kayıtları*, İğdir.
- Nicolíć, D., Rakonjac, V., Milatović, D., & Fotirić, M. (2010). Multivariate analysis of vineyard peach [*Prunus persica* (L.) Batsch.] germplasm collection. *Euphytica*, 171, 227-234. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-0032-3>
- Williams, S. (Ed.). (1984). *Official methods of analysis* (14th ed.). Association of Official Analytical Chemists (AOAC).
- Özdemir Eroğlu, Z., & Mısırlı, A. (2012). Şeftali Islahı ve Gelişimi. *Bahçe*, 41(2), 37-46.
- Pérez, S., Montes, S., & Mejía, C. (1993). Analysis of Peach Germplasm in Mexico. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(4), 519-524.

Ardahan ili şebeke sularının bazı fiziksel kimyasal ve mikrobiyal parametrelerinin mevsimsel olarak incelenmesi

Seasonal examination of certain physical, chemical, and microbial parameters of Ardahan city tap waters

Nesrin DURSUN*^{1,2,a}

¹Ardahan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 75002, Ardahan

²Ardahan Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, 75002, Ardahan

• Geliş tarihi / Received: 23.11.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 17.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 26.06.2022

Öz

Dünya nüfusunda hızlı artış ve kentsel alanlara göç, tüketicilere sürdürülebilir temiz içme ve kullanma suyu temini için merkezi su sistemlerine duyulan ihtiyacın nedeni olmuştur. Şebeke sularının kabul edilebilir (Sağlık Bakanlığı ve Dünya Sağlık Örgütü) içme suyu seviyelerinin dışında olması, genellikle dağıtım sistemlerinin eski ve bakımsız olmasıyla ilişkili olup, tüketicilerde önemli sağlık risklerine neden olabilir. Bu çalışmada, şebeke sularının bazı fiziksel, kimyasal ve mikrobiyal parametreleri incelenmiştir. Ardahan ilinde 14 lokasyonda mevsimsel olarak alınan örnekler, Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı (SB) ve Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, saptanmış değerlerin halk sağlığı açısından potansiyel risk oluşturup oluşturmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Örneklerde fiziksel (sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik, bulanıklık), kimyasal (F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}) ve mikrobiyal (koliform bakteri) parametreler incelenmiştir. Şebeke suyu örneklerinin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçlarının, SB ve DSÖ kriterlerine uygun olduğu saptanmıştır. Mikrobiyal (koliform bakteri) analiz sonucunda, kış mevsiminde örnekleme noktalarının tamamında, ilkbahar mevsiminde de neredeyse tüm örnekleme noktalarında koliform bakteri saptanmamış ve bu sonuçların SB kriterlerine uygun olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, yaz ve sonbahar mevsimlerinde bazı örnekleme noktalarında koliform bakteri tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ardahan, Halk sağlığı, Su parametresi, Şebeke suyu

Abstract

The rapid increase in world population and migration to urban areas has created the need for central water systems to deliver sustainable supply of clean drinking and utility water to consumers. The failure of tap water suppliers to maintain acceptable (Ministry of Health and the World Health Organization) drinking water standards is often associated with old and neglected distribution systems, and this problem can cause significant health risks for consumers. The present study examines certain physical, chemical, and microbial parameters of tap water. Samples were seasonally taken at 14 locations in Ardahan province, were evaluated according to the criteria of the Republic of Turkey, Ministry of Health and the World Health Organization (WHO). In addition, we aimed to determine whether the detected values constitute a potential risk for public health. Physical (temperature, pH, electrical conductivity, turbidity), chemical (F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}), and microbial (coliform bacteria) parameters were examined in the samples. The physical and chemical analysis of the tap water samples showed that the results comply with the criteria of the Ministry of Health and the WHO. Microbial analysis showed no contamination in all of the sampling points during the winter season and in almost all of the sampling points during the spring season; these results were in accordance with the Ministry of Health criteria. However, coliform bacteria were detected at certain sampling points in the summer and autumn seasons.

Keywords: Ardahan, Public health, Water parameter, Tap water

*a Nesrin DURSUN; nesrindursun@ardahan.edu.tr, Tel: (0478) 211 75 40, orcid.org/0000-0002-7463-1038

1. Giriş

1. Introduction

Su, yaşamın devamlılığı için gereklidir. İnsanlar, sağlıklı yaşam için içme suyunu güvenli, yeterli ve erişilebilir kaynaklardan temin etmelidir. İçme suları, su temin edilen kaynaklarda doğal, insan ve hayvan kaynaklı kirlenme; yeterli olmayan arıtma; bulunduğu bölgeden ihtiyaç olan bölgeye iletim sağlayan borular ve depoda kirlenme dolayısıyla bazı su kaynaklı hastalıkların nedeni olabilir. İçme suyu kalitesinin iyileştirilmesi için başta havza yönetimi ve su temin edilen kaynakların korunması olmak üzere; arıtma, kullanılacak bölgeye iletim sağlayan boru ve depo bakımlarının düzenli yapılması önem arz etmektedir.

İçme suyu kalitesi, sağlığı etkileyen önemli faktörlerden biridir. Birçok ülkede, düşük içme suyu kalitesi, su kaynaklı hastalıkların nedeni olmuştur (Li & Wu, 2019; Thomas vd., 2006). İçme suları kaynağa veya depolama sırasında kirlenebilir; bu nedenle her iki kirlenme durumuna karşı su kaynaklı hastalıkları azaltmaya yönelik stratejiler geliştirilmelidir (Mintz vd., 1995). İçme suyu kirletici kaynakları; (i) yer altı ve yüzey suyundaki kirleticiler, (ii) doğal kirleticiler, (iii) içme suyunun arıtılarak dağıtılması sırasında oluşan kirleticiler olarak kategorilere ayrılabilir. Yer altı ve yüzey suyundaki kirleticiler; topraktan sızan doğal kirleticiler, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan akışlar, atıksu arıtma tesisleri, endüstriyel tesis atık sularının kontrolsüz deşarjı, düzenli depolama sahaları ve kimyasal kaza sızıntıları gibi nedenlerle oluşabilir (Herranz vd., 2018; Van Leeuwen, 2000; Kaale & Katima, 2013). Doğal olarak oluşan kirleticilerin çoğunluğunu, doğal mineral oluşumları ile elde edilen mangan ve arsenik gibi inorganik bileşikler oluşturmaktadır (Van Leeuwen, 2000; Gouille vd., 2009). İnsan aktivitesi ile genellikle organik bileşikler, pestisitler, dezenfektanlar ve dezenfektan yan ürünleri ortaya çıkmaktadır (Van Leeuwen, 2000). İçme suyu proses güvenilirliğinin kısa vadede iyileştirilmesinde, arıtma ve izlemeye odaklanılmalıdır. Bunun nedeni, birçok içme suyu arıtma tesisinin ham su kaynağını kolayca değiştirememesidir. Su güvenliğini veya kalitesini arttırmaya yönelik su havzası korunması, kuyu başı koruma programları gibi adımlar da hemen sonuç vermeyecek uzun vadeli önlemler kapsamındadır. Musluklardan akan su kalitesinde iyileştirmeler, dağıtım sistemlerine yapılan yatırımlarla sağlanıyor olsa da, bu durum yetersiz arıtmayı telafi edememektedir (Bhatt & Shilpa, 2015; Huck & Coffey, 2004).

İnsan sağlığı, hayvan sağlığı, çevre sağlığı ve iklim faktörleri su kaynaklı hastalık risklerini etkileyebilir (Rose vd., 2000). Su kaynaklarında, insan veya hayvan dışkısı teması ile mikrobiyal riskler ortaya çıkmaktadır. Dışkı; patojenik bakteri, protozoa, virüs ve helmint kaynağı olabilir. Dışkı kaynaklı patojenik bakteri, mikrobiyal güvenlik için temel endişe olup, mikrobiyal su kalitesini hızla değiştirebilir (WHO, 2008). Patojen konsantrasyonunda kısa vadeli artış olması, hastalık risklerini arttırabilir ve su kaynaklı salgın (diyare, sıtma, dizanteri, kolera) hastalıkları tetikleyebilir (Prüss-Ustün vd., 2014; Ashbolt, 2004; Sow vd., 2002; WHO, 2008). Güvenli içme suyu temininde, patojenlerin varlığını en aza indirmek için dezenfeksiyonun önemli olduğu belirtilmiştir (Schoenen, 2002). Dezenfeksiyon, içme suyu arıtımı aşamasında birçok patojene özellikle de bakterilere karşı etkili olup, yüzey suları ve dışkı kontaminasyonuna maruz kalan yeraltı sularında kullanımı tavsiye edilmiştir. Ayrıca dezenfeksiyon, kısmi koruma sağlamak amacıyla dağıtım sistemi içinde, düşük seviyeli kirlenme ve büyümelere karşı kullanılmaktadır. İçme sularında kimyasal bileşenlerin neden olduğu sağlık etkileri, mikrobiyal risklere göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni, mikrobiyal risklerin olumsuz sağlık etkileri kısa sürede ortaya çıkarken, kimyasal bileşenlerin oluşturduğu sağlık etkilerinin uzun süreli maruziyet sonrası ortaya çıkmasıdır (WHO, 2008). İçme sularında doğal olarak ortaya çıkabilen florür, 1.0-3.0 mg/L konsantrasyonda, diş florozisine (dişlerde renk değişikliği, beneklenme ve çukurlaşma) neden olmaktadır (Meenakshi & Maheshwari, 2006). Florür gibi doğal ortaya çıkabilen arsenik, uzun süreli maruz kalındığında kanser ve cilt lezyonu riski ile sonuçlanabilir (Smith vd., 1992; Ghosh vd., 2007). Agresif veya asitli suların bulunduğu bölgelerde, su temininde kurşun boru ve bağlantı parçaları kullanılıyorsa, içme sularında kurşun yüksek seviyelerde bulunabilir, dolayısıyla nörolojik etkiler oluşabilir (WHO, 2008). Suda yüksek seviyelerde nitrat olması, özellikle bebeklerde methemoglobinemi (mavi bebek sendromu) ile ilişkilendirilmiştir (Majumdar, 2003). İçme suyu kalitesini etkileyen şiddetli yağış olayları, su kaynaklı hastalıkların nedeni olabilir. Yağış, çeşidi ve şiddetine bağlı olarak; askıda katı maddelerin yeryüzüne ulaşmasını ve kimyasal (doğal ve antropojenik) maddelerin akış ya da sızma ile yüzey ve yeraltı sularına ulaşmasını tetikleyebilir (Delpla vd., 2009; Pardue vd., 2005; Auld vd., 2004).

Bu çalışma ile, Ardahan merkez ve merkeze bağlı bazı köylerin içme suyu dağıtım şebeke sularının;

bazı fiziksel, kimyasal ve mikrobiyal parametreler açısından kalitesinin mevsimsel olarak incelenmesi, sonuçların SB ve DSÖ kriterlerine halk sağlığı açısından uygunluğunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, Ardahan ili içme sularının incelenmesine dair çalışma yapılmamış olmasına dayanarak, bu yapılmış mevsimsel çalışma sonuçlarının gelecekte yapılacak araştırmalara temel oluşturacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Araştırma bölgesi ve örnekleme noktaları

2.1. Research area and sampling points

Ardahan ili, Türkiye'nin kuzeydoğusunda Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunmakta olup, kısmi olarak Doğu Karadeniz iklim özelliği göstermektedir. Güneyinde Kars, güneybatısında Erzurum, batısında Artvin ve kuzeydoğusunda Gürcistan ile sınırı bulunmaktadır.

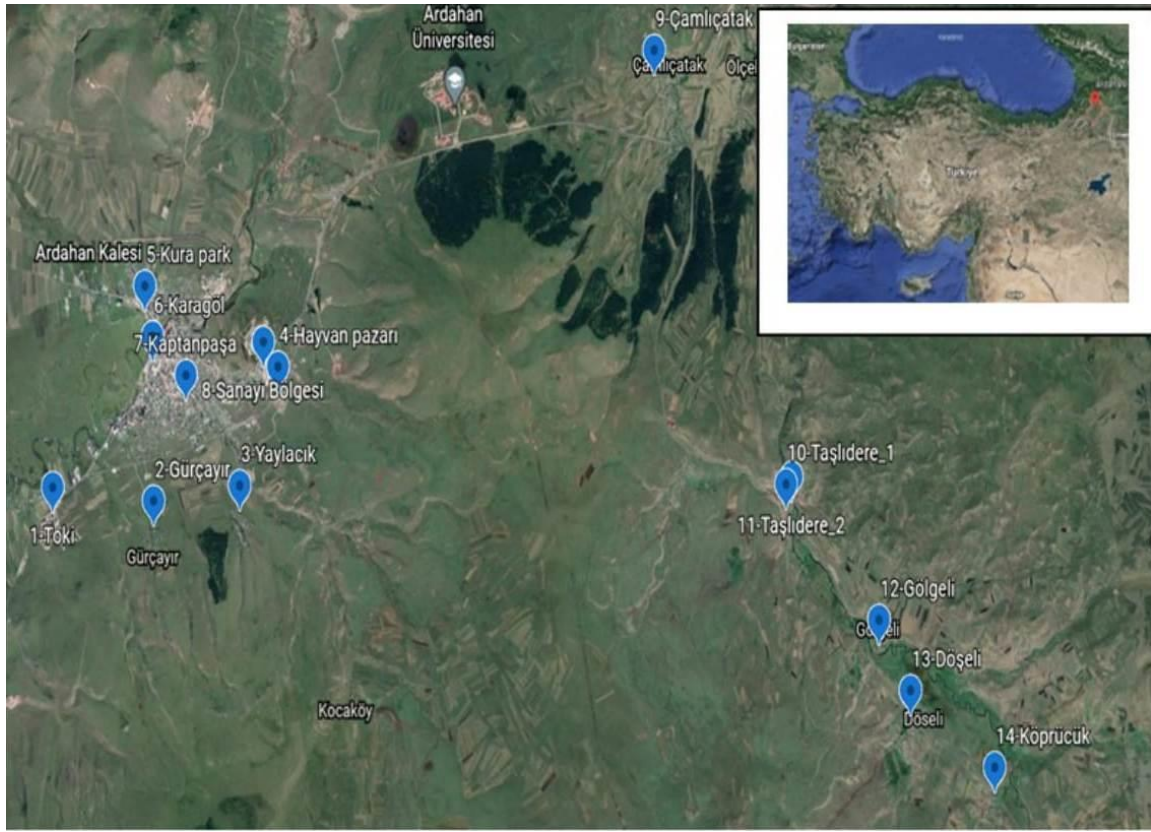
Ardahan'ın 1958-2019 yılları istatistik verilerine göre yıllık ortalama sıcaklığı 3.6 °C, yıllık ortalama en yüksek ve en düşük sıcaklığı sırasıyla 10.8 °C ve -2.5 °C'dir. Ortalama en yüksek sıcaklık 24.5 °C ile Ağustos ayı, ortalama en düşük sıcaklık ise -16.8 °C ile Ocak ayı olarak rapor edilmiştir (TOBMGM, 2020).

İçme suyunu Ardahan Belediyesi; Büyükdere kaynağı (80 lt/sn), Su Atan kaynağı (40 lt/sn) ve Çataldere kaynağı (15 lt/sn) olmak üzere 3 su kaynağından temin etmektedir. Ağır sanayi olmadığı için sanayi suyu kullanım durumu bulunmamaktadır. Küçük Sanayi Sitesi de dahil şebeke suyu kullanılmaktadır (Ardahan Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2020). Dört mevsim boyunca aktif kullanılan kaynakların suyu, depolarda toplanmakta ve karışmakta olup, klorlama işlemi yapılması sonrası havuzlarda dinlendirilerek şehir şebekesine verilmektedir. İçme suyu şebeke hatlarında, genel olarak 50-150 mm çaplı ve PVC cinsi borular kullanılmıştır.

Araştırmada, Ardahan ilinde 14 örnekleme noktası belirlenmiştir. İlk sekiz örnekleme noktasının şebeke suyu, bu su kaynaklarından temin edilmektedir. Diğer örnekleme noktalarının şebeke suyu ise, her bir örnekleme noktası bünyesinde mevcut olan sondaj kuyusundan gelmektedir. 2019 ilkbahar, yaz, sonbahar ve 2020 kış mevsiminde su örnekleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Örnekleme noktaları Mayıs, Ağustos, Kasım ve Şubat ayı başında yapılmıştır. Örnekleme noktaları Toki, Gürçayır köyü, Yaylacık köyü, Hayvan pazarı, Kura park, Karagöl, Kaptanpaşa, Sanayi Bölgesi, Çamlıçatak köyü, Taşlıdere köyü-1, Taşlıdere köyü-2, Gölgeli köyü, Döşeli köyü ve Köprücük köyü olarak belirlenmiştir. Ardahan ilinin içme suyu örnekleme noktaları Şekil 1'de, koordinatları ise Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. İçme suyu örnekleme noktaları konumu
Table 1. Location of drinking water sampling points

Örnekleme Noktası	Örnekleme Noktası Adı	Koordinat
1	Toki (Devlet Hastanesi bölgesi)	41°05' 53" N 42°40' 05" E
2	Gürçayır köyü	41°05' 24" N 42°41' 31" E
3	Yaylacık köyü	41°05' 18" N 42°42' 47" E
4	Hayvan Pazarı	41°06' 08" N 42°43' 39" E
5	Kura park	41°07' 05" N 42°41' 54" E
6	Karagöl	41°06' 41" N 42°41' 53" E
7	Kaptanpaşa	41°06' 18" N 42°42' 16" E
8	Sanayi Bölgesi	41°06' 31" N 42°43' 17" E
9	Çamlıçatak köyü	41°07' 39" N 42°49' 48" E
10	Taşlıdere köyü-1	41°03' 54" N 42°50' 29" E
11	Taşlıdere köyü-2	41°04' 00" N 42°50' 22" E
12	Gölgeli köyü	41°02' 38" N 42°51' 24" E
13	Döşeli köyü	41°02' 02" N 42°51' 40" E
14	Köprücük köyü	41°01' 09" N 42°52' 30" E



Şekil 1. İçme suyu örnekleme noktaları
Figure 1. Drinking water sampling points

2.2. Analizler

2.2. Analysis

Ardahan ilinde 14 örnekleme noktasında; fiziksel su kalitesini belirlemek amacıyla sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik ölçümleri WTW Multi 3410 marka multimetre kullanılarak, bulanıklık ölçümleri ise Aqualytic AL250T-IR marka türbidimetre ile sahada gerçekleştirilmiştir. Saha ölçümünü takiben, örnekleme noktalarından 1 L'lik polietilen şişelere örnekler alınarak, soğuk zincir uygulaması ile laboratuvara taşınmıştır. İçme suyu örnekleri laboratuvara taşındıktan sonra, öncelikle mikrobiyolojik (koliform bakteri) analizleri yapılmıştır. Kimyasal analizler, Dionex ICS-5000⁺ İyon kromatografisi (IC) cihazında analiz edilmek üzere, ölçüme kadar +4 °C sıcaklıkta soğutucuda muhafaza edilmiştir. IC cihazı ile Anyon (F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) ve Katyon (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) konsantrasyonları analiz edilmiştir.

Mikrobiyal çalışma öncesi gerekli malzemeler (cam malzemeler, membran filtrasyon sistemi, pens) otoklavda sterilize edilmiştir. Violet Red Bile (VRB) Agar, koliform bakteri sayısını belirlemek amacıyla hazırlanmıştır (Halkman & Sağdaş, 2014). Selüloz asetat membran (0.45 µm gözenek boyutlu) filtreler kullanılarak, membran filtrasyon tekniği uygulanmıştır. Örnekler, üç tekrarlı olarak

membran filtreden geçirildikten sonra, filtre steril pens ile petri kutusundaki Violet Red Bile Agar (Merck, 1.01406) plakasına yerleştirilmiştir. Plakalar, 37 °C'de 24 saat, mikroorganizmalarda optimal büyümeyi sağlamak amacıyla inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrası koloni adet olarak sayılmıştır (Oymak, 2011). İyon kromatografisi'nde iletkenlik dedektörü ile, anyonlarda Dionex EGC III Potasyum hidroksit (12.00 mM) ve katyonlarda Dionex EGC III metasülfonik asit (18.00 mM) eluent kartuşları kullanılarak, anyon-katyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Ardahan ilinde, 14 lokasyonda yapılan şebeke suları örneklemesinin mikrobiyolojik analizi, Sağlık Bakanlığının (2013) 0 adet/250 ml koliform bakteri önerisine göre değerlendirilmiştir. Mevsimsel olarak değerlendirildiğinde; kış mevsiminde örnekleme noktalarının tamamında ve ilkbahar mevsiminde de iki örnekleme noktası dışında koliform bakteri 0 adet/250 ml olarak saptanmıştır. İlkbahar mevsiminde saptanan koliform bakteri Çamlıçatak köyü'nde 3 adet/250 ml ve Gölgeli köyü'nde 5 adet/250 ml olarak tespit edilmiştir. Yaz ve ilkbahar mevsimi örnekleme

noktaları koliform bakteri sayım sonuçları ise, Tablo 2'de verilmiştir. Askıda koliform bakterilerin çoğalması, suda yeterli miktarda azot, fosfor gibi besinlerin bulunması ve sıcaklık faktörüne bağlıdır (Camper vd., 1991). Su dağıtım sistemlerinde, koliform bakteri oluşumu, azot formlarının yüksek olması ile ilişkilendirilmiştir. Buna ilaveten, koliform bakteri oluşumunun 10 °C üzeri su sıcaklıklarıyla ilişkili olduğu, 15 °C üzeri sıcaklıkların ise daha fazla koliform bakteri

oluşumunun nedeni olduğu rapor edilmiştir (LeChevallier vd., 1991; Sato vd., 2018). Dolayısıyla örnekler değerlendirildiğinde, sıcaklığın düşük ve azot formlarının düşük miktarda olması veya bu formların olmaması, mikrobiyal analiz sonuçlarını desteklemektedir. Sıcaklığın düşük olduğu kış ve ilkbahar mevsiminde, koliform bakteri neredeyse tespit edilmemiştir. Yaz ve sonbahar mevsiminde ise, koliform bakteri saptanmıştır.

Tablo 2. Yaz ve sonbahar mevsimi koliform bakteri sayım sonuçları

Table 2. Results of the coliform bacteria census of the summer and autumn seasons

Örnekleme Noktası	Örnekleme Mevsimi	Koliform Bakteri (adet/ml)
Toki (Devlet Hastanesi bölgesi)	yaz	0/250
	sonbahar	0/250
Gürçayır köyü	yaz	3/250
	sonbahar	1/250
Yaylacık köyü	yaz	2/250
	sonbahar	0/250
Hayvan Pazarı	yaz	3/250
	sonbahar	0/250
Kura park	yaz	0/250
	sonbahar	0/250
Karagöl	yaz	0/250
	sonbahar	0/250
Kaptanpaşa	yaz	1/250
	sonbahar	0/250
Sanayi Bölgesi	yaz	2/250
	sonbahar	0/250
Çamlıçatak köyü	yaz	2/250
	sonbahar	1/250
Taşlıdere köyü-1	yaz	3/250
	sonbahar	1/250
Taşlıdere köyü-2	yaz	1/250
	sonbahar	0/250
Gölgeli köyü	yaz	3/250
	sonbahar	2/250
Döşeli köyü	yaz	2/250
	sonbahar	0/250
Köprücük köyü	yaz	2/250
	sonbahar	0/250

İçme suyu sıcaklığının tadı etkilediği, dolayısıyla soğuk suyun ılık sudan daha lezzetli olduğu rapor edilmiştir (Nature Life, 2021). Su sıcaklığı arttıkça, sudaki mikroorganizma büyümesinde artış olabilir. Ayrıca sıcaklığın arıtma tesisi verimi, mikrobiyal büyüme oranı, dezenfeksiyon etkisi, tat, koku, renk ve korozyonu etkilediği belirtilmiştir (WHO, 2017; LeChevallier vd., 1996). Su sıcaklığı için, Sağlık Bakanlığı (2013) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO,

2017) tarafından sınır değer tavsiye edilmemiştir. Örnekleme noktalarında belirlenmiş sıcaklık değerleri Tablo 3'te sunulduğu üzere, 1.1-20.1 °C aralığında değişkenlik göstermiştir. Örnekleme noktalarında, ilkbahar ve kış mevsimi arasında, 1.1-4.6 °C aralığında sıcaklık değerleri olduğu, dolayısıyla önemli sıcaklık farklılıklarının olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 3. Fiziksel parametreler
Table 3. Physical parameters

Örnekleme Noktası	Örnekleme Mevsimi	Sıcaklık (°C)	pH	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (ntu)
Toki (Devlet Hastanesi bölgesi)	ilkbahar	2.4	7.35	110.8	0.40
	yaz	12.6	7.37	113.3	0.38
	sonbahar	8.0	7.57	145.0	0.73
	kış	1.1	7.33	106.4	0.61
	ortalama	6.0	7.41	118.8	0.53
Gürçayır köyü	ilkbahar	2.9	7.38	333.9	0.39
	yaz	19.3	7.45	345.0	0.44
	sonbahar	13.0	7.48	352.0	0.92
	kış	1.9	7.35	295.7	0.71
	ortalama	9.2	7.42	331.7	0.62
Yaylacık köyü	ilkbahar	3.0	7.51	241.3	0.88
	yaz	17.2	7.47	247.0	0.15
	sonbahar	9.0	7.50	250.0	0.97
	kış	2.8	7.38	238.8	0.81
	ortalama	8.0	7.47	244.3	0.70
Hayvan Pazarı	ilkbahar	2.2	7.41	153.4	0.79
	yaz	20.1	7.22	203.0	0.90
	sonbahar	7.1	7.45	162.9	0.97
	kış	1.2	7.19	149.8	0.88
	ortalama	7.7	7.32	167.3	0.89
Kura park	ilkbahar	2.4	7.47	116.8	0.85
	yaz	14.7	7.20	151.6	0.92
	sonbahar	5.9	7.50	121.2	0.97
	kış	2.0	7.18	112.4	0.94
	ortalama	6.3	7.34	125.5	0.92
Karagöl	ilkbahar	4.5	7.43	128.4	0.85
	yaz	17.5	7.24	133.1	0.87
	sonbahar	5.2	7.45	142.1	0.83
	kış	3.2	7.22	116.8	0.92
	ortalama	7.6	7.34	130.1	0.87
Kaptanpaşa	ilkbahar	4.6	7.39	130.3	0.86
	yaz	15.5	7.31	137.1	0.82
	sonbahar	13.0	7.50	146.1	0.93
	kış	4.0	7.22	123.4	0.90
	ortalama	9.3	7.36	134.2	0.88
Sanayi Bölgesi	ilkbahar	4.3	7.41	154.6	0.89
	yaz	14.1	7.26	196.3	0.95
	sonbahar	6.8	7.48	162.5	0.90
	kış	2.9	7.20	148.8	0.92
	ortalama	7.0	7.34	165.6	0.92
Çamlıçatak köyü	ilkbahar	3.9	7.47	199.8	0.92
	yaz	13.5	7.25	356.0	0.76
	sonbahar	15.0	7.48	212.0	0.99
	kış	4.3	7.23	189.6	1.00
	ortalama	9.1	7.36	239.4	0.92
Taşlıdere köyü-1	ilkbahar	3.0	7.35	230.2	0.98
	yaz	16.2	7.24	242.0	0.65
	sonbahar	8.9	7.33	243.0	0.79
	kış	1.3	7.21	221.2	0.91
	ortalama	7.3	7.28	234.1	0.83
Taşlıdere köyü-2	ilkbahar	3.4	7.39	233.3	0.95
	yaz	13.5	7.22	249.0	0.92
	sonbahar	8.9	7.42	253.0	0.87
	kış	1.5	7.18	222.2	0.90
	ortalama	6.8	7.30	239.4	0.91
Gölgeli köyü	ilkbahar	2.8	7.71	200.7	0.88
	yaz	14.9	7.46	210.0	0.65
	sonbahar	8.3	7.70	221.0	1.46
	kış	1.5	7.39	198.6	0.79
	ortalama	6.9	7.57	207.6	0.95

Tablo 3. Devamı
Table 3. Continuing

Örnekleme Noktası	Örnekleme Mevsimi	Sıcaklık (°C)	pH	Elektriksel İletkenlik (µS/cm)	Bulanıklık (ntu)
Döşeli köyü	ilkbahar	2.0	7.72	222.6	0.61
	yaz	13.7	7.45	247.0	0.88
	sonbahar	9.0	7.76	248.0	0.93
	kış	1.2	7.37	218.9	0.90
	ortalama	6.5	7.58	234.1	0.83
Köprücük köyü	ilkbahar	2.9	7.68	159.8	0.63
	yaz	12.4	7.39	172.8	0.97
	sonbahar	8.6	7.72	176.6	0.53
	kış	2.0	7.35	145.5	0.85
	ortalama	6.5	7.54	163.7	0.75

pH, tüketiciler üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmadığı için, sağlık temelli kılavuz değer önerilmemiştir. Ancak, içme suyu arıtımının tüm aşamalarında, evsel su sistemlerinde su şebekesi ve borularının korozyonunu en aza indirmek için pH kontrolüne dikkat edilmesi gerektiği bildirilmiştir. Klor ile dezenfeksiyon yapılan sularda, pH'nın 8.0'den az olması Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından önerilmiştir. Optimum pH, su bileşimi ve dağıtım sistemi yapı malzemeleri yapısına göre değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, pH kabul edilebilir kılavuz değeri 6.5-8.5 aralığı olarak önerilmiştir (WHO, 2017). Buna ilaveten, pH'nın standartlardan yüksek olmasının suyun tadını etkileyeceği, düşük olmasının ise suyu korozif yapabileceği rapor edilmiştir. Tablo 3'te verildiği üzere, örnekleme noktaları pH değeri 7.18-7.76 aralığında saptanmıştır. Bu değerlerin Sağlık Bakanlığı (2013) kriteri olan 6.5-9.5 değeri ile Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından önerilmiş 6.5-8.5 optimum pH aralığında olduğu belirlenmiştir. En düşük pH'nın kış mevsiminde 7.18, en yüksek pH'nın sonbahar mevsiminde 7.76 olduğu tespit edilmiştir. Örnekleme noktaları mevsimsel olarak kendi aralarında karşılaştırıldığında, örneklemelerin tamamında pH değerinin kış mevsiminde en düşük 7.18-7.39 aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu karşılaştırmada; ikinci düşük değer yaz mevsimi, üçüncü düşük değer ilkbahar mevsimi ve en yüksek değer ise sonbahar mevsimi olduğu saptanmıştır.

Elektriksel iletkenlik (EC) için, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) kılavuz değer önermemiştir. İletkenlik fazla olduğunda, su dağıtım sistemleri yapısına bağlı olarak korozyon oluşabilir. Mevsimlere göre saptanmış elektriksel iletkenlik sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Örnekleme noktaları EC değerleri, 106.4-356.0 µS/cm aralığında değişkenlik göstermiş olup, belirlenmiş olan bu değerlerin Sağlık Bakanlığı (2013) tarafından önerilmiş 2500 µS/cm parametre sınır

değeri aşmadığı saptanmıştır. EC'nin, en yüksek değeri Çamlıçatak köyü örnekleme noktasında yaz mevsiminde 356.0 µS/cm olarak tespit edilmiş, en düşük değeri ise Toki örnekleme noktasında kış mevsiminde 106.4 µS/cm olarak belirlenmiştir. Örnekleme noktalarının mevsimsel olarak genelinde; EC değerinin en yüksek olduğu mevsimi birinci sonbahar, ikinci yaz takip etmiştir. Örneklerin tamamında ise, üçüncü yüksek EC değerinin ilkbahar mevsimi, en düşük EC değerinin ise kış mevsimi olduğu tespit edilmiştir.

İçme sularında bulanıklık, inorganik veya organik kolloid maddeler nedeniyle oluşmaktadır. Su güvenliği için kontrol edilmesi önerilen bulanıklık, bazı yeraltı sularında, inert kil veya kireçtaşı partikülleri nedeniyle, dağıtım sistemlerinde de sistemin dışında kirli su girişinin, çökeltilerin ve biyofilmlerin bozulmasının bir sonucu olabilir. Bulanıklığın 4.0 ntu üzerinde çıplak gözle fark edilebileceği, dezenfeksiyon etkinliği için de 1.0 ntu'dan fazla olmaması, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından önerilmiştir. Ancak, kaynakların ve arıtmanın sınırlı olduğu veya hiç olmadığı su kaynaklarında bu kadar düşük bulanıklık seviyelerine ulaşamayabilir. Böyle durumlarda, 5.0 ntu değerinin altında, mümkünse de 1.0 ntu değeri altında, bulanıklık değeri tavsiye edilmiştir (WHO, 2017). Sağlık Bakanlığı (2013) tarafından "Tüketicilerce kabul edilebilir ve herhangi bir anormal değişim yok" ifadesi parametrik değer olarak belirtilmiştir. Tablo 3'te verildiği üzere bulanıklık parametresi, mevsimsel olarak örnekleme noktalarının yarısından fazlasında sonbahar mevsiminde en yüksek değerde, ikinci en yüksek değer ise kış mevsiminde olduğu saptanmıştır. En düşük seviyeler ise, ilkbahar ve yaz mevsimi olarak belirlenmiştir. Örnekleme noktaları bulanıklık değerleri, 0.15 ntu ile 1.46 ntu aralığında değişkenlik göstermiştir. En yüksek bulanıklık, Gölge köyü örnekleme noktasında sonbahar mevsiminde 1.46 ntu olarak belirlenmiştir.

Bulanıklığın 0.15 ntu olarak en düşük olduğu örnekleme noktası ise, Yaylacık köyü olarak rapor edilmiştir. Bulanıklık genel olarak değerlendirildiğinde, bulanıklığa tamamen inorganik maddeler, büyük oranda da organik yapıda maddeler neden olmaktadır. Örnekleme noktalarının tamamı, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından önerilmiş sınır değere uygundur.

İçme suyu örnekleme noktaları ve kimyasal parametre sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Florür için su kalite hedefi, kılavuz değer olarak 1.5 mg/L önerilmiştir. İçme suyu florür maruziyetine bağlı olarak, 0.9-1.2 mg/L aralığındaki konsantrasyonda, yaygın olarak %12-33 oranlarında dişlerde hafif florozis görülebilir ve hafif florozis uzman muayenesi ile tespit edilebilir. 1984 yılında belirlenmiş ve 1993 yılında yeniden teyit edilmiş olan 1.5 mg/L florür kılavuz değerinin revize edilmesi gerektiğine dair net veri tespit edilmemiştir. Buna ilaveten, florür konsantrasyonunun 1.5 mg/L'nin üzerinde olduğu durumlarda, diş florozis riskinin artabileceği ve çok yüksek konsantrasyonlarda da iskelet florozis nedeni olabileceği rapor edilmiştir (WHO, 2017). Örnekleme noktalarında Tablo 4'de sunulduğu üzere, florür seviyesinin 0.01-0.32 mg/L aralığında değişkenlik gösterdiği ve her örnekleme noktası mevsimsel olarak incelendiğinde, mevsimler arasında önemli farkların olmadığı belirlenmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) ve Sağlık Bakanlığı (2013), içme sularında 1.5 mg/L'den düşük florür seviyesini tavsiye etmiştir. Dolayısıyla, örneklerin tavsiye değeri aşmadığı saptanmıştır.

Klorür için, içme sularında sağlığa dayalı kılavuz değer tavsiye edilmemiş olup, bununla birlikte 250 mg/L'den yüksek klorür konsantrasyonlarının içme sularında saptanabilir tade neden olabileceği Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından rapor edilmiştir. Klor konsantrasyonu yüksek ise, suyun alkalinitesine bağlı olarak dağıtım sisteminde metallerin korozyon oranının artacağı, dolayısıyla metal konsantrasyonları artışının nedeni olabileceği bildirilmiştir (WHO, 2017). Ayrıca klorürün, suya toksik etkisi olmadığı, suyun normal bileşeni olarak kabul edildiği ve toprak oluşumları tarafından adsorplanmadığı bilinmektedir. Bu nedenle, içme sularında klorür önemli bir parametredir. Klorür içme sularında, Sağlık Bakanlığı (2013) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından 250 mg/L olarak önerilmiştir. Tablo 4'te verildiği üzere, örnekleme noktalarında en yüksek klorür seviyesi 11.94 mg/L olarak tespit edilmiştir. Döşeli köyü örnekleme noktasında yaz mevsiminde belirlenmiş olan bu

değerin, önerilen seviyenin altında olduğu saptanmıştır. Klorür, Gürçayır köyü örnekleme noktasında; 6.93 mg/L ile en yüksek yaz mevsiminde, 2.11 mg/L ile en düşük ilkbahar mevsiminde tespit edilmiştir. Yaylacık köyü, Hayvan pazarı, Kura park, Karagöl, Kaptanpaşa, Sanayi Bölgesi, Gölge köyü, Köprücük köyü örnekleme noktalarında mevsimlerin tamamında klorürün 2 mg/L ve altı seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Klorür seviyesi mevsimsel olarak; Toki, Çamlıçatak köyü, Taşlıdere köyü-1, Taşlıdere köyü-2 örnekleme noktalarında 3.95 mg/L ve altı seviyelerde saptanmıştır.

İçme sularında Nitrit ve Nitrat için, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından sağlık temelli kılavuz değer sırasıyla 3 ve 50 mg/L olarak önerilmiştir. Nitrit nispeten kararsız olup, hızla nitrate oksitlenebilir. Nitrat, tarımsal faaliyetlerde fazla inorganik azotlu gübre ve gübre uygulamalarının sonucu olarak, atıksu bertarafı dahil insan ve hayvan dışındaki azotlu atık ürünlerin oksidasyonu ile yeraltı ve yüzey sularına ulaşabilir. Yetişkinlerde, çocuklarda, özellikle biberonla beslenen bebeklerde nitrat alımının yüksek olması sonucu, methemoglobinemi görülmektedir. Methemoglobinemiye karşı koruma için belirtilmiş kılavuz değer önemlidir (WHO, 2017). Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) ve Sağlık Bakanlığı (2013) tarafından nitrat seviyesinin, 50 mg/L'nin altında olması tavsiye edilmiştir. Örnekleme noktalarında, en yüksek nitrat seviyesinin kış mevsiminde 7.52 mg/L ile Gürçayır köyü örnekleme noktasında ve bu değer tavsiye edilmiş standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4). En düşük nitrat, mevsimlerin tamamında 2.60 mg/L ve altı seviyelerde Toki, Yaylacık köyü, Hayvan pazarı, Kura park, Karagöl, Kaptanpaşa örnekleme noktalarında belirlenmiştir. Sağlık Bakanlığı (2013) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından nitrit sınır değer seviyesi, sırasıyla 0.5 mg/L ve 3 mg/L olarak önerilmiştir. Örnekleme noktalarında yaz ve ilkbahar mevsimlerinde nitrit tespit edilememiş olup, tespit edilmiş olan mevsimlerde de 0.05 mg/L ve altı nitrit seviyeleri olduğu, bu değerlerin de önerilmiş standartları aşmadığı belirlenmiştir. Nitrat ve nitrit seviyesinin, özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun yapıldığı bölgelerde tavsiye edilmiş olan kriterlerin çok üzerinde olduğu literatür araştırmalarında saptanmıştır. Ardahan ilinde, iklim şartları nedeniyle tarımsal faaliyet yapılmamaktadır. Nitrat ve nitrit seviyesinin çok düşük tespit edilmesi veya tespit edilememiş olması, bu bölgede tarımsal faaliyetlerin yapılmaması ile açıklanabilir.

Tablo 4. Kimyasal parametreler
Table 4. Chemical parameters

Örnekleme Noktası	Örnekleme Mevsimi	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)
Toki (Devlet Hastanesi bölgesi)	ilkbahar	0.05	2.99	0.01	-	0.10	11.17	-	5.22	2.78
	yaz	0.07	3.95	-	-	0.49	6.66	0.17	3.61	7.27
	sonbahar	0.01	0.35	0.70	-	0.08	3.67	-	2.52	2.50
	kış	0.03	1.45	1.67	0.02	0.26	7.73	0.13	4.72	3.86
	ortalama	0.04	2.19	0.60	0.005	0.23	7.31	0.08	4.02	4.10
Gürçayır köyü	ilkbahar	0.01	2.11	-	-	0.17	14.53	0.01	1.65	24.48
	yaz	0.13	6.93	-	-	1.64	8.49	0.41	10.11	35.87
	sonbahar	0.02	6.24	5.25	0.02	1.96	8.82	0.49	3.31	5.63
	kış	0.06	3.13	7.52	0.01	0.97	4.35	0.09	6.28	12.45
	ortalama	0.06	4.60	3.19	0.008	1.19	9.05	0.25	5.34	19.61
Yaylacık köyü	ilkbahar	0.02	0.91	0.01	-	2.70	12.53	0.05	13.69	8.88
	yaz	0.16	1.77	-	-	0.45	10.95	0.64	10.48	17.55
	sonbahar	0.08	0.46	1.43	0.01	0.44	7.64	0.25	8.09	8.90
	kış	0.12	0.92	2.60	0.01	0.40	12.65	0.94	14.52	14.14
	ortalama	0.10	1.02	1.01	0.005	1.00	10.94	0.47	11.70	12.37
Hayvan Pazarı	ilkbahar	0.01	0.82	-	-	3.05	11.44	0.01	0.05	5.14
	yaz	0.06	0.98	-	-	0.54	11.48	0.60	6.54	15.17
	sonbahar	0.01	0.22	0.56	-	0.10	2.78	0.01	2.06	2.82
	kış	0.01	0.24	1.23	-	0.10	4.25	0.08	2.17	4.11
	ortalama	0.02	0.57	0.45	-	0.95	7.49	0.18	2.71	6.81
Kura park	ilkbahar	0.01	0.83	0.02	-	2.83	12.54	0.02	0.14	5.71
	yaz	0.04	2.00	-	-	0.32	9.30	0.25	4.91	10.14
	sonbahar	0.01	0.48	1.02	-	0.11	5.34	0.02	3.56	2.41
	kış	0.03	1.35	1.53	0.02	0.22	7.61	0.11	4.68	4.77
	ortalama	0.02	1.17	0.64	0.005	0.87	8.70	0.10	3.32	5.76
Karagöl	ilkbahar	0.02	1.39	-	-	5.16	11.13	0.05	1.52	9.81
	yaz	0.05	1.88	-	-	0.28	8.93	0.19	4.61	9.54
	sonbahar	0.01	0.41	0.82	-	0.08	3.72	0.01	2.14	1.91
	kış	0.01	0.67	1.29	0.05	0.19	9.04	0.08	3.74	4.53
	ortalama	0.02	1.09	0.53	0.013	1.43	8.21	0.08	3.00	6.45
Kaptanpaşa	ilkbahar	0.08	0.75	-	-	3.62	13.28	0.07	3.69	7.47
	yaz	0.05	0.81	-	-	0.32	7.56	0.17	3.53	8.33
	sonbahar	0.09	0.67	1.39	-	0.33	7.49	1.51	1.15	5.74
	kış	0.02	0.69	1.22	-	0.21	15.38	0.09	3.84	4.17
	ortalama	0.06	0.73	0.65	-	1.12	10.93	0.46	3.05	6.43
Sanayi Bölgesi	ilkbahar	0.01	0.88	-	-	5.63	11.32	0.37	11.11	13.79
	yaz	0.09	0.94	-	-	0.52	10.71	0.48	5.39	14.19
	sonbahar	0.01	0.14	1.25	-	0.50	4.19	0.99	2.12	2.69
	kış	0.12	0.67	6.34	0.02	0.97	14.04	1.02	10.21	17.35
	ortalama	0.06	0.66	1.90	0.005	1.91	10.07	0.72	7.21	12.01
Çamlıçatak köyü	ilkbahar	0.02	2.31	0.10	-	9.86	14.54	0.40	11.93	5.85
	yaz	0.22	3.35	-	-	1.96	24.99	1.25	15.53	20.71
	sonbahar	0.07	0.76	3.63	0.01	0.79	10.21	0.01	8.81	6.03
	kış	0.11	2.62	6.71	0.02	1.39	28.95	1.71	22.76	9.67
	ortalama	0.11	2.26	2.61	0.008	3.50	19.67	0.84	14.76	10.57
Taşlıdere köyü-1	ilkbahar	0.10	3.65	0.13	-	0.03	15.93	0.34	19.22	8.12
	yaz	0.28	2.00	-	-	0.99	15.79	0.94	8.19	15.65
	sonbahar	0.16	0.49	1.57	-	0.34	8.46	0.08	7.59	9.35
	kış	0.12	0.93	3.37	0.01	0.76	16.96	1.15	13.64	13.63
	ortalama	0.17	1.77	1.27	0.003	0.53	14.29	0.63	12.16	11.69
Taşlıdere köyü-2	ilkbahar	0.19	2.48	0.18	-	0.40	16.79	0.67	21.54	3.72
	yaz	0.32	1.84	-	-	1.49	15.16	0.96	7.24	19.06
	sonbahar	0.13	1.58	5.26	0.01	1.09	7.70	1.23	4.96	6.88
	kış	0.24	1.79	5.77	0.02	1.26	18.59	1.42	14.19	18.93
	ortalama	0.22	1.92	2.80	0.008	1.06	14.56	1.07	11.98	12.15
Gölgeli köyü	ilkbahar	0.03	1.21	-	-	0.01	11.91	0.10	11.01	18.18
	yaz	0.20	1.86	-	-	0.55	11.14	0.39	4.94	31.26
	sonbahar	0.09	0.84	2.88	0.01	0.39	11.64	0.51	9.83	5.07
	kış	0.16	1.30	4.53	0.02	0.47	17.98	1.43	13.02	24.45
	ortalama	0.12	1.30	1.85	0.008	0.36	13.17	0.61	9.70	19.74

Tablo 4. Devamı
Table 4. Continuing

Örnekleme Noktası	Örnekleme Mevsimi	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)
Döşeli köyü	ilkbahar	0.02	2.09	-	-	0.08	14.92	0.66	10.09	15.28
	yaz	0.17	11.94	-	-	0.52	11.10	0.41	3.61	26.36
	sonbahar	0.07	1.02	3.01	0.01	0.37	11.61	0.46	9.92	3.61
	kış	0.21	1.79	5.35	0.02	0.56	20.77	1.61	16.12	30.52
	ortalama	0.12	4.21	2.09	0.008	0.38	14.60	0.79	9.94	18.94
Köprücük köyü	ilkbahar	0.05	0.79	-	-	0.12	11.51	0.19	10.60	6.09
	yaz	0.23	1.88	-	-	0.40	9.76	0.10	1.62	17.15
	sonbahar	0.11	0.91	3.15	0.01	0.32	10.38	0.01	6.66	4.61
	kış	0.20	0.58	5.82	0.02	0.36	18.34	0.54	10.07	21.31
	ortalama	0.15	1.04	2.24	0.008	0.30	12.50	0.21	7.24	12.29

Sülfatın içme sularında fazla olması, suda fark edilebilir tat oluşturmaktadır. Bu tat bozukluğunun 250 mg/L altındaki sülfat seviyelerinde minimum olduğu ve sülfatın yüksek seviyelerinin tüketici bünyesine bağlı olarak müshil etkisi gösterebileceği rapor edilmiştir (WHO, 2017). Çalışmada, Çamlıçatak köyü haricinde, Tablo 4'te sunulduğu üzere örnekleme noktalarının tamamında mevsimsel olarak 5.63 mg/L ve altı seviyelerde sülfat tespit edilmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) ve Sağlık Bakanlığı (2013) içme sularında sülfatı, 250 mg/L olarak tavsiye etmiştir. Örnekleme noktalarında, en yüksek sülfat seviyesi ilkbahar mevsiminde Çamlıçatak köyü noktasında 9.86 mg/L olarak belirlenmiştir. Sülfat sonuçları, tavsiye değerini aşılmadığını ve mevsimler arasında önemli dalgalanmaların olmadığını göstermiştir.

Sodyum için Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından, içme suyunun günlük alıma katkısı küçük olduğundan, sağlık temelli kılavuz değer önerilmemiştir. İçme suyunda sodyumun tat eşiği konsantrasyonu, ilgili anyon ve sıcaklığa bağlı olup, yaklaşık 200 mg/L olarak bildirilmiştir. 200 mg/L'den fazla konsantrasyonlar, kabul edilemez tat ile ilişkilendirilmiştir (WHO, 2017). İçme sularında sodyum seviyesi, Sağlık Bakanlığı (2013) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından 200 mg/L olarak tavsiye edilmiştir. Tablo 4'de verildiği üzere, örnekleme noktaları kendi aralarında mevsimsel olarak değerlendirildiğinde, mevsimler arasında önemli farkların olmadığı belirlenmiştir. Örneklerin sodyum seviyesi, 2.78-28.95 mg/L aralığında değişkenlik göstermiş ve bu aralığın tavsiye değeri aşmadığı saptanmıştır.

İçme sularında potasyum varlığının, potasyuma duyarlı insanlarda kalp hastalığı, hipertansiyon, diyabet gibi bazı sağlık etkilerinin nedeni olabileceği belirtilmiştir (WHO, 2017). Duyarlılığa bağlı olan potasyum için, Sağlık Bakanlığı (2013)

ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından sağlık temelli kılavuz değer önerilmemiştir. Tablo 4'te sunulduğu üzere, potasyum için örnekleme noktaları mevsimsel olarak değerlendirildiğinde, mevsimler arası önemli farkların olmadığı, potasyum seviyesinin en yüksek 1.71 mg/L olduğu saptanmıştır.

Kalsiyum iyonunun tat eşiği, ilişkili anyona bağlı olarak 100-300 mg/L aralığında Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından rapor edilmiştir. pH ve alkalinite gibi faktörlerin etkisi ile, 200 mg/L'nin üzerinde sertliğe sahip olan sularda, arıtma işleminde, dağıtım sistemlerinde, bina boruları ve tanklarında kireç birikimi olabilir. İçme sularında magnezyum ve kalsiyum konsantrasyonları, su dağıtım sistemine uygun suyun sağlanması için teknik gerekliliğe uygun olmalıdır. Epidemiyolojik çalışmalar kapsamında magnezyumun, kardiyovasküler mortalite üzerinde koruyucu etkisi olduğuna dair verilere rağmen, nedeni net açıklanamamış olup, ileri araştırmalar yapıldığı bildirilmiştir (WHO, 2017). Bu nedenle, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) sağlık temelli kılavuz değer önermemiştir. Kalsiyum ve Magnezyum için, Sağlık Bakanlığı (2013) tarafından da kılavuz değer tavsiye edilmemiştir. Tablo 4'de verildiği üzere, örnekleme noktalarının magnezyum seviyesinin 0.05-22.76 mg/L ve kalsiyum seviyesinin 1.91-35.87 mg/L aralığında olduğu belirlenmiştir.

Doğal suların bileşiminde gözlemlenen kimyasal ve fiziksel özellik farklılığı, akifer yapısının heterojenliği ile açıklanabilir (Güler & Thyne, 2004; Gorelick & Zheng, 2015). Ardahan ilinde, örnekleme yapılan 14 lokasyonun şebeke suları, aynı su kaynağından temin edilmemektedir. Su kaynaklarının fiziksel ve kimyasal parametrelerinin farklı olması, suyun içinde bulunduğu akifer yapısının jeolojik mineralleri ile ilişkili olabilir. Buna ilaveten, şebeke dağıtım

sisteminin yapısı da fiziksel ve kimyasal parametreleri etkileyebilir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Çalışmada, Ardahan ilinde 14 örnekleme noktasında mevsimsel olarak alınmış şebeke sularının bazı fiziksel, kimyasal ve mikrobiyal parametreleri incelenmiştir. Parametre sonuçlarının, Dünya Sağlık Örgütü ve Sağlık Bakanlığı kriterlerine uygunluğu değerlendirilmiş ve halk sağlığı açısından riskli olup olmadığı belirlenmiştir. Şebeke sularının fiziksel (sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik, bulanıklık) ve kimyasal (F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}) parametre sonuçlarının, tüm örnekler için içme ve kullanma suyu açısından önerilen kriterlere uygun olduğu tespit edilmiştir. Mikrobiyal (koliform bakteri) analiz sonucunda, kış mevsiminde örnekleme noktalarının tamamında ve ilkbahar mevsiminde de iki örnekleme noktası dışında koliform bakteri belirlenmemiştir. Yaz ve sonbahar mevsimlerinde, bazı örnekleme noktalarında saptanan mikrobiyal kirliliğin, sıcaklık kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Tüketiciler, su ihtiyaçlarını şebeke sularından karşıladığı için, şebeke suyu kalitesine önem verilmelidir. Araştırma bölgesinde, izlenen parametrelerin ve analiz yapma sıklığının artırılması, şebeke sularının güvenliği hususunda daha kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışmanın saha çalışmalarına destek veren, Çevre Mühendisliği Bölümü öğrencileri Moaz Erssan ve Fares Hareish'e teşekkür ederim.

Yazar katkısı

Author contribution

Çalışmanın saha, laboratuvar, yazım dahil her aşaması yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

References

- Ardahan Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. (2020). *Ardahan İli 2019 Yılı Çevre Durum Raporu*. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/ardahan_2019_cevre_durum_raporu-20200804145847.pdf
- Ashbolt, N. J. (2004). Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. *Toxicology*, *198*, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2004.01.030>
- Auld, H., MacIver, D., & Klaassen, J. (2004). Heavy rainfall and waterborne disease outbreaks: The walkerton example. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, *67*, 1879-1887. <https://doi.org/10.1080/15287390490493475>
- Bhatt, S. M., & Shilpa. (2015). Operational procedures and reliability for safe drinking water. *J Bioremediation & Biodegradation*, *6*(1), 160. doi:10.4172/2155- 6199.1000e160
- Camper, A. K., McFeters, G. A., Characklis, W. G., & Jones, W. L. (1991). Growth kinetics of Coliform Bacteria under conditions relevant to drinking water distribution systems. *Applied and Environmental Microbiology*, *57*(8), 2233-2239. <https://doi.org/10.1128/aem.57.8.2233-2239.1991>
- Delpa, I., Jung, A.-V., Baures, E., Clement, M., & Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*, *35*, 1225-1233. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.07.001>
- Ghosh, P., Banerjee, M., De Chaudhuri, S., Chowdhury, R., Das, J. K., Mukherjee, A., Sarkar, A. K., Mondal, L., Baidya, K., Sau, T. J., Banerjee, A., Basu, A., Chaudhuri, K., Ray, K., & Giri, A. K. (2007). Comparison of health effects between individuals with and without skin lesions in the population exposed to Arsenic through drinking water in west Bengal, India. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, *17*, 215-223. doi:10.1038/sj.jes.7500510
- Gorelick, S. M., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, *51*, 3031-3051. <https://doi.org/10.1002/2014WR016825>

- Goullé, J. P., Sausseureau, E., Mahieu, L., Bouige, D., Groenwont, S., Guerbet, M., & Lacroix, C. (2009). Application of inductively coupled plasma mass spectrometry multielement analysis in fingernail and toenail as a biomarker of metal exposure. *Journal of Analytical Toxicology*, 33, 92-98. <https://doi.org/10.1093/jat/33.2.92>
- Güler, C., & Thyne, G. D. (2004). Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*, 285, 177-198.
- Halkman, A. K., & Sağdaş, O. E. (2014). *Mikrobiyoloji El Kitabı*. MerckMillipore.
- Herranz, S., Marciello, M., Marco, M-P., Garcia-Fierro, J. L., Guisan, J. M., & Moreno-Bondi, M. C. (2018). Multiplex environmental pollutant analysis using an array biosensor coated with chimeric Hapten-dextran-lipase constructs. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 257, 256-262. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.10.134>
- Huck, P. M., & Coffey, B. M. (2004). The importance of robustness in drinking-water systems. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 67, 1581-1590. <https://doi.org/10.1080/15287390490491891>
- Kaale, L. D., & Katima, J. H. Y. (2013). Performance of activated carbons in the catalytic wet peroxide oxidation (CWPO) of maleic acid. *Journal of Engineering and Technology Research*, 5(6), 189-199. <https://doi.org/10.5897/JETR09.061>
- LeChevallier, M. W., Schulz, W., & Lee, R. G. (1991). Bacterial nutrients in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(3), 857-862. <https://doi.org/10.1128/aem.57.3.857-862.1991>
- LeChevallier, M. W., Welch, N. J., & Smith, D. B. (1996). Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(7), 2201-2211. <https://doi.org/10.1128/aem.62.7.2201-2211.1996>
- Li, P., & Wu, J. (2019). Drinking water quality and public health. *Exposure and Health*, 11, 73-79. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00299-8>
- Majumdar, D. (2003). The blue baby syndrome, nitrate poisoning in humans. *Resonance*, 8, 20-30.
- Meenakshi., & Maheshwari, R. C. (2006). Fluoride in drinking water and its removal. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 456-463. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.024>
- Mintz, E. D., Reiff, F. M., & Tauxe, R. V. (1995). Safe water treatment and storage in the home, A practical new strategy to prevent waterborne disease. *JAMA*, 273(12), 948-953. [doi:10.1001/jama.1995.03520360062040](https://doi.org/10.1001/jama.1995.03520360062040)
- Nature Life. (2021, Ocak 04). *Suyun sıcaklığı ve Suyun lezzeti*. <http://www.suaritmasistem.net/suyun-onemi.php>.
- Oymak, O. F. (2011). *Aydın ilinde tüketilen şişelenmiş suların mikrobiyolojik kalitesi üzerine bir çalışma* [Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü].
- Pardue, J. H., Moe, W. M., Mcinnis, D., Thibodeaux, L. J., Valsaraj, K. T., Maciasz, E., Van Heerden, I., Korevec, N., & Yuan, Q. Z. (2005). Chemical and microbiological parameters in new orleans flood water following hurricane katrina. *Environmental Science & Technology*, 39(22), 8591-8599. <https://doi.org/10.1021/es0518631>
- Prüss-Ustün, A., Bartram, J., Clasen, T., Colford Jr, J. M., Cumming, O., Curtis, V., Bonjour, S., Dangour, A. D., De France, J., Fewtrell, L., Freeman, M. C., Gordon, B., Hunter, P. R., Johnston, R. B., Mathers, C., Mausezahl, D., Medlicott, K., Neira, M., Stocks, M., Wolf, J., & Cairncross, S. (2014). Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene in low- and middle-income settings: A retrospective analysis of data from 145 countries. *Tropical Medicine and International Health*, 19(8), 894-905. <https://doi.org/10.1111/tmi.12329>
- Rose, J. B., Daeschner, S., Easterling, D. R., Curriero, F. C., Lele, S., & Patz, J. A. (2000). Climate and waterborne disease outbreaks. *Journal American Water Works Association*, 92(9), 77-87. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2000.tb09006.x>
- Sağlık Bakanlığı (Türkiye Halk Sağlığı Kurumu). İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelikte değişiklik yapılmasına dair yönetmelik (2013). *T. C. Resmi Gazete* (28580, 7 Mart 2013).
- Sato, Y., Ishihara, M., Fukuda, K., Nakamura, S., Murakami, K., Fujita, M., & Yokoe, H. (2018). Behavior of nitrate-nitrogen and nitrite-nitrogen in drinking water. *Biocontrol Science*, 23(3), 139-143. <https://doi.org/10.4265/bio.23.139>
- Schoenen, D. (2002). Role of disinfection in suppressing the spread of pathogens with drinking water: Possibilities and limitations. *Water Research*, 36, 3874-3888. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00076-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00076-3)
- Smith, A. H., Hopenhayn-Rich, C., Bates, M. N., Goeden, H. M., HertzPicciotto, I., Duggan, H. M., Wood, R., Kosnett, M. J., & Smith, M. T. (1992). Cancer risks from arsenic in drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 97, 259-267. <https://doi.org/10.1289/ehp.9297259>

- Sow, S., J. de Vlas, S., Engels, D., & Gryseels, B. (2002). Water-related disease patterns before and after the construction of the Diama Dam in Northern Senegal. *Annals of Tropical Medicine & Parasitology*, 96(6), 575-586. <https://doi.org/10.1179/000349802125001636>
- Thomas, M. K., Charron, D. F., Waltner-Toews, D., Schuster, C., Maarouf, A. R., & Holt, J. D. (2006). A role of high impact weather events in waterborne disease outbreaks in Canada, 1975 - 2001. *International Journal of Environmental Health Research*, 16(3), 167-180. <https://doi.org/10.1080/09603120600641326>
- TOBMGM-Tarım ve Orman Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2020, Ekim 16). *İllerimize Ait Genel İstatistik Verileri*. <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=ARDAHAN>.
- Van Leeuwen, F. X. R. (2000). Safe drinking water: The toxicologist's approach. *Food and Chemical Toxicology*, 38(1), S51-S58. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(99\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(99)00140-4)
- World Health Organization. (2008). *Guidelines for Drinking-Water Quality* (Third Edition). Incorporating the First and Second Addenda, Vol. 1, Geneva, WHO.
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for Drinking-Water Quality* (Fourth Edition). Incorporating the First Addendum, Switzerland, WHO.

The existence problem of difference sets

Fark kümelerinin varlık problemi

Emek DEMİRCİ AKARSU*^{1, a}, Safiye ÖZTÜRK^b

¹Department of Mathematics, Recep Tayyip Erdoğan University, 53100, Rize

• Geliş tarihi / Received: 19.04.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 17.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 26.06.2022

Abstract

The existence problem of difference sets in a group becomes more interesting since the applications of difference sets on real life problems become more common. There are several construction methods for difference sets: the relation among parameters, nonexistence of difference sets (Bruck Ryser Chowla Theorem), multipliers etc. A similar problem for symmetric designs along with an investigation of Bruck Ryser Chowla theorem has been discussed by the writers (Sakarya University Journal of Science). In this paper, we study the existence problem of difference sets in a more general concept by using difference sets parameters, BRC Theorem, and an algorithm written in MATLAB.

Keywords: Algorithm in MATLAB, Bruck Ryser Chowla theorem, Difference sets

Öz

Fark kümelerinin gerçek hayat problemlerine uygulamaları arttıkça, bir grup üzerinde tanımlanan fark kümelerinin varlık problemi daha ilgi çekici hale gelmiştir. Fark kümelerinin birçok oluşturma metodu vardır: parametreler arası ilişkiler, fark kümelerinin var olmama teoremi (Bruck Ryser Chowla Teoremi), çarpanlar vb. Simetrik tasarım için benzer bir problem yine Bruck Ryser Chowla Teoremi'nin araştırılmasıyla yazarlar tarafından çalışılmıştır (Sakarya Üniversitesi Bilim Dergisi). Bu makalede fark kümelerinin varlık problemini; fark kümelerinin parametrelerini, BRC Teoremini ve MATLAB'da yazılmış bir algoritmayı kullanarak daha genel bir açıyla inceliyoruz.

Anahtar kelimeler: MATLAB algoritma, Bruck Ryser Chowla teoremi, Fark kümeleri.

*a Emek DEMİRCİ AKARSU; emek.akarsu@erdogan.edu.tr, Tel: (0464) 223 61 26, orcid.org/0000-0003-4769-0830

^b orcid.org/0000-0002-6494-6175

1. Introduction

1. Giriş

Difference sets are algebraic constructions that bridge group theory, geometry and combinatorics. The definition of difference sets is combinatorial; however, there are strong connections to algebra especially in finite groups. Their applications vary from coding theory to statistics, from physics to computer sciences, and from engineering to communications. In the late 30's, Singer introduced the first class of difference sets (Singer, 1939), and the study of difference sets became common with discovering the concept of multipliers of difference sets (Hall) (Hall, 1947). Then difference sets in general groups were studied in 1955 (by Bruck) (Bruck, 1955). There is a relation between difference sets and finite sequences (Golomb) (Golomb, 1999), when the existence of a difference set on a cyclic group means there exists a particular periodic sequence with optimal autocorrelation properties. Formal definition of a difference set is as follows;

Definition 1.1. Let D be a k -element subset of a group G of order v . If the multiset Δ formed by $d_i, d_j \in D$ and $d_i * d_j^{-1}$ contains each of the non-identity elements of G exactly λ times, then this subset D is called a (v, k, λ) difference set in group G . Since the groups used in creating the difference set are usually additive groups, the definition can be given as follows: Let G be a finite group and $|G| = v$. Let $\emptyset \neq D \subseteq G$ it consists of k elements of the remaining classes in modulo v with $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$, $|D| = k$. for every $d_i, d_j \in D$, $d_i \neq d_j$ and $\alpha \in G$, $\alpha \neq 1_G \pmod{v}$, congruence $d_i - d_j \equiv \alpha \pmod{v}$ contains exactly λ times (d_i, d_j) solution pairs. The multiset in here is defined by $\Delta = \{d_i - d_j \mid d_i, d_j \in D, d_i \neq d_j\}$. The (v, k, λ) parameter system in this structure will give $D \subseteq G$ difference set. If the group G is multiplicative, then difference set congruence $d_i d_j^{-1} \equiv \alpha \pmod{v}$ contains exactly λ times (d_i, d_j) solution pairs. The multiset is this time defined accordingly $\Delta = \{d_i d_j^{-1} \mid d_i, d_j \in D, d_i \neq d_j\}$ (Lander, 1983).

Even though difference sets can be seen similar to a subgroup however they have opposite structure. The differences of elements of a subgroup include in whole subgroup since it has closure property while difference sets have elements of differences spanned uniformly inside the original group.

One of the main and simplest theorems of construction of difference set is stated below.

Theorem 1.1. Let D be a (v, k, λ) -difference set, with $D \subset G$. In this case, there is a $k(k-1) = \lambda(v-1)$ relationship between the parameters. Then $n = k^2 - \lambda v$ (Schützenberger, 1949). n is defined as the size of difference sets here.

Many difference sets can be constructed by exploiting combinatorial properties and algebraic structures. Some obvious examples of difference sets follow immediately from their definition. For example, any set with one item and the empty set are simple difference sets with $\lambda = 0$, whereas the whole group G itself is also a difference set for $\lambda = v$. These examples are simple facts of the difference set construction and are usually negligible. It is also known that the complement of a difference set is a difference set. The proof of the theorem exploits the need of the group ring $Z[G]$. Group ring structure, defined as the polynomials with integer coefficients whose variables are the group elements, they are used working on the properties of difference sets and their construction methods.

In a cyclic group, its automorphisms and translation properties employing a difference set outcomes in another difference set (Baumert, 1971).

In addition to these certain trivial results, many more challenging construction approaches have been studied while difference sets theory has advanced. Yet, the most sophisticated investigation in the field is still unsolved: For any given group G , can we figure out if the group G has a difference set? If it does, how might it be constructed?

In this paper, an existence problem for a difference set is investigated. One of the main tools of showing existence is Bruck Ryser and Chowla Theorem. By means of this theorem, the example of difference sets and non-difference sets of for suitable parameters for symmetric designs and later for difference sets are given by the codes written on MATLAB.

In this study, the existence problem of a difference set in a group is examined by exploiting Bruck Ryser Chowla Theorem. Nonexistence examples of difference sets are eliminated by codes written in MATLAB. Known difference sets with appropriate parameters in the literature are listed by using MATLAB codes (Lehmer, 1953). Some difference sets results when v is odd are listed by Bruck Ryser

Chowla Theorem. An algorithm for construction difference sets in the main program is given and all the examples of symmetric designs till $v = 60$ are obtained. How many suitable (v, k, λ) parameters with the condition $k(k-1) = \lambda(v-1)$ are for possible difference sets are found and listed? In our work, in general, a simpler way of determining difference sets is shown (Öztürk, 2020).

2. Existence problem

2. Varlık problemi

Bruck-Ryser-Chowla Theorem is one of the most important methods of determining if a particular difference set cannot exist providing the conditions for (v, k, λ) symmetric designs (non)- existence. This theorem also restricts the parameters of a difference set and explains how the solutions of a linear diophantine equation affect the existence of a symmetric design. After Bruck Ryser Chowla theory was first proven for $\lambda = 1$ (Bruck & Ryser, 1949), the writers have extended the result for any positive λ (Bruck & Ryser, 1949; Chowla & Ryser, 1950).

In below, parameter $n = k - \lambda$ is called the order of symmetric design.

Theorem 2.1. (Bruck-Ryser-Chowla Theorem)

Let G be a group with degree v and (v, k, λ) symmetric design exists;

- If v is even, then n is a perfect square.
- If v is odd, Diophantine equation $x^2 = ny^2 + (-1)^{(v-1)/2} \lambda z^2$ has a nonzero solution in integers x, y, z .

Linear diophantine equation can also be rephrased when $v \equiv 3 \pmod{4}$ or $v \equiv 1 \pmod{4}$

$$x^2 = \begin{cases} \text{If } v \equiv 3 \pmod{4}, & ny^2 - \lambda z^2 \\ \text{If } v \equiv 1 \pmod{4}, & ny^2 + \lambda z^2. \end{cases}$$

(Bruck & Ryser, 1949; Chowla & Ryser, 1950; Ryser, 1982).

If the BRC statements become false for a certain set of parameters, then those parameters do not satisfy a difference set. However, if the above criteria are true, we say a difference set may be possible. In addition to that, it is safe to presume difference set exists whereas other tools must be used to explore its existence.

2.1. An algorithm for existence of difference sets

2.1. Fark kümelerinin varlığı için algoritma

With this algorithm we will determine whether a given parameter construct a symmetric design or not and therefore a difference set.

- A group with order v is given
- Test that v is a prime number
- If v is not a prime, the prime factors of v are computed.
- Possible (v, k, λ) parameters are calculated.
- New difference sets are determined by using the complement of difference sets.

Let $\lambda = \{1, 2, 3, \dots, (v-2)\}$ and $k = \frac{1 + \sqrt{1 + 4\lambda(v-1)}}{2}$

- Special parameter $n = k - \lambda$ is calculated.
- The BRC (Bruck- Ryser- Chowla) is used (Legendre Theorem is also used when needed)
- p is found if n is a prime power such that $n = p^m$, for $m \in \mathbb{Z}$ (Morrice, 2015).

For given v, k, λ parameters, after the first condition is hold, they are tested for the BRC theorem by the algorithm itemized above.

Suitable v, k, λ, n and multipliers of difference sets are listed (Baumert & Gordon, 2004).

2.2. MATLAB application of symmetric design (or difference sets)

2.2. Simetrik tasarım (veya fark kümesi) için MATLAB uygulaması

In this section, the stages of construction of difference sets with possible parameters by means of codes are given. According to entered (v, k, λ) values, the code controls whether there is a difference set with appropriate parameters. If there is the result is 1, if not the result is 0.

```
function g = symmetricdesign(v,k,lam)
g = 0;
Z = 0:(v-1);
D = nchoosek(0:v,k);
[n_D,~]= size(D);
tic
for j=1:n_D
    Dk = D(j,:);%
    B = zeros(v,k); %initialization
    for i=1:v
        B(i,:) = Dk+(i-1);%shifting
    end
    H = (B>=v). *B-v; %
    H(H<0)=0;
    B = (B<v). *B + H ;
% constructing vector A
A = zeros(v,v);
for ii = 1:v
    for jj=1:v
```

```

if ~isempty(find(Z(ii)==B(jj,:),1))
    A(jj,ii)=1;
end
end
end
toc
if A*A == lam*ones(v)+(k-lam)*eye(v)

```

```

g = 1;
return
end
%if Dk==[0 1 2]; disp(B);disp(A); disp(A'); disp(A*A);
end
clear B A
end

```

Table 1. For entered parameter v , calculating k and λ values for symmetric design.

Tablo 1. Girilen v parametresi için, simetrik dizayn oluşturabilecek k ve λ değerlerinin hesaplanması

v	k	λ	(v, k, λ)
7	3	1	(7,3,1)
11	5	2	(11,5,2)
13	4	1	(13,4,1)
15	7	3	(15,7,3)
19	9	4	(19,9,4)
21	5	1	(21,5,1)
23	11	5	(23,11,5)
31	6	1	(31,6,1)
31	15	7	(31,15,7)
35	17	8	(35,17,8)
37	9	2	(37,9,2)
43	21	10	(43,21,10)
47	23	11	(47,23,11)
59	29	14	(59,29,14)

2.3. Main programme

2.3. Ana program

This programme, first of all, checks whether or not parameters v , k , λ are convenient for difference set. Second, that controls if there are symmetric designs with these parameters or not. Third, the programme lists suitable difference sets. Since there is much of combination, MATLAB results in a long time.

```

for v = 7:2:60
    for k = 3:1:v/2
        for lam = 1:(k-1)
            s = brc_odd(v,k,lam);
            tic
            if s == 1
                g = symmetricdesign(v,k,lam);
                if g==1
                    fprintf('%i %i %i\n',v,k,lam)
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

When the code of main programme runs, the following symmetric designs of appropriate parameters by scanning v up to 60 are obtained.

```

(v, k, λ)=(7,3,1),(11,5,2),(13,4,1),(15,7,3),(19,9,4),(21,
5,1),(23,11,5),(31,6,1),(31,15,7),(35,17,8),(37,9,2),
(43,21,10),(47,23,11), (57,8,1),(59,29,14)

```

2.4. MATLAB application of possible difference set parameters

2.4. Olası fark küme parametreleri için MATLAB uygulaması

This code produces results of possible difference sets by the help of the relation of set parameters. This gives the number of symmetric designs of potential (v, k, λ) parameters with $k(k-1) = \lambda(v-1)$.

```

function setparameters(v)
if(mod(v,2)==0)
    value = v/2;
else
    value = (v-1)/2;
end
sayac=0;
for k=2:value
    lam = (k*(k-1))/(v-1);
    if (mod(lam,1)==0)
        disp(sprintf('(v,k,l)=(potential set for parameters
%1.0f,%1.0f,%1.0f)',v,k,lam))
        sayac=sayac+1;
    end
end
disp(sprintf('There are %1.0f potential difference
sets.',sayac))
end

```


The following complies potential set of parameters for given v with the condition $v(v - 1) = \lambda(k - 1)$.

Table 2. The number of potential difference sets for entered value v
Tablo 2. Girilen v değerinin fark kümesi oluşturan (v, k, λ) üçlüleri

$v = 6271$	$v = 2591$	$v = 5167$	$v = 15001$
(6271,210,7)	(2591,260,26)	(5167,288,16)	(15001,625,26)
(6271,286,13)	(2591,371,53)	(5167820,130)	(15001,5001,1667)
(6271,495,39)	(2591,630,153)	(5167,1107,237)	(15001,5625,2109)
(6271,760,92)	(2591,666,171)	(5167,1477,422)	
(6271,1045,174)	(2591,925,330)	(5167,1764,602)	
(6271,1255,251)	(2591,1036,414)	(5167,2296,1020)	
(6271,1540,378)	(2591,1295,647)	(5167,2583,1291)	
(6271,1596,406)			
(6271,1881,564)			
(6271,2091,697)			
(6271,2376,900)			
(6271,2641,1112)			
(6271,2850,1295)			
(6271,2926,1365)			
(6271,3135,1567)			

Table 3. Average working time for the number of potential difference sets for entered value v
Tablo 3. Girilen v değerinin olası fark kümelerinin programda çalışma süreleri

v	Function	The number of difference sets	Average working time for programme
2591	parameter (v)	7	0,17 second
5167	parameter (v)	7	0,11 second
6271	parameter (v)	15	0,65 second
15001	parameter (v)	3	0,96 second

Table 4. Average working time for the number of potential difference sets for entered value v
Tablo 4. Girilen v değerinin fark kümesi oluşturan üçlülerinin çalışma süreleri

(v, k, λ)	Function	1&0	Average working time for programme
(7,3,1)	symmetric (v, k, λ)	1	0,14 second
(11,5,2)	symmetric (v, k, λ)	1	0,16 second
(13,4,1)	symmetric (v, k, λ)	1	0,35 second
(15,7,3)	symmetric (v, k, λ)	1	0,45 second
(19,9,4)	symmetric (v, k, λ)	1	0,74 second
(21,5,1)	symmetric (v, k, λ)	1	1,21 second
(23,11,5)	symmetric (v, k, λ)	1	1,77 second
(31,6,1)	symmetric (v, k, λ)	1	4,45 second

Author contribution

Yazar katkısı

Emek DEMİRCİ AKARSU (%60): Conceptualization, Methodology, Supervisor, Programming, Writing - original draft, Writing - review & editing. Safiye ÖZTÜRK (%40): Conceptualization, Programming, Writing - review & editing.

Declaration of ethical code

Etik beyanı

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require any ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Conflicts of interest

Çıkar çatışması beyanı

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

Kaynaklar

- Baumert, L. D. (1971). *Cyclic difference sets*. (Vol. 182). California Institute of Technology Pasadena CA/USA. ISBN: 978-3540053682.
- Bruck, R. H., & Ryser, H. J. (1949). The nonexistence of certain finite projective planes. *Canadian Journal of Mathematics*, 1(1), 88-93. <https://doi.org/10.4153/CJM-1949-009-2>
- Bruck, R. H. (1955). Difference sets in a finite group, *Transactions of the American Mathematical Society*, 78(2), 464-481. <https://doi.org/10.2307/1993074>
- Chowla, S., & Ryser, H. J. (1950). Combinatorial problems. *Canadian Journal of Mathematics*, 2, 93-99. <https://doi.org/10.4153/CJM-1950-009-8>
- Demirci Akarsu E., & Öztürk, S. (2022). An existence problem for symmetric design: Bruck Ryser Chowla theorem. *Sakarya University Journal of Science*, 26(2), 241-248, <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.962817>
- Golomb, S. W. (1999). Construction of signals with favorable correlation properties, in difference sets, sequences and their correlation properties. *Kluwer Academic Publishers*, 542(448), 159-194. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4459-9_7
- Hall Jr, M. (1947). Cyclic projective planes. *Duke Mathematical Journal*, 14(4), <https://doi.org/10.1215/S0012-7094-47-01482-8>
- Lander, E. S. (1983). *Symmetric designs: An algebraic approach*. (Vol.74). London Mathematical Society, Lecture Note Series. Cambridge University. ISBN: 978-0-52128693-0
- Lehmer, E. (1953). On residue difference sets. *Canadian Journal of Mathematics*, 5, 425-432. <https://doi.org/10.4153/CJM-1953-047-3>
- Morrice, R. T. (2015). *Difference sets: An investigation into the properties and criteria for existence* [Master thesis, Carleton University].
- Öztürk, S. (2020). *Fark kümelerinin varlık problemi ve Bruck Ryser Chowla teoremi* [Master thesis, Institute of Science of Recep Tayyip Erdoğan University].
- Ryser, H. J. (1982). The existence of symmetric block designs. *Journal of Combinatorial Theory A*, 32(1), 103-105. [https://doi.org/10.1016/0097-3165\(82\)90068-1](https://doi.org/10.1016/0097-3165(82)90068-1)
- Schützenberger, M. P. (1949). A nonexistence theorem for infinite family of symmetrical block designs. *Annals of Human Genetics*, 14(1), 286-287. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1947.tb02404.x>
- Singer, J. (1938). A theorem in finite projective geometry and some applications to number theory. *Transactions of the American Mathematical Society*, 43(3), 377-385. <https://doi.org/10.2307/1990067>

Atmosferik basınçta imidazolyum tuzları ile CO₂'nin halkalı karbonatlara dönüşümü

Conversion of CO₂ to cyclic carbonates by imidazolium salts at atmospheric pressure

Emine AYTAR*^{1,a}

¹Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 63190, Şanlıurfa

• Geliş tarihi / Received: 25.04.2022

• Düzeltilek geliş tarihi / Received in revised form: 17.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 01.07.2022

Öz

Küresel ısınmaya neden olan CO₂ doğal olarak bol bulunan, ucuz, genellikle sentez reaksiyonları için yapı taşı olarak kullanılabilen, toksik olmayan karbon (C1) kaynağı ve katma değerli kimyasal olarak bilinen inert bir maddedir. Kinetik eylemsizliği ve termodinamik kararlılığı nedeniyle verimli kullanımı zor olan CO₂'nin bir katalizör yardımı ile halkalı karbonatlara dönüşümü en umut verici olan çalışmalardır. Bu nedenle bu çalışmada, 1-bütül-3-metilimidazolyum iyodür ([Bmim]I) ve 1-bütül-3-metilimidazolyum hekzaflorofosfat ([Bmim]PF₆) imidazolyum tuzları CO₂'nin epoksitler ile halkalı karbonatlara dönüşümünde katalizör olarak kullanılmıştır. Hem yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında hem de atmosferik basınç altında halkalı karbonatlara dönüşüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Otoklavda yüksek verim sağlayan iyonik sıvılar atmosferik ortamda da oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Atmosferik ortamda sürenin (2 saat ve 24 saat) ve sıcaklığın (60 °C ve 100 °C) etkisi ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İyonik sıvılar ile katalize edilen bu sürecin, CO₂'nin atmosferik ortamda kimyasal dönüşümü için de umut verici olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Epoksit, Halkalı karbonat, İlimli koşullar, İyonik sıvılar, Karbon dioksit

Abstract

CO₂, which causes global warming, is a naturally abundant, inexpensive, inert substance known as a non-toxic carbon (C1) source and value-added chemical, which can often be used as a building block for synthesis reactions. The conversion of CO₂, which is difficult to use efficiently due to its kinetic inertia and thermodynamic stability, to cyclic carbonates with the help of a catalyst are the most promising studies. Therefore, in this study, 1-butyl-3-methylimidazolium iodide ([Bmim]I) and 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ([Bmim]PF₆) imidazolium salts were used as catalysts in the conversion of CO₂ into cyclic carbonates with epoxides. Conversion studies to cyclic carbonates were carried out under both high pressure and high temperature and atmospheric pressure. Ionic liquids, which provide high efficiency in the autoclave, also gave very good results in the atmospheric ambient. Optimization studies were carried out with the effect of time (2 hours and 24 hours) and temperature (60 °C and 100 °C) in the atmospheric ambient. It has been determined that this process, catalyzed by ionic liquids, is also promising for the chemical conversion of CO₂ in the atmospheric ambient.

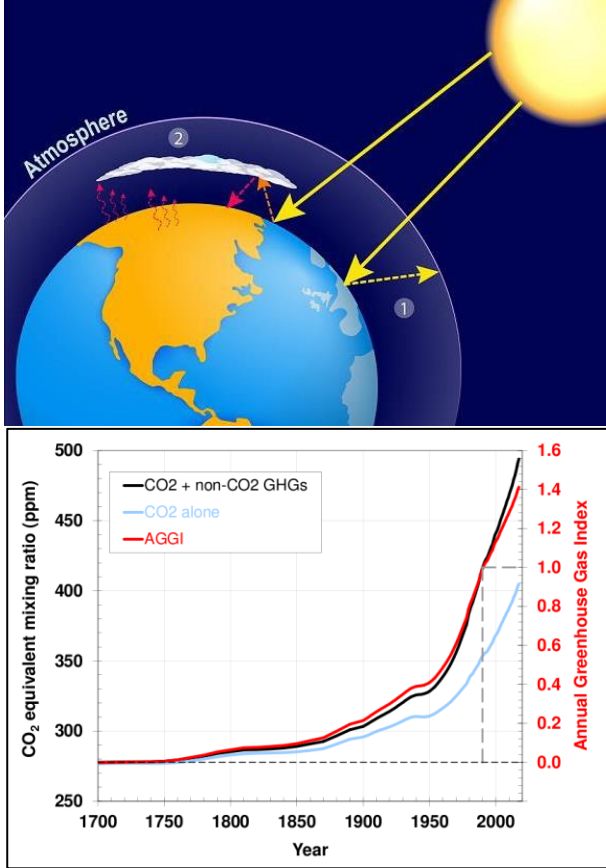
Keywords: Epoxide, Cyclic carbonate, Mild conditions, Ionic liquids, Carbon dioxide

*a Emine AYTAR; emineaytar@harran.edu.tr, Tel: (0414) 318 32 49, orcid.org/0000-0001-7572-8088

1. Giriş

1. Introduction

Küresel ısınma, oluşturduğu sera etkisi sebebiyle dünyadaki tüm canlıların yaşamlarını ilgilendiren ve onlar üzerinde olumsuz etkiler oluşturan önemli çevresel bir olaydır. Sera etkisine neden olan gazlar içerisinde en yüksek orana sahip olan CO₂ gazı, atmosfer ortamındaki seviyesinde meydana gelen artış ile dünya genelinde iklim değişikliklerine sebep olmaktadır. Buzulların erimesi ve buna bağlı olarak deniz suyu seviyesindeki yükselmeler ve kıyı kesimlerinde toprak kayıplarının artması küresel ısınmanın neden olduğu sonuçlardan birkaç tanesidir. Küresel ısınma sebebiyle dünyanın bazı yerlerinde kasırgalar, şiddetli seller ve taşkınların sıklığı artarken, bazı yerlerinde ise uzun süreli gerçekleşen ciddi kuraklıklar ve buna bağlı olarak ta çölleşmeler ortaya çıkmaktadır (Aytar, 2013; Aytar, 2019).



Şekil 1. Sera etkisi ve CO₂'nin tarihsel değişimleri (Annual CO₂ Data, 2021)

Figure 1. Greenhouse effect and historical changes of CO₂ (Annual CO₂ Data, 2021)

Küresel ısınmanın bilimsel kanıtlarından biri, atmosfer ortamındaki CO₂ seviyesinde meydana gelen artışlar olmakla birlikte bu artışın temel sebeplerinden birisi de insan faaliyetleridir (Aytar,

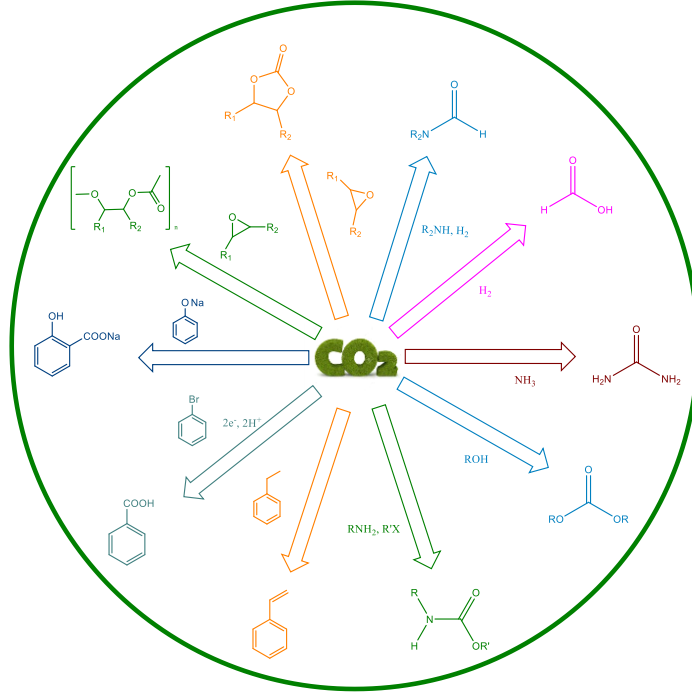
2019). Atmosfer ortamındaki CO₂ konsantrasyonu 1800'lü yıllarda gerçekleşen sanayi devriminden önce 280 ppm'de iken günümüzde bu konsantrasyon 416.45 ppm'e yükselmiştir (Annual CO₂ Data, 2021) ve yaklaşık olarak % 50 oranla gerçekleşen bu artış küresel boyuttaki sıcaklık artışını da tetiklemiştir. CO₂ gazında meydana gelen bu artış onun küresel ısınmada en önemli rol oynayan gaz olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 1).

Son yıllarda küresel ısınmayı önlemeye yönelik olarak ulusal düzeyde ve uluslararası boyutta düzenlenen çok sayıda çalışma yapılmakta ve bu çalışmalar ile onların kullanımına yönelik önemli düzenlemeler getirilmektedir. Bunların yanı sıra küresel ısınmaya neden olan CO₂ gazının kolay bulunabilir olması, pahalı olmaması ve toksik olmayan özellikleri ile birlikte farklı organik sentez reaksiyonlarında karbon (C1) kaynağı olarak kullanılması onun pozitif etkilerini ön plan çıkarmaktadır. Bu sebeple karbondioksit ucuz karbon kaynağı şeklinde kullanılarak elde edilen organik bileşikler de gerek ticari gerekse de organik sentezlerde başlangıç maddesi olarak kullanılabilirliği yönüyle büyük bir öneme sahiptir (Şekil 2). Böylelikle önemli küresel ısınmaya büyük oranda neden olan bir gazın tüketimi ve faydalı ürünlere dönüşümü oldukça önem arz etmektedir. Fakat CO₂ kimyasında karşılaşılan en önemli sorun termodinamik ve kinetik açıdan kararlı bir bileşik olması yani reaksiyona girmeye direnç göstermesidir. Bu sorun ancak etkin ve seçici özelliğe sahip bir katalizör kullanılarak giderilebilir. Katalizör kullanılarak kimyasal maddelerin üretimi kimya endüstrisi için vazgeçilmez bir unsurdur (Omae, 2006; Zhao, 2006). Bu katalitik amaçla, en iyi dönüşüm yollarından biri oksiranlar ile CO₂'nin tepkimesi sonucu polikarbonat ve/yada halkalı karbonatların meydana gelmesidir.

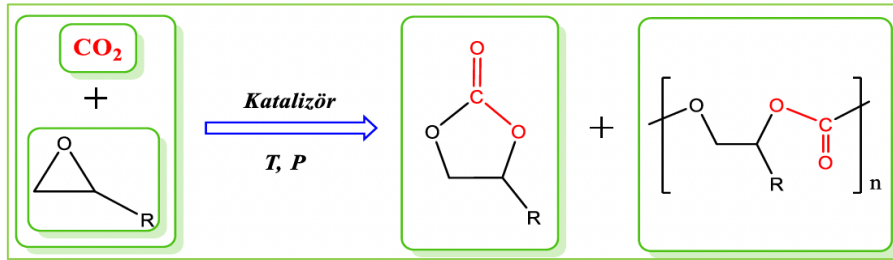
CO₂ gazının ciddi öneme sahip kimyasal dönüşümlerine Şekil 2 'de yer verilmiştir (Noyori vd., 1995; Arakawa vd., 2001). Bu çalışma alanındaki en umut verici yöntemlerden biri, CO₂ ve oksiranların katalizörler yardımıyla polikarbonat ve/yada halkalı karbonatların sentezidir (Şekil 3). Epoksitler yada diğer adıyla oksiranlar ve CO₂ gazının eşleşme reaksiyonu, metal türlerine, oksiranlara, ligand sistemlerine ve katalitik şartlara bağlı olarak uygun monomerik yada polimerik halkalı karbonatlar meydana getirir (Darensbourg vd., 2004; Darensbourg vd., 2007; Paddock vd., 2001; Lu vd., 2004; Li vd, 2007; Ulusoy vd., 2009; Kılıç vd., 2015). Küresel ısınmada rol oynayan CO₂ gazından yola çıkılarak

sentezlenen çeşitli bileşikler içerisinde CO₂ 'den halkalı karbonat sentezi yaygın bir şekilde kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerin yaygın kullanımında önemli olan elde edilen ürün olan halkalı karbonatlardır. Bu bileşikleri önemli kılan ise, aprotik polar çözücüler, lityum iyon pillerdeki elektrolitler, organik sentetik ara ürünler, biyomedikal uygulamalar için öncüler,

mühendislik plastikleri için hammaddeler ve polikarbonatların monomer birimleri olarak yaygın bir şekilde kullanımları ile endüstriyel olarak değerli kimyasallar olmalarından kaynaklanmaktadır (Shaikh & Sivaram, 1996; Stamp vd., 2001; Sakakura & Kohno 2009; Aytar, 2019).



Şekil 2. CO₂ 'den elde edilen organik bileşikler (R= Alkil, Aril; X= Tuz, BF₄, PF₆)
Figure 2. Organic compounds from CO₂ (R= Alkyl, Aryl; X= Salt, BF₄, PF₆)



Şekil 3. CO₂'nin epoksitlerle monomerik veya polimerik halkalı karbonat sentezi
Figure 3. Synthesis of monomeric or polymeric cyclic carbonate with epoxides of CO₂

Son yıllarda, organik çözücünün bulunmadığı uygun şartlar altında oksiranların atmosferik CO₂ ile halkalı karbonatlara dönüşümünü yüksek verimle katalize edebilen pek çok homojen katalizör sistemi geliştirilmiştir. Bu katalizör sistemleri içerisinde CO₂ ile oksiranların dönüşümünde özellikle salen kompleks bileşikleri, metalloporfirin, metal kompleks bileşikleri, kobaloksimler, zeolitler, fosfonyum tuzları, imidazolyum tuzları (iyonik sıvılar), N-N sistemleri, metal organik sistemler (MOF), polioksometalat, beta destekli yapılar sahip

bileşikler ve organik bazlar, metal oksitler ve alkali metal tuzları etkili sistemler olmuşlardır (Zhang vd., 2018; Martin vd., 2015; Comerford vd., 2015; Kilic vd., 2018; Lu & Darensbourg, 2012; Barthel vd., 2016; Mirabaud vd., 2018; Yamaguchi vd., 1999; Cokoja vd., 2015; Fiorani vd., 2015; Yang vd., 2011; Xu vd., 2015; Wang & Zhang, 2016; Aytar, 2013). İyonik sıvıların yüksek termal kararlılığı, düşük buhar basıncı ve benzersiz ayarlanabilir yapıları, CO₂ ve epoksitlerin halkalaşması için çok çekici katalizörler olmasını sağlamaktadır (Zhang vd., 2016; Li vd., 2021).

Tablo 5' de görüldüğü üzere, literatürde CO₂ ile epoksitlerin halkalı karbonatlara dönüşümünde katalizör olarak imidazolyum tuzları, imidazolyum destekli 3 fonksiyonlu iyonik sıvılar (3-(2-hidroksietil)-1-vinil-1H-imidazol-3-ium bromür ([VIMEtOH][Br]), 3-(2-hidroksietil)-1-vinil-1H-imidazol-3-ium ([VIMEtOH][OH]) ve 3-(2-hidroksietil)-1-vinil-1H-imidazol-3-ium bromür (poly [VIMEtOH][Br])), ZnBr₂/K₂CO₃/[Bmim]Br sistemleri, [Emim]Br, [Hmim]Br ve hidroksil ile fonksiyonlaştırılmış protik iyonik sıvılar (PIL'ler) kullanılarak yüksek verim elde edilmiştir (Mujmule & Kim, 2022; Zhang vd., 2016; Li vd., 2021). Ancak imidazolyum tuzları yüksek katalitik aktivite gösterse de reaksiyon sıcaklığı ve basıncı hala yüksektir. Bu nedenle, ortam koşulları altında basit iyonik sıvı katalizörleri ile CO₂'nin halkalı karbonata dönüşümü için verimli yöntemlerin geliştirilmesi oldukça arzu edilmektedir. Bu çalışmada, [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları CO₂'nin halkalı karbonata dönüşüm reaksiyonlarında katalizör olarak kullanılmıştır (Aytar, 2013). Bu dönüşüm, hem uygun reaktör koşulları altında (Katalizör (Kat.) (4.5 × 10⁻⁵ mol), epoksit (4.5 × 10⁻³ mol), 100 °C, 1.6 MPa CO₂ ve 2 saat) hem de atmosferik ortamda (Kat. (4.5 × 10⁻⁵ mol), epoksit (4.5 × 10⁻³ mol), 100 °C, 1 atm (0.1 MPa) CO₂ ve 2 saat) gerçekleştirilmiştir. Atmosferik ortamda sürenin (2 saat ve 24 saat) ve sıcaklığın (60 °C ve 100 °C) etkisi ile optimizasyon çalışmaları da test edilmiştir.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

Deneysel çalışmalarda laboratuvar ortamında reaksiyonlar için kullanılan tüm kimyasal malzemeler Sigma- Aldrich firmasından temin edildi. Kullanılan kimyasal maddeler: 1-bütül-3-metilimidazolyum hekzaflorofosfat (% 97.0 saflıkta), 1-bütül-3-metilimidazolyumiyodür (% 99 saflıkta), epiklorhidrin (% 99 saflıkta), epoksibütan (% 99 saflıkta), aseton (% 99.5 saflıkta) ve etanol (% 95.0 saflıkta). Kullanılan cihazlar: PARR 4543 25 mL paslanmaz çelik yüksek basınç reaktörü, Agilent 7820 A model gaz kromatografisi ve FID dedektör cihazı, Agilent ¹H ve ¹³C nükleer manyetik rezonans (NMR) 400 Mhz NMR Spektroskopisi ve Perkin-Elmer RXI FT-IR spektrometre.

Reaktör ortamında CO₂ dönüşümü için genel prosedür: Epoksitlerle CO₂'den halkalı karbonatların sentezi için katalizör olarak

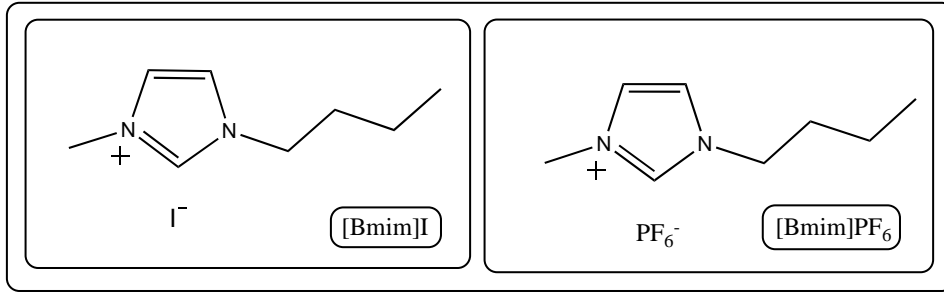
imidazolyum tuzları (4.5x10⁻⁵ mol) ve epoksit (4.5x10⁻³ mol) 25 mL'lik paslanmaz çelik bir reaktör içerisine eklenerek gerçekleştirildi. Reaksiyon sisteminin atmosferi, sistemin dengelenmesine izin vermek için 2 dakika boyunca sabit CO₂ basıncı altına yerleştirildi ve daha sonra otoklav, istenen basınca CO₂ ile dolduruldu. Reaksiyon karışımı, farklı sıcaklık ve basınçlarda yürütülerek uygun şartlar belirlendi. Gerçekleştirilen reaksiyon süresinden sonra kap, buz banyosunda 5-10 °C'ye soğutuldu ve basınç serbest bırakıldı. İzole edilen verimler GC (Agilent 7820 A) cihazı ile hesaplandı.

Atmosferik ortamda CO₂ dönüşümü için genel prosedür: Epoksitlerle CO₂'den halkalı karbonatların sentezi için katalizör olarak imidazolyum tuzları (4.5x10⁻⁵ mol) ve epoksit (4.5x10⁻³ mol) Schlenk sistemi (10 mL) içerisine eklenerek gerçekleştirildi. Reaksiyon sisteminin atmosferi, sistemin dengelenmesine izin vermek için 2 dakika boyunca sabit CO₂ basıncı altına yerleştirildi ve daha sonra CO₂ ile dolduruldu. Reaksiyon karışımı, istenen sıcaklığa kadar ısıtıldı. İstenen reaksiyon süresinden sonra kap, buz banyosunda 5-10 °C'ye soğutuldu ve basınç serbest bırakıldı. İzole edilen verimler GC (Agilent 7820 A) cihazı ile hesaplandı.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

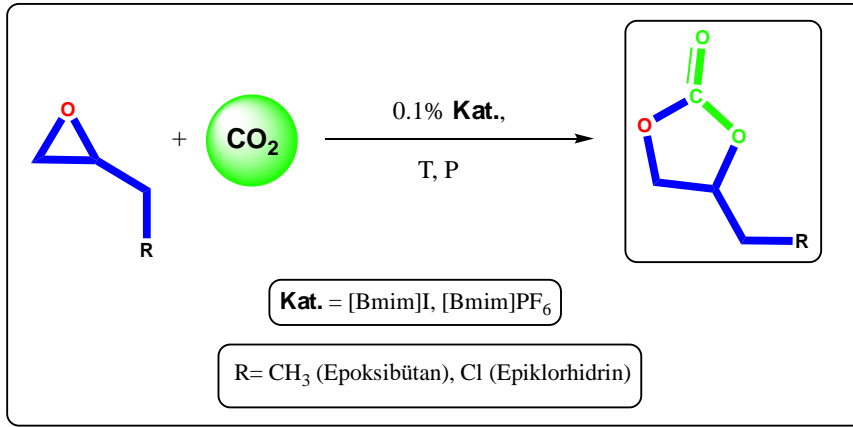
Halkalı karbonat sentezinin CO₂'den yola çıkılarak epoksitlerle eşleşme reaksiyonundan elde edilmesinin çok özel yeri ve ciddi bir önemi vardır. Bu reaksiyonun %100 atom ekonomisi ile dönüşüm sağlanması birçok kullanım alanları bulmasını imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada yüksek termal kararlılığı, düşük buhar basıncı ve benzersiz ayarlanabilir yapılara sahip olma özelliği bulunan iyonik sıvılar halkalı karbonat eldesinde katalizör olarak test edilmişlerdir. Literatür çalışmaları detaylı olarak incelendiğinde katalizör olarak, otoklavda yüksek verim elde edilen [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ tercih edilirken (Şekil 4) (Aytar, 2013; Kılıç vd., 2021), oksiran için ise literatürde birçok farklı epoksitin kullanımı yer alırken çalışmamızda dönüşüm aktivitesinin iyi olduğu belirlenen epiklorhidrin (EK) ve epoksibütan (EB) reaktant olarak kullanılmıştır (Tablo 5) (Aytar, 2013; Aytar, 2019; Kılıç vd., 2018; Kilic vd., 2020; Kilic vd., 2021; Sogukomerogullari vd., 2018).



Şekil 4. Seçilen imidazolyum tuzlarının yapısı.
Figure 4. Structure of selected imidazolium salts.

Çalışmada, [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzlarının CO₂'nin epoksitler (epiklorhidrin ve epoksibütan) ile hem yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında hem de atmosferik basınç altında halkalı karbonatlara dönüşüm çalışmaları

gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Daha sonra atmosferik ortamda reaksiyon sıcaklığı (60 °C ve 100 °C) ve reaksiyon süresinin (2 saat ve 24 saat) etkisi de ayrıca incelenmiştir.



Şekil 5. Otoklavda ve atmosferik ortamda CO₂'nin epoksitlerle halkalı karbonat sentezi.
Figure 5. Synthesis of cyclic carbonate with epoxides of CO₂ in autoclave and atmospheric ambient.

3.1. Epoksibütanın CO₂ ile otoklavda ve atmosferik ortamda 4-etil-1,3-dioksalan-2-on'a dönüşümü

3.1. Conversion of epoxybutane to 4-ethyl-1,3-dioxalan-2-one with CO₂ in autoclave and atmospheric ambient

[Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları, CO₂'nin epoksibütan ile hem yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında hem de atmosferik basınç altında 4-etil-1,3-dioksalan-2-on'a dönüşümünde katalizör olarak test edildi. Reaksiyon katalizör olarak iyonik sıvılar ile 100 °C, 2 saatte, 1.6 MPa CO₂ ile otoklavda ve 100 °C, 2 saatte, 1 atm CO₂ ile schlenk sisteminde gerçekleştirildi. Tablo 1 incelendiğinde [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları otoklavda sırasıyla % 85.0 ve % 83.6 verim ile iyi bir dönüşüm sağlarken, atmosferik ortamda bu katalizörler sırasıyla % 7.5 ve % 6.2 verim ile dönüşüm gerçekleştirdi. Tablo 1 sıra 5'e bakıldığında reaksiyon sisteminde

katalizör bulunmadığında her iki ortamda da herhangi bir dönüşüm elde edilemedi. Ayrıca sonuçlar incelendiğinde iyonik sıvıların epoksibütan ile atmosferik ortamdaki veriminin de başarılı olduğu görülmektedir (Tablo 1, sıra 3,4). Seçicilik, halkalı karbonat sentezinde yan ürün olarak diol oluşumu şeklinde tanımlanarak elde edilen bu verinin her iki ortamda da yüksek olmasına rağmen atmosferik ortamda daha düşük olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir (Tablo 1, sıra 1-4).

Tablo 2 de görüldüğü üzere sıcaklığın atmosferik ortam üzerindeki etkisi de incelemiştir. Epoksibütan ile 2 saatte 1 atm CO₂ basınç altında [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları, 100 °C'de sırasıyla % 7.5 ve % 6.2 verim ile dönüşüm gerçekleştirirken, 60 °C'de ise sırasıyla % 4.1 ve % 3.6 verim elde edilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde sıcaklığın reaksiyon üzerindeki etkisinin olumlu olduğu ortaya konulmaktadır.

Tablo 1. CO₂'nin epoksibütan ile halkalaşması**Table 1.** Cyloaddition of CO₂ to epoxybütane

Sıra	Katalizör	Verim [%]	Seçicilik [%]
1	[Bmim]I ^a	85.0	97.0
2	[Bmim]PF ₆ ^a	83.6	99.0
3	[Bmim]I ^b	7.5	90.2
4	[Bmim]PF ₆ ^b	6.2	93.4
5	- ^c	0	0

a) Reaksiyon koşulları: Kat. (4.5×10^{-5} mol), epoksibütan (4.5×10^{-3} mol), CO₂ (1.6 MPa), 100 °C, 2 s (Reaktör ortamı); b) Reaksiyon koşulları: Kat. (4.5×10^{-5} mol), epoksibütan (4.5×10^{-3} mol), CO₂ (1 atm), 100 °C, 2 s (Atmosferik ortam) c) Katalizörsüz.

Tablo 2. Atmosferik ortamda halkalaşma reaksiyonu üzerine sıcaklık etkisi**Table 2.** Temperature effect on cycloaddition reaction in atmospheric ambient

Sıra	Katalizör	Sıcaklık (°C)	Verim [%]	Seçicilik [%]
1	[Bmim]I	100	7.5	90.2
2	[Bmim]PF ₆	100	6.2	93.4
3	[Bmim]I	60	4.1	96.0
4	[Bmim]PF ₆	60	3.6	98.3

Reaksiyon koşulları: Kat. (4.5×10^{-5} mol), epoksibütan (4.5×10^{-3} mol), CO₂ (1 atm), 2 s.

Tablo 3 de ise reaksiyon süresinin atmosferik ortam üzerindeki etkisi incelemiştir. Epoksibütan ile 100 °C, 1 atm CO₂ basınç altında [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları, 2 saatte sırasıyla % 7.5 ve % 6.2 verim ile dönüşüm

gerçekleştirirken, 24 saatte sırasıyla % 90.1 ve % 87.9 verim ile literatürle kıyaslandığında yüksek bir dönüşüm elde edilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde sürenin reaksiyon üzerinde ciddi bir etkisinin olduğu ortaya konulmaktadır.

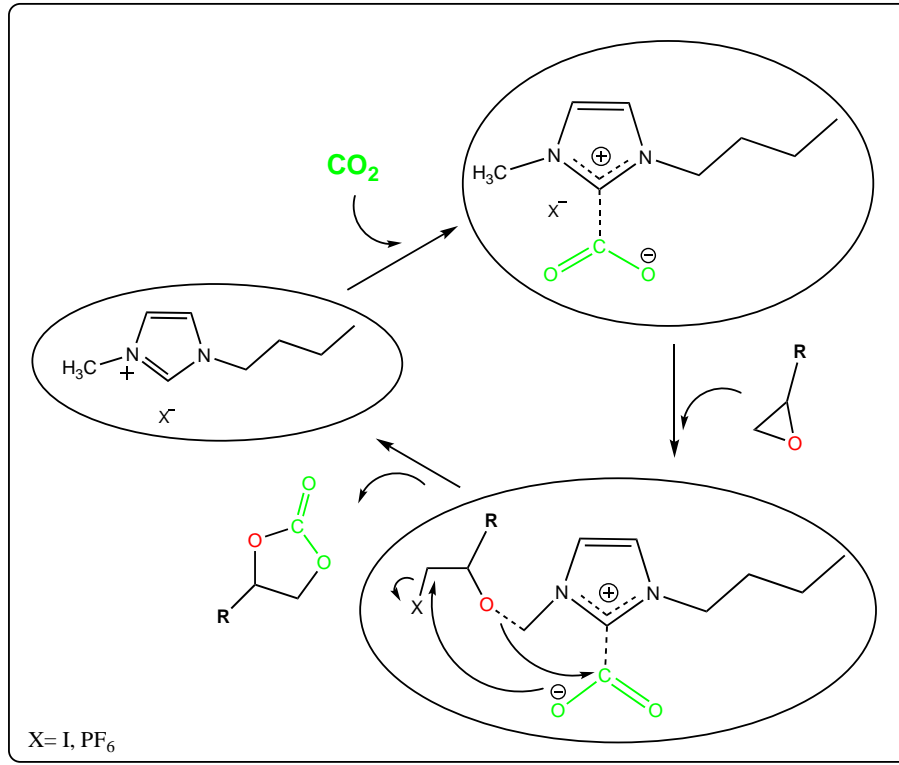
Tablo 3. Atmosferik ortamda halkalaşma reaksiyonu üzerine sürenin etkisi**Table 3.** Time effect on cycloaddition reaction in atmospheric ambient

Sıra	Katalizör	Süre (Saat)	Verim [%]	Seçicilik [%]
1	[Bmim]I	2	7.5	90.2
2	[Bmim]PF ₆	2	6.2	93.4
3	[Bmim]I	24	90.1	94.3
4	[Bmim]PF ₆	24	87.9	97.1

Reaksiyon koşulları: Kat. (4.5×10^{-5} mol), epoksibütan (4.5×10^{-3} mol), CO₂ (1 atm), 100 °C.

Literatür araştırmaları ve mevcut sonuçların gözlemlenmesine dayanarak, reaksiyon mekanizmasının olası yolu, CO₂ 'nin epoksit ile [Bmim]X (X: I ve PF₆) iyonik sıvı üzerinde halkalı karbonata kimyasal dönüşümü için Şekil 6'daki gibi öngörülmüştür. İlk olarak imidazolyumun asidik protonunun CO₂'yi tutarak iyonik sıvı ile CO₂ arasında etkileşimin meydana geldiği tahmin edilmektedir. Aynı anda ortamda yer alan epoksitin oksijen atomu ile iyonik sıvı arasında H bağı meydana gelerek halka açılmasının hızlı bir şekilde

gerçekleştiği ön görülmektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere halka açılımlında ara ürün olarak epoksitin daha az sterik engelli karbon atomuna halojenür anyonunun nükleofilik saldırısı ile gerçekleşmektedir. Daha sonra alkil karbonat anyonu oluşması için oksijen anyonun karbon atomuna nükleofilik saldırısı gerçekleşerek CO₂ araya girmekte ve daha sonra halka kapanması meydana gelmektedir (Şekil 6) (Mujmule & Kim, 2022; Zhang vd., 2016; Li vd., 2021; Aytar, 2013; Aytar, 2019).



Şekil 6. İyonik sıvı katalizörlüğünde CO₂ ve epoksitten halkalı karbonat sentezi için önerilen olası reaksiyon mekanizması.

Figure 6. The proposed possible pathway of the reaction mechanism for the synthesis of cyclic carbonate from CO₂ with epoxide over ionic liquid as catalyst

3.2. Epiklorhidrinin CO₂ ile otoklavda ve atmosferik ortamda 4-(klorometil)-1,3-dioksalan-2-on'a dönüşümü

3.2. Conversion of epichlorohydrin to 4-(chloromethyl)-1,3-dioxalane-2-one by CO₂ in autoclave and atmospheric ambient

[Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları, CO₂'nin epiklorhidrin ile hem yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında hem de atmosferik basınç altında 4-klorometil-1,3-dioksalan-2-on'a dönüşümünde katalizör olarak test edildi. Reaksiyon katalizör olarak iyonik sıvılar ile 100 °C, yarım saatte, 1.6 MPa CO₂ ile otoklavda ve 100 °C, yarım saatte, 1 atm CO₂ ile schlenk sisteminde gerçekleştirildi. Tablo 4 incelendiğinde [Bmim]I ve [Bmim]PF₆

imidazolyum tuzları otoklavda sırasıyla % 82.9 ve % 90.9 verim ile yüksek bir dönüşüm sağlarken, atmosferik ortamda bu katalizörler sırasıyla % 4.2 ve % 7.0 verim ile dönüşüm gerçekleştirdi. Tablo 4 sıra 5'e bakıldığında reaksiyon sisteminde katalizör bulunmadığında her iki ortamda da herhangi bir dönüşüm elde edilemedi. Sonuçlar incelendiğinde iyonik sıvıların epiklorhidrin ile yarım saatte reaktör ortamında daha yüksek verim sağladığı görülmektedir (Tablo 4 sıra 1-4). Seçicilik ise otoklavda yüksek olmasına rağmen atmosferik ortamda daha düşük olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç ile atmosferik ortamda diol oluşumunun epiklorhidrin ile daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4. CO₂'nin epiklorhidrin ile halkalaşması

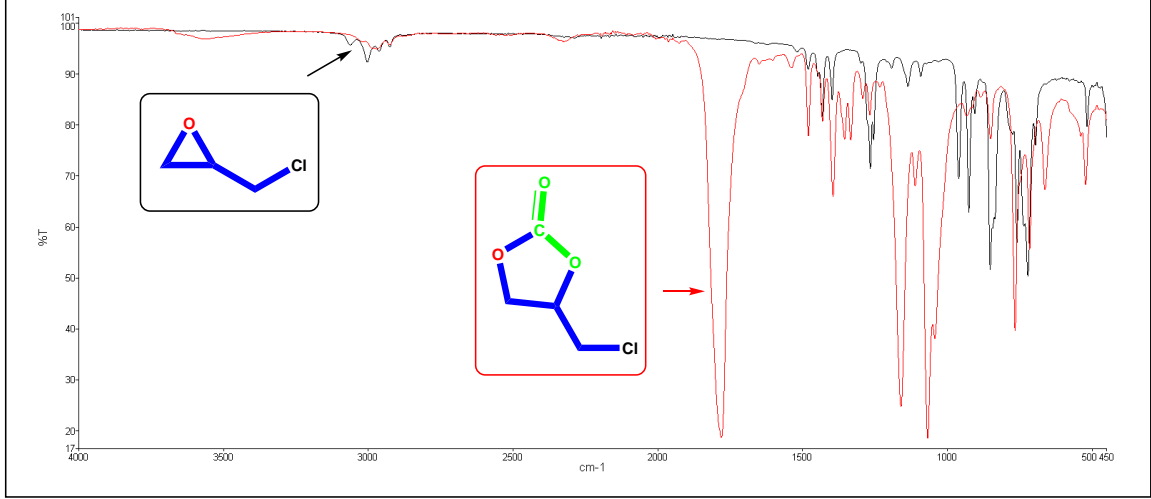
Table 4. Cyloaddition of CO₂ to epichlorohydrin

Sıra	Katalizör	Verim [%]	Seçicilik [%]
1	[Bmim]I ^a	82.9	97.5
2	[Bmim]PF ₆ ^a	90.9	99.1
3	[Bmim]I ^b	4.2	63.7
4	[Bmim]PF ₆ ^b	7.0	64.9
5	- ^c	0	0

a) Reaksiyon koşulları: Kat. (4.5 × 10⁻⁵ mol), epiklorhidrin (4.5 × 10⁻³ mol), CO₂ (1.6 MPa), 100 °C, 0.5 s (Reaktör ortamı); b) Reaksiyon koşulları: Kat. (4.5 × 10⁻⁵ mol), epiklorhidrin (4.5 × 10⁻³ mol), CO₂ (1 atm), 100 °C, 0.5 s (Atmosferik ortam) c) Katalizörsüz.

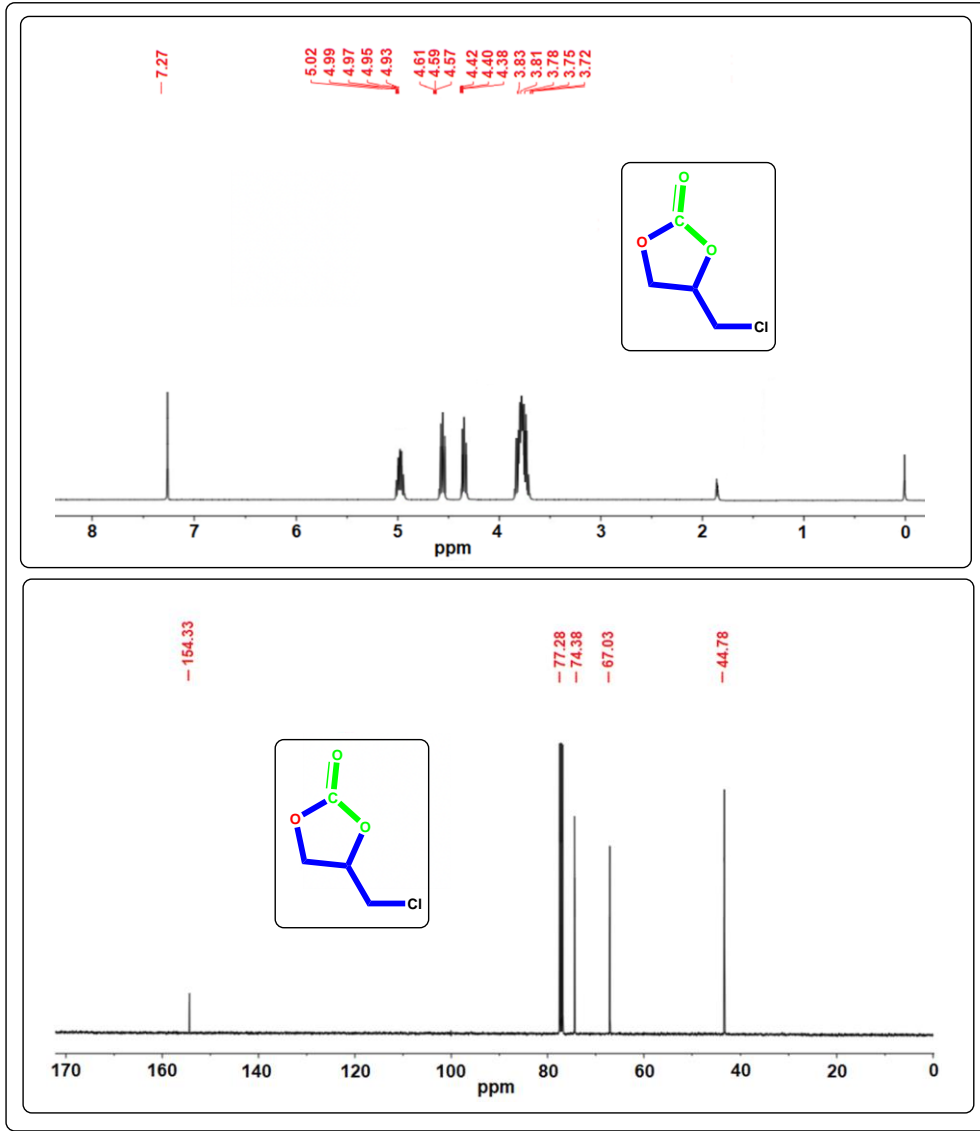
CO₂'den yola çıkılarak epiklorhidrin ile eşleşme reaksiyonundan elde edilen 4-klorometil-1,3-dioksalan-2-on yapısı FT-IR spektrumu ve ¹H ve ¹³C NMR spektrumu ile de incelendi (Şekil 7, 8). Şekil 7'de görüldüğü üzere halkalı karbonatın FT-IR spektrumunda 1780 cm⁻¹'de gözlenen bandın karbonil grubuna (C=O) ait olduğu gözlemlendi. Ayrıca şekil 8'de yer alan ¹H ve ¹³C NMR

spektrumundan elde edilen kayma değerleri 4-klorometil-1,3-dioksalan-2-on'un yapısını destekleyerek ¹³C NMR spektrumunda 154.33 ppm'deki (C=O) belirgin pik ile halkalı karbonat oluşumu tespit edildi. Böylece oluşan 4-klorometil-1,3-dioksalan-2-on yapısı FT-IR spektrumu ve ¹H ve ¹³C NMR spektrumu ile de aydınlatıldı.



Şekil 7. Epiklorhidrin ve 4-(klorometil)-1,3-dioksalan-2-on'un FT-IR spektrumu.

Figure 7. The FT-IR spectrum of epichlorohydrin and 4-(chloromethyl)-1,3-dioxolan-2-one



Şekil 8. 4-(klorometil)-1,3-dioksalan-2-on'un ^1H ve ^{13}C NMR spektrumu.
Figure 8. The ^1H and ^{13}C NMR spectrum of 4-(chloromethyl)-1,3-dioxolan-2-one

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzlarının CO₂ 'nin epoksitler (epiklorhidrin ve epoksibütan) ile hem yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında hem de atmosferik basınç altında halkalı karbonatlara dönüşüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Atmosferik ortamda reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresinin dönüşüm üzerindeki etkisi de ayrıca incelenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde katalizör varlığının reaksiyon üzerinde olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir. [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları otoklavda 2 saatte, epoksibütan ile sırasıyla % 85.0 ve % 83.6 verim ve epiklorhidrin ile sırasıyla % 82.9 ve % 90.9 verim sağlarken,

atmosferik ortamda bu katalizörler epoksibütan ile sırasıyla % 7.5 ve % 6.2 verim ve epiklorhidrin ile sırasıyla % 4.2 ve % 7.0 verim gerçekleştirmiştir. Atmosferik ortamda bu tuzların epoksibütan ile sıcaklık etkisine bakıldığında 100 °C'de sırasıyla % 7.5 ve % 6.2 verim ile dönüşüm gerçekleştirirken, 60 °C'de sırasıyla % 4.1 ve % 3.6 verim elde edilerek sıcaklığın olumlu etkisi ortaya konulmuştur. Atmosferik ortamda kısa sürede elde edilen bu sonuçların reaksiyon süresinin uzun tutulmasıyla yüksek verim sağlayacağı düşünüldükçe gerçekleştirilen 24 saatlik reaksiyon ile [Bmim]I ve [Bmim]PF₆ imidazolyum tuzları, sırasıyla % 90.1 ve % 87.9 verim ile bu katalizörlerden literatür ile kıyaslandığında yüksek bir dönüşüm elde edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Literatürde çeşitli katalizör sistemleri kullanılarak CO₂ ve epoksitlerin halkalaşma reaksiyonu üzerine ilgili çalışmalar

Table 5. The related studies^a on the cyclization reaction of CO₂ and epoxides using various catalyst systems in the literature^a

Katalizör	Substrat	Yardımcı Katalizör	Reaksiyon Şartları	Verim (%)
Zn-PPBCl (Peng vd., 2018)	Epiklorhidrin	-----	5 s, 130 °C, 1.0 MPa, 0.477 mmol katalizör	86 / 81
BPh ₃ (Andrea ve Kerton, 2019)	Epiklorhidrin	PPNCl	3 s, 100 °C, 20 bar, 0.0034 mmol katalizör	76 ^b
Kobalosimler-PCPL (Kılıç vd., 2018)	Epiklorhidrin	DMAP	2 s, 100 °C, 1.6 MPa, 0.045 mmol katalizör	97
SNS pincer [Co(k ³ -SNS-1)Cl ₂].2CH ₃ OH (1a) (Soğukömeroğulları vd., 2018)	Epiklorhidrin	DMAP	2 s, 100 °C, 1.6 MPa, 0.045 mmol katalizör	88.6
(Salen)AlCl (Darensbourg vd., 2012)	Propilenoksit	BDAPC	2 s, 120 °C, 3 MPa, 0.035 mmol katalizör	24.4
Askorbik asit (D'Elia vd., 2017)	Propilenoksit	TBAI	23 s, r.t, 1 bar, 0.5 mmol katalizör	70 ^b
Boronat ester (Kilic vd., 2020)	Epiklorhidrin	DMAP	2 s, 100 °C, 1.6 MPa, 0.045 mmol katalizör	97.0
Ferrocene group containing boronate ester (B _{4a}), (Kilic vd., 2021)	Epiklorhidrin	DMAP	2 s, 100 °C, 1.6 MPa, 0.045 mmol katalizör	96.3
ZnBr ₂ /[Bmim]Br (Zhang vd., 2016)	Stirenoksit	K ₂ CO ₃	20 s, 30 °C, 1 atm, 2/0.03 mmol katalizör	99
hydroxyl-functionalized protic ionic liquids (Li vd., 2021)	Epoksibütan	-----	24 s, 60 °C, 1 bar, 0.1 mmol katalizör	92
İyonik sıvı [VIMEtOH][Br]-72 (Mujmule ve Kim, 2022)	Epoksibütan	-----	2 s, 120 °C, 2 MPa, 4.56 mmol katalizör	89.7
Bu çalışmada	Epoksibütan	-----	2 s, 100 °C, 1.6 MPa, 0.045 mmol katalizör	85.0
Bu çalışmada	Epoksibütan	-----	24 s, 100 °C, 1 atm, 0.045 mmol katalizör	90.2

^aLiteratürde yer alan çalışmalarda bildirilen orjinal koşullar ve veriler.

^b Verim yerine yüzde dönüşüm olarak rapor edildi.

(PPNCl, bis (trifenilfosforaniliden) amonyum klorür; DMAP, 4- (dimetilamino) piridin; TBAI, tetrabütülamonyum iyodür; BDAPC, N-benzil-4-(dimetilamino)piridinyum klorür)

Katalizör kimyasında temel hedef çevre dostu bir katalizör sistem ile yüksek dönüşüm elde edilmesidir. Küresel ısınmaya neden olan CO₂ gazının halkalı karbonatlara dönüşümünde ise yüksek basınç ve sıcaklık gerektirmeyen sistemlerin ortaya konulması bu reaksiyon sisteminde oldukça önemlidir. Bu amaçla bu çalışmada gerçekleştirilen ve literatürde yeni olan atmosferik ortamda iyonik sıvılar ile halkalı karbonat sentezinin mükemmel sonuç vermesi bu sistemin umut verici olduğunu ortaya koymaktadır. Tüm bu sonuçlar bize gelecekte ideal katalizör tasarımı ve dönüşüm sistemi geliştirilmesi açısından yol gösterici olacaktır.

Teşekkür

Acknowledgement

Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakem/hakemlere teşekkür ederim.

Yazar katkısı

Author contribution

Çalışmanın dizaynı, yazımı, deneylerin yürütülmesi dahil her aşamada yazar tarafından katkı sağlanmıştır.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Andrea, K. A., & Kerton, F. M. (2019). Triarylborane-catalyzed formation of cyclic organic carbonates and polycarbonates. *Acs Catalysis*, 9(3), 1799-1809. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b04282>
- Annual CO2 Data. (2021). <https://www.co2.earth/annual-co2>
- Arakawa, H., Aresta, M., Armor, J. N., Barteau, M. A., Beckman, E. J., Bell, A.T., Bercaw, J. E., Creutz, C., Dinjus, E., Dixon, D. A., Domen, K., Dubois, D. L., Eckert, J., Fujita, E., Gibson, D. H., Goddard, W. A., Goodman, D. W., Keller, J., Kubas, G. J., Kung, H. H., Lyons, J. E., Manzer, L. E., Marks, T. J., Morokuma, K., Nicholas, K. N., Periana, R., Que, L., Rostrup-Nielson, J., Sachtler, W. M. H., Schmidt, L. D., Sen, A., Somorjai, G. A., Stair, P. C., Stults, B. R., & Tumas, W. (2001). Catalysis research of relevance to carbon management: progress, challenges, and opportunities. *Chemical Reviews*, 101(4), 953-996. <https://doi.org/10.1021/cr000018s>
- Arayachukiat, S., Kongtes, C., Barthel, A., Vummaleti, S. V., Poater, A., Wannakao, S., & D'Elia, V. (2017). Ascorbic acid as a bifunctional hydrogen bond donor for the synthesis of cyclic carbonates from CO2 under ambient conditions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(8), 6392-6397. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01650>
- Aytar, E. (2013). İyonik sıvılar ve NN tipi Zn-katalizörleri varlığında CO2'in organik ürünlere dönüşümü [Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Aytar, E. (2019). Konjuge NN kompleks bileşikleri ve katalitik uygulamaları [Doktora Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Barthel, A., Saih, Y., Gimenez, M., Pelletier, J. D., Kühn, F. E., D'elia, V., & Basset, J. M. (2016). Highly integrated CO2 capture and conversion: direct synthesis of cyclic carbonates from industrial flue gas. *Green Chemistry*, 18(10), 3116-3123. <https://doi.org/10.1039/C5GC03007B>
- Cokoja, M., Wilhelm, M. E., Anthofer, M. H., Herrmann, W. A., & Kühn, F. E. (2015). Synthesis of cyclic carbonates from epoxides and carbon dioxide by using organocatalysts. *Chemistry Sustainability Energy Materials*, 8(15), 2436-2454. <https://doi.org/10.1002/cssc.201500161>
- Comerford, J. W., Ingram, I. D. V., North, M., & Wu, X. (2015). Sustainable metal-based catalysts for the synthesis of cyclic carbonates containing five-membered rings. *Green Chemistry*, 17, 1966-1987. <https://doi.org/10.1039/C4GC01719F>
- Darensbourg, D. J., Bottarelli, P., & Andreatta, J. R. (2007). Further studies related to the copolymerization of cyclohexene oxide and carbon dioxide catalyzed by chromium schiff base complexes. crystal structures of two 1-hydroxo-bridged schiff base dimers of chromium(III). *Macromolecules*, 40, 7727-7729. <https://doi.org/10.1021/ic049182e>
- Darensbourg, D. J., Mackiewicz, R. M., Phelps, A. L., & Billodeaux, D. R. (2004). Copolymerization of CO2 and epoxides catalyzed by metal salen complexes. *Accounts of Chemical Research*, 37(11), 836-844. <https://doi.org/10.1021/ar030240u>
- Fiorani, G., Guo, W., & Kleij, A. W. (2015). Sustainable conversion of carbon dioxide: the advent of organocatalysis. *Green Chemistry*, 17(3), 1375-1389. <https://doi.org/10.1039/C4GC01959H>
- Kilic, A., Aytar, E., & Beyazsakal, L. (2021). A novel dopamine-based boronate esters with the organic base as highly efficient, stable, and green catalysts for the conversion of CO2 with epoxides to cyclic carbonates. *Energy Technology*, 9(9), 2100478. <https://dx.doi.org/10.1002/ente.202100478>
- Kılıç, A., Durgun, M., Aytar, E., & Yavuz R. (2018). The synthesis and investigation of different cobaloximes by spectroscopic methods. *Journal of Organometallic Chemistry*, 858, 78-88. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jorganchem.2018.01.029>
- Kılıç, A., Ulusoy, M., Aytar, E., & Durgun, M. (2015). Mono multinuclear cobaloxime and organocobaloxime catalyzed conversion of CO2 and epoxides to cyclic organic carbonates synthesis and characterization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 24, 98-106. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.015>

- Kilic, A., Sobay, B., Aytar, E., & Söylemez, R. (2020). Synthesis and effective catalytic performance in cycloaddition reactions with CO₂ of boronate esters versus N-heterocyclic carbene (NHC)-stabilized boronate esters. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(11), 5682-5696. <https://dx.doi.org/10.1039/d0se01189d>
- Li, C., Liu, F., Zhao, T., Gu, J., Chen, P., & Chen, T. (2021). Highly efficient CO₂ fixation into cyclic carbonate by hydroxyl-functionalized protic ionic liquids at atmospheric pressure. *Molecular Catalysis*, 511, 111756. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05416>
- Li, B., Zhang, R., & Lu, X. B. (2007). Stereochemistry control of the alternating copolymerization of CO₂ and propylene oxide catalyzed by SalenCrX complexes. *Macromolecules*, 40, 2303-2307. <https://doi.org/10.1021/ma062735f>
- Lu, X. B., & Darensbourg, D. J. (2012). Cobalt catalysts for the coupling of CO₂ and epoxides to provide polycarbonates and cyclic carbonates. *Chemical Society Reviews*, 41, 1462-1484. <https://doi.org/10.1039/C1CS15142H>
- Lu, X. B., Zhang, Y. J., Liang, B., X. Wang, & Li, H. (2004). Chemical fixation of carbon dioxide to cyclic carbonates under extremely mild conditions with highly active bifunctional catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 210, 31-34. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2003.09.010>
- Martin, C., Fiorani, G., & Kleij, A. W. (2015). Recent advances in the catalytic preparation of cyclic organic carbonates. *ACS Catalysis*, 5, 1353-1370. <https://doi.org/10.1021/cs5018997>
- Mirabaud, A., Martinez, A., Bayard, F., Dutasta, J. P., & Dufaud, V. (2018). A new heterogeneous host-guest catalytic system as an eco-friendly approach for the synthesis of cyclic carbonates from CO₂ and epoxides. *New Journal of Chemistry*, 42, 16863-16874. <https://doi.org/10.1039/C8NJ03065K>
- Mujmule, R. B., & Kim, H. (2022). Efficient imidazolium ionic liquid as a tri-functional robust catalyst for chemical fixation of CO₂ into cyclic carbonates. *Journal of Environmental Management*, 314, 115045. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115045>
- Noyori, R., Jessop, P. G., & Ikariya, T. (1995). Homogeneous hydrogenation of carbon dioxide. *Chemical Reviews*, 95, 259-272. <https://doi.org/10.1021/cr00034a001>
- Omae, I. (2006). Aspects of carbon dioxide utilization. *Catalysis Today*, 115, 33-52. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.02.024>
- Paddock, R. L., & Nguyen, S. T. (2001). Chemical CO₂ fixation: Cr(III) salen complexes as highly efficient catalysts for the coupling of CO₂ and epoxide. *Journal of the American Chemical Society*, 123, 11498-11499. <https://doi.org/10.1021/ja0164677>
- Peng, J., Yang, H. J., Wang, S., Ban, B., Wei, Z., Lei, B., & Guo, C. Y. (2018). Efficient solvent-free fixation of CO₂ catalyzed by new recyclable bifunctional metal complexes. *Journal of CO₂ Utilization*, 24, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.12.003>
- Sakakura, T., & Kohno, K. (2009). The synthesis of organic carbonates from carbon dioxide. *Chemical Communications*, (11), 1312-1330. <https://doi.org/10.1039/B819997C>
- Stamp, L. M., Mang, S. A., Holmes, A. B., Knights, K. A., de Miguel, Y. R., & McConvey, I. F. (2001). Polymer supported chromium porphyrin as catalyst for polycarbonate formation in supercritical carbon dioxide. *Chemical Communications*, (23), 2502-2503. <https://doi.org/10.1039/B107400H>
- Shaikh, A. A. G., & Sivaram, S. (1996). Organic carbonates. *Chemical Reviews*, 96, 951-976. <https://doi.org/10.1021/cr950067i>
- Sogukomerogulları, H. G., Aytar, E., Ulusoy, M., Demir, S., Dege, N., Richeson, D. S., & Sönmez, M. (2018). Synthesis of complexes Fe, Co and Cu supported by "SNS" pincer ligands and their ability to catalytically form cyclic carbonates. *Inorganica Chimica Acta*, 471, 290-296. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ica.2017.11.007>
- Ulusoy, M., Çetinkaya, E., & Çetinkaya, B. (2009). Conversion of carbon dioxide to cyclic carbonates using diimine Ru(II) complexes as catalysts. *Applied Organometallic Chemistry*, 23, 68-74. <https://doi.org/10.1002/aoc.1473>
- Wang, J., & Zhang, Y. (2016). Boronic acids as hydrogen bond donor catalysts for efficient conversion of CO₂ into organic carbonate in water. *ACS Catalysis*, 6(8), 4871-4876. <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b01422>
- Xu, B. H., Wang, J. Q., Sun, J., Huang, Y., Zhang, J. P., Zhang, X. P., & Zhang, S. J. (2015). Fixation of CO₂ into cyclic carbonates catalyzed by ionic liquids: a multi-scale approach. *Green Chemistry*, 17(1), 108-122. DOI <https://doi.org/10.1039/C4GC01754D>
- Yamaguchi, K., Ebitani, K., Yoshida, T., Yoshida, H., & Kaneda, K. (1999). Mg-Al mixed oxides as highly active acid-base catalysts for cycloaddition of carbon dioxide to epoxides. *Journal of the American Chemical Society*,

- 121(18), 4526-4527.
<https://doi.org/10.1021/ja9902165>
- Yang, Z. Z., Zhao, Y. N., & He, L. N. (2011). CO₂ chemistry: task-specific ionic liquids for CO₂ capture/activation and subsequent conversion. *Rsc Advances*, 1(4), 545-567.
<https://doi.org/10.1039/C1RA00307K>
- Zhang, Z., Gao, H., Wu, H., Qian, Y., Chen, L., & Chen, J. (2018). Chemical fixation of CO₂ by using carbon material-grafted N-heterocyclic carbene silver and copper complexes. *ACS Applied Nano Materials*, 1, 6463-6476.
<https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01679>
- Zhang, H., Kong, X., Cao, C., Pang, G., & Shi, Y. (2016). An efficient ternary catalyst ZnBr₂/K₂CO₃/[Bmim] Br for chemical fixation of CO₂ into cyclic carbonates at ambient conditions. *Journal of CO₂ Utilization*, 14, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.03.001>
- Zhao H. (2006). Innovative applications of ionic liquids as “green” engineering liquids. *Chemical Engineering Communications*. 193, 1660-1677.
<https://doi.org/10.1080/00986440600586537>

Investigation of ball milling effect on superconducting properties of oleic acid added bulk MgB₂ superconductors produced by two different methods

İki farklı metot ile üretilen oleik asit katkılı külçe MgB₂ süperiletkenlerin süperiletkenlik özellikleri üzerine bilyeli öğütme etkisinin araştırılması

Özge ERDEM^{*1, a}

¹Bayburt University, Bayburt Vocational High School of Health Services, Department of Medical Services and Techniques, 69000, Bayburt

• Geliş tarihi / Received: 06.05.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 25.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 06.07.2022

Abstract

The effect of ball milling on the microstructure and some superconducting parameters such as flux pinning force (F_p) and critical current density (J_c) of the oleic acid (C₁₈H₃₄O₂) added MgB₂ bulk samples produced by two different methods, was analysed in this article. In the first method, ball milling was applied to the samples produced by using boron (B) powders coated with carbon (C) released from oleic acid. In the second method, oleic acid was mixed with magnesium (Mg) and B powders at the same time and then the same ball milling process used in the first method was applied to the powder mixture. The structural, magnetic and electrical properties of the produced samples were analysed. The results showed that ball milling process enhances the homogeneity of the structure, decreases the grain size and improves the grain connectivity of MgB₂. Also, C substitution into MgB₂ lattice resulting in an increase in electron scattering and disorders, enhances after ball milling process. It supplies a significant increase in J_c at high fields and causes a slightly decrease in transition temperature (T_c), especially for the samples produced by using the first method. Because the first method supports the ball milling effect on the homogenous dispersion of oleic acid addition in the MgB₂ structure and the C entrance to MgB₂ lattice, acting as pinning centres, the best J_c and F_p values at high fields was obtained for the produced samples with second method.

Keywords: Ball milling, Bulk superconductors, MgB₂, Oleic acid

Öz

Bu makalede, iki farklı yöntem kullanılarak üretilen oleik asit (C₁₈H₃₄O₂) katkılı MgB₂ külçe örneklerin mikroyapı ile akı çivileme kuvveti (F_p) ve kritik akım yoğunluğu (J_c) gibi bazı süperiletkenlik parametreleri üzerine bilyalı öğütmenin etkisi incelenmiştir. Birinci yöntemde, oleik asitten salınan karbon (C) ile kaplanmış bor (B) tozları kullanılarak üretilen numunelere bilyalı öğütme uygulanmıştır. İkinci yöntemde oleik asit, magnezyum (Mg) ve B tozları ile aynı anda karıştırılmış ve daha sonra toz karışımına birinci yöntemde kullanılan aynı bilyalı öğütme işlemi uygulanmıştır. Üretilen numunelerin yapısal, manyetik ve elektriksel özellikleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, bilyalı öğütme işleminin yapının homojenliğini arttırdığını, tane boyutunu küçülttüğünü ve MgB₂'nin tane bağlantısını iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, bilyalı öğütme sonrası elektron saçılması ve düzensizlikte artışa neden olan MgB₂ örgüsüne C yerleşimi artar. Bu durum, özellikle birinci yöntemle üretilen numunelerde yüksek alanlarda J_c'de önemli bir artış sağlar ve geçiş sıcaklığında (T_c) küçük bir azalmaya neden olur. Birinci yöntem, bilyalı öğütmenin oleik asit katkısının MgB₂ yapısına homojen dağılımı ve çivileme merkezleri görevi gören MgB₂ örgüsüne C girişi üzerindeki etkisini desteklediğinden, yüksek alanlarda en iyi J_c ve F_p değerleri ikinci yöntemle üretilen örnekler için elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bilyalı öğütme, Külçe süperiletkenler, MgB₂, Oleik asit

*a Özge ERDEM; ozgeerdem@bayburt.edu.tr, Tel: (0458) 211 11 71, orcid.org/0000-0003-4542-941X

1. Introduction

1. Giriş

The increasing energy need of the growing world population is one of the crucial problems of today. In order to meet the energy consumption and protect natural energy resources, it is necessary to develop systems that minimize energy loss and increase their practical applicability. Since the discovery of superconductivity, many devices (energy storage, magnetically levitated transportation vehicles (MAGLEV), magnetic bearing, etc.) have been produced to minimize energy losses caused by resistance and friction. One of the promising superconductors that can be used for this purpose is MgB_2 .

MgB_2 is one of the low temperature superconductors with a remarkably high critical temperature (T_c). It is an intermetallic compound forming from magnesium (Mg) and boron (B). Considering that our country owns 73 % of the world's boron reserves, it is expected that MgB_2 superconductor-based researches will play a significant role in our country's energy development. In Turkey, boron powder with 99 % purity and boron based products are produced by Pavezyum company and sold to the world markets. Also, important organizations such as BOREN and BORTEK carry out crucial studies to expand the usage area of boron products.

From the discovery of superconductivity in MgB_2 till today, many studies have been reported on MgB_2 in bulk, thin film, tape and wire forms (Erdem & Yanmaz, 2015; Surdu et al., 2011; Sun et al., 2019). These studies are generally related on the topics of MRI systems (Majoros et al., 2022), superconducting generators (Wen et al., 2019), power cables (Klöppel et al., 2021), magnetic field shielding (Gozzelino et al., 2019), and magnetic levitation force (Erdem et al., 2020). The superconducting properties of MgB_2 , such as high critical magnetic field (H_{c2}) and critical current density (J_c), must be enhanced for these applications to be successful. Due to the absence of inherent flux pinning centres, and the presence of high porosity and poor connectivity between the grains, the critical current density decreases so fast under a high field in MgB_2 . The simplest and most effective ways to overcome this problem are adding or doping of chemicals to the MgB_2 structure and fabrication of MgB_2 with different methods such as hot pressing (Naito et al., 2020), ball milling (Liu et al., 2020), internal Mg diffusion technique (Kulich et al., 2016) and laser irradiation (Erdem & Yanmaz, 2017). Since the MgB_2

structure is resistant to many chemicals, the selection of the chemical powder to be used as an additive is very important. Carbon (C) released from C-containing compounds such as hydrocarbons can substitute into B site in the MgB_2 structure and as a result flux pinning performance improves (Erdem et al., 2017), without a substantial reduction in the critical temperature (T_c). Inside the production methods, ball milling is also a popular approach for improving MgB_2 's superconducting performance. Ball milling reduces the grain size of starting powders, improves grain connectivity (Liu et al., 2020) and bulk density, increases defects in the structure and ensures a uniform distribution of additives in MgB_2 . As a result of functioning as pinning centres in the structure, the higher density of grain boundaries and defects in MgB_2 causes a rise in J_c .

In this study, oleic acid ($C_{18}H_{34}O_2$) was chosen as a chemical additive to increase the superconducting characteristics of bulk MgB_2 for practical applications. Oleic acid was wet mixed with B powder and B-Mg powder mixture to increase the homogeneity of MgB_2 structure, and then dried in the tube furnace. The obtained B powder coated with C and C-B-Mg powder mixture were ball milled for 2 h to look into the impact of ball milling on the oleic acid added MgB_2 produced with two different methods. The reason of the selection of oleic acid among the fatty acids as an additive is because of that it is an active C resource for MgB_2 and it can bind effectively to the un-oxidized boron surface with homogenous distribution providing a complete protection against air oxidation for B (Van Devenner et al., 2009). Oleic acid is a C-rich organic source releasing C from a long hydrocarbon chain at temperatures below those required for MgB_2 production. It is a colourless to pale yellow liquid with a mild odour. It is produced naturally by the body. It has a low melting point like about 13°C - 16°C . It is insoluble in water and soluble in methanol and ethanol. In the literature, there are two articles reported on the oleic acid added MgB_2 wire (Martinez et al., 2013; Laliena et al., 2015). In these articles, MgB_2 in wire form was investigated and the effects of ball milling and oleic acid addition on the critical current density of MgB_2 wires were examined. Unlike these studies, the ball milling effect was researched on the oleic acid added bulk MgB_2 samples produced by two different ways in this article. The phase composition, microstructure, magnetic and electrical properties of oleic acid added and milled samples were examined in detailed, then the results were compared with the pure and un-milled samples. It is thought that the results obtained from

this study can be a guide for other researchers working on the contribution of organic acids to the MgB₂ superconductor.

2. Material and method

2. Materyal ve metot

In this study, the bulk MgB₂ samples with oleic acid addition at the rate of 0 %, 5 % and 10 % by weight of 1 g MgB₂ were produced with two different methods by following the steps given below.

In the first method, B powder and oleic acid in liquid form (56 µl and 112 µl) were wet mixed in an appropriate stoichiometric ratio and ground in an agate mortar in air for 30 minutes. The mixture was dried in an aluminium oxide (alumina) crucible under 0.5 bar argon (Ar) atmosphere at 400°C for 1 h using a tube furnace. Thus, it was ensured that the B powder was coated with C, and the excess oleic acid in the structure was removed by evaporating, not the oleic acid that was directly bound to the B particles. The obtained B powder coated with C released from the oleic acid was then mixed with Mg powder according to the desired stoichiometric ratio. In addition, 5 wt % extra Mg powder was incorporated into the powder mixture to take advantage of the vapour pressure of Mg and to prevent stoichiometry shifts as a result of Mg evaporation during the sintering process. 1 gr powder mixture was pressed using an automatic pressing machine under 10 tons at 200°C. The pressing temperature was adjusted with a programmable temperature controller. The mould was kept at 200°C for 30 minutes under pressure. The MgB₂ samples were obtained as a pellet form with 5 mm in thickness and 13 mm in diameter by cooling the hot mould to room temperature under pressure. The MgB₂ pellets were placed one by one in a small chrome tube for sintering. The end of chrome tube was closed by welding and inside the furnace, the tube was inserted in a huge chrome tube. The oxygen in the tube was removed by vacuuming and a 1 bar Ar atmosphere was created in the tube. In a tube furnace, the pellets were sintered for 2 hours at 850°C. As a result, the three bulk MgB₂ samples named as A-0, A-5 and A-10 were produced with B particles coated with C using 0 %, 5 % and 10 % oleic acid ratios by weight of 1 gr MgB₂, respectively. To examine the influence of ball milling on superconducting characteristics of MgB₂ produced with first method, ZrO₂ milling balls with a 1:20 powder mass-ball mass ratio was added to the B coated with C-Mg powder mixture obtained in the first method before pressing process. The powder mixture was ball milled in a

ZrO₂ bowl using a ball milling machine with a rotation speed of 200 rpm for 2 h. To prevent the powder mixture from the oxidation that may occur due to heating during ball milling, the machine was stopped for 1 min. every 3 min. and the rotation direction was changed automatically. After ball milling, pressing and sintering processes used in the first method were applied to the powder mixture. Thus, two bulk MgB₂ samples produced by using ball milling were obtained with 5 wt % and 10 wt % oleic acid additions and named respectively as AM-5 and AM-10.

In the second method, Mg, B and oleic acid were mixed in a proper stoichiometric ratio and were ground for 30 minutes in an agate mortar in air. Then in an aluminium oxide (alumina) crucible, the wet powder mixture was dried under 0.5 bar Ar atmosphere at 400°C for 1 h. In order to determine ball milling effect, the dried mixture was milled for 2 h with a 1:20 powder mass-ball mass ratio and a rotation speed of 200 rpm, as in the first method. After ball milling, pressing and sintering processes used in the first method were applied to the powder mixture. With this second method, only 10 wt % oleic acid added bulk MgB₂ sample with 1 gr named as BM-10 was produced.

One can see all the oleic acid added bulk MgB₂ samples produced in this study from Table 1.

Table 1. Oleic acid added bulk MgB₂ samples produced in this study

Tablo 1. Bu çalışmada üretilen oleik asit katkılı külçe MgB₂ örnekler

Samples	Oleic acid content (wt %)	Ball milling (h)
A-0	0	-
A-5	5	-
A-10	10	-
AM-5	5	2
AM-10	10	2
BM-10	10	2

2.1. Analysis

2.1. Analizler

X-ray diffractometer ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$) with CuK α radiation was used for phase determination and peak analysis of the produced samples. The measurements were taken with a scanning speed of 0.2°/min in the range of $2\theta = 10^\circ-80^\circ$. From the XRD measurements, the lattice parameters *a* and *c* were determined. The peak shifting was analysed

also for all the samples. Scanning electron microscopy (SEM) analysis was also carried out to determine ball milling effect on the grain size, grain connectivity and grain boundaries of MgB₂.

The studied samples were cut into a rectangular shape and magnetization versus magnetic field intensity, $M(H)$ measurements were taken at 5 K and 20 K under ± 7 T with 50 Oe/s sweep speed by using physical properties measurement system (PPMS). The critical current density values of the samples depending on the magnetic field, $J_c(\mu_0 H)$ were calculated using the magnetization loops obtained from $M(H)$ measurements and Bean's critical state model (Bean, 1962) given by the equation $J_c = 20\Delta M / [a(1 - (a/3b))]$. Here, ΔM is in emu/cm³, a and b are in cm ($a < b$) and J_c is in A/cm². The flux pinning force values as a function of magnetic field, $F_p(B)$ were obtained by using $F_p = J_c \times B$ equation. Here, F_p is in N/m³. The T_c values for the produced samples were determined from the magnetic moment depending on temperature curves, $m(T)$. The $m(T)$ measurements were performed from 300 K to 5 K at $H = 100$ Oe by using PPMS.

Resistivity versus temperature, $\rho(T)$ measurements of the samples were taken when the applied magnetic field was at $B = 0$ T. The variation observed in resistivity was recorded while the samples were cooling from 300 K to 10 K. The values of intrinsic residual resistivity (ρ_0) and residual resistivity ratio (RRR) were calculated using the resistivity values at 40 K and 300 K ($\rho_{40\text{K}}$, $\rho_{300\text{K}}$) and $B = 0$ T. The ρ_0 values were calculated from the equation $\rho_0 = K \times \rho_{40\text{K}}$ (Matsushita et al., 2008). Here, K is the electrical connectivity and given as $K = \Delta\rho_g / \Delta\rho$. The value of $\Delta\rho_g$ is 4.3 $\mu\Omega\text{cm}$ for a good pure single crystal (Eltsev et al., 2002), and $\Delta\rho$ is equal to $\Delta\rho = \rho_{300\text{K}} - \rho_{40\text{K}}$. The equation of $RRR = \rho_{300\text{K}} / \rho_{40\text{K}}$ was also used to determine the RRR values (Jiang et al., 2006).

3. Results and discussion

3.1. Bulgular ve tartışma

Figure 1a-f show the XRD patterns of A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples, respectively. The MgB₂ peaks shown in Figure 1a represent the (001), (100), (101), (002), (110), (102), (111), (200), (201) phases, respectively. The main phase for all the samples is MgB₂ and small MgO peaks is also observed. The MgO peaks shown in Figure 1a represent the (111), (220) and

(222) phases, respectively. A-5 and A-10 samples show a relatively high intensity of MgO peak than the samples ball milled. Thus, it can be said that main phase is preserved for the oleic acid added samples and there is not a specific effect of oleic acid on the phase formation of MgB₂. Also, contrary to expectations, ball milling does not increase the oxidation in the MgB₂ structure.

Figure 2a and b respectively illustrate the lattice parameters a and c versus the oleic acid content for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples. In literature, the a and c -axis parameters are respectively given as 3.086 Å and 3.524 Å (Buzea & Yamashita, 2001). The values of a and c parameters obtained for the A-0 reference sample are a bit higher than that of the literature because of the production method. When the Figure 2a and b are analysed, it is seen that the a -lattice parameter decreases when the amount of oleic acid is increased for the oleic acid added samples compared with the A-0 reference sample. The increase-decrease trend in the c -lattice parameter is not systematic for the studied samples. The decrement of a -lattice parameter indicates that the C released from the oleic acid substitutes into the B sites in the MgB₂ lattice (Takenobu et al., 2001). Due to the different atomic sizes of C and B atoms, C substitution acting as pinning centres, causes disorders and strain in the lattice. The reason for the sharp reduce in the a -axis for the A-10 sample is the reduction of crystallinity due to the presence of large amount of C in the structure.

The variation of (110) peak depending on the amount of oleic acid for the bulk MgB₂ samples produced in this study is shown in Figure 3. The (110) peak observed at approximately 59.9°, represents in-plane scattering and is used to determine the a -lattice parameter. It is seen from Figure 3 that the peak intensity of (110) decreases and the peak position shifts to big angles as the oleic acid amount increases. These changes observed in (110) peaks are an indication of a decrease in a -lattice parameter (Kazakov et al. 2005) and the increase in the density of intra-plane disorders because the C substituted to MgB₂ lattice introduces the lattice disorders in the ab plane (Das et al., 2015). The intensity of (110) peak decreases more for the A-5 and A-10 un-milled samples comparing to the AM-5, AM-10 and BM-10 milled samples, because of more degradation of crystallinity for the un-milled samples with the oleic acid addition.

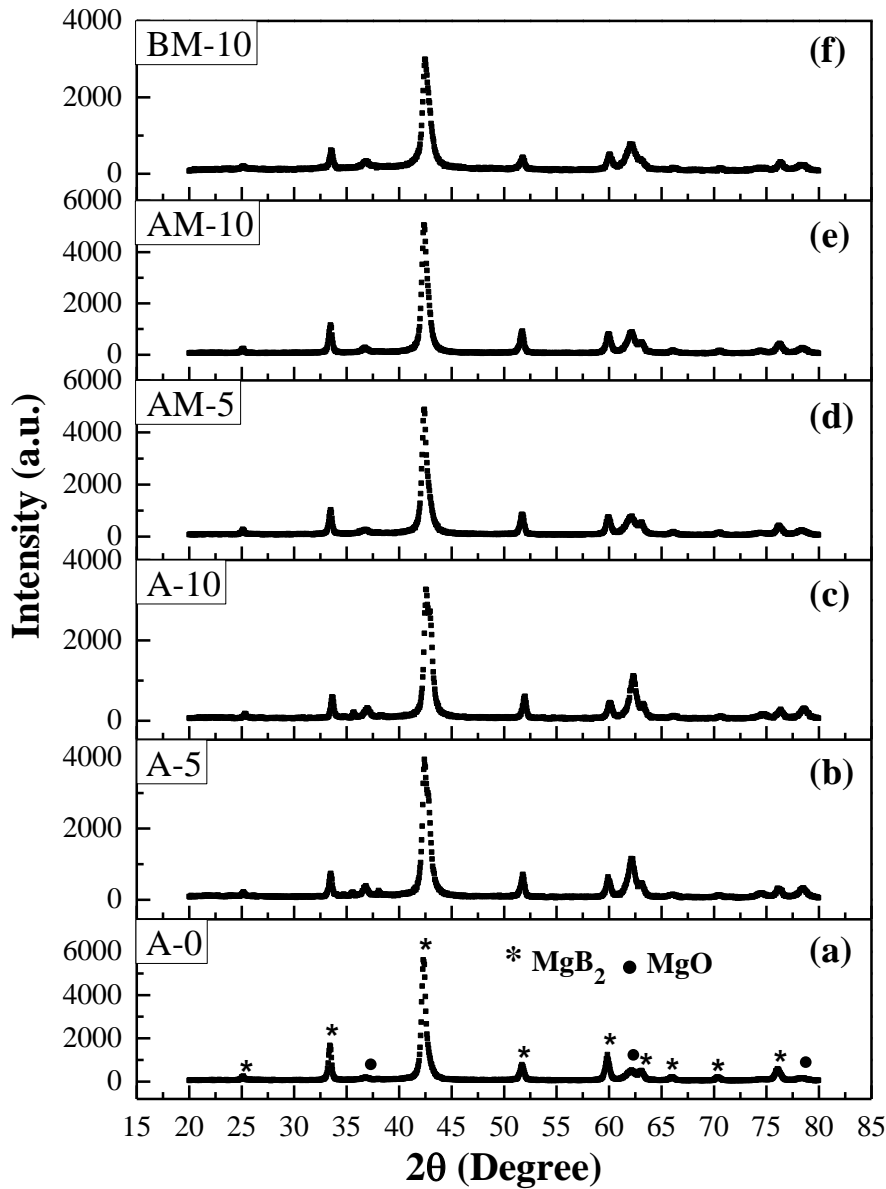


Figure 1. (a-f) XRD patterns of the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 oleic acid added bulk MgB_2 samples, respectively.

Şekil 1. (a-f) Sırasıyla A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 oleic asit katılı külçe MgB_2 örneklerin XRD desenleri

Figure 4a-f show the SEM images of the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples, respectively. Compared to the A-0 reference sample, it is seen that the structure shows an agglomeration for the A-5 and A-10 un-milled samples because of the oleic acid does not disperse homogeneously in the structure (see Figure 4b and c), while the microstructure gains a denser appearance with small-sized grains, homogeneity increases and grain connectivity improves for the AM-5, AM-10 and BM-10 ball milled samples (see

Figure 4d-f). It is known that the strong grain connectivity provides strong pinning performance at high fields which is essential for high J_c values (Wu et al., 2006). In addition, the density of grain boundaries increases because of the reduction of grain size due to the ball milling. The J_c value for the ball milled samples is projected to rise since the major pinning mechanism in MgB_2 is grain boundaries.

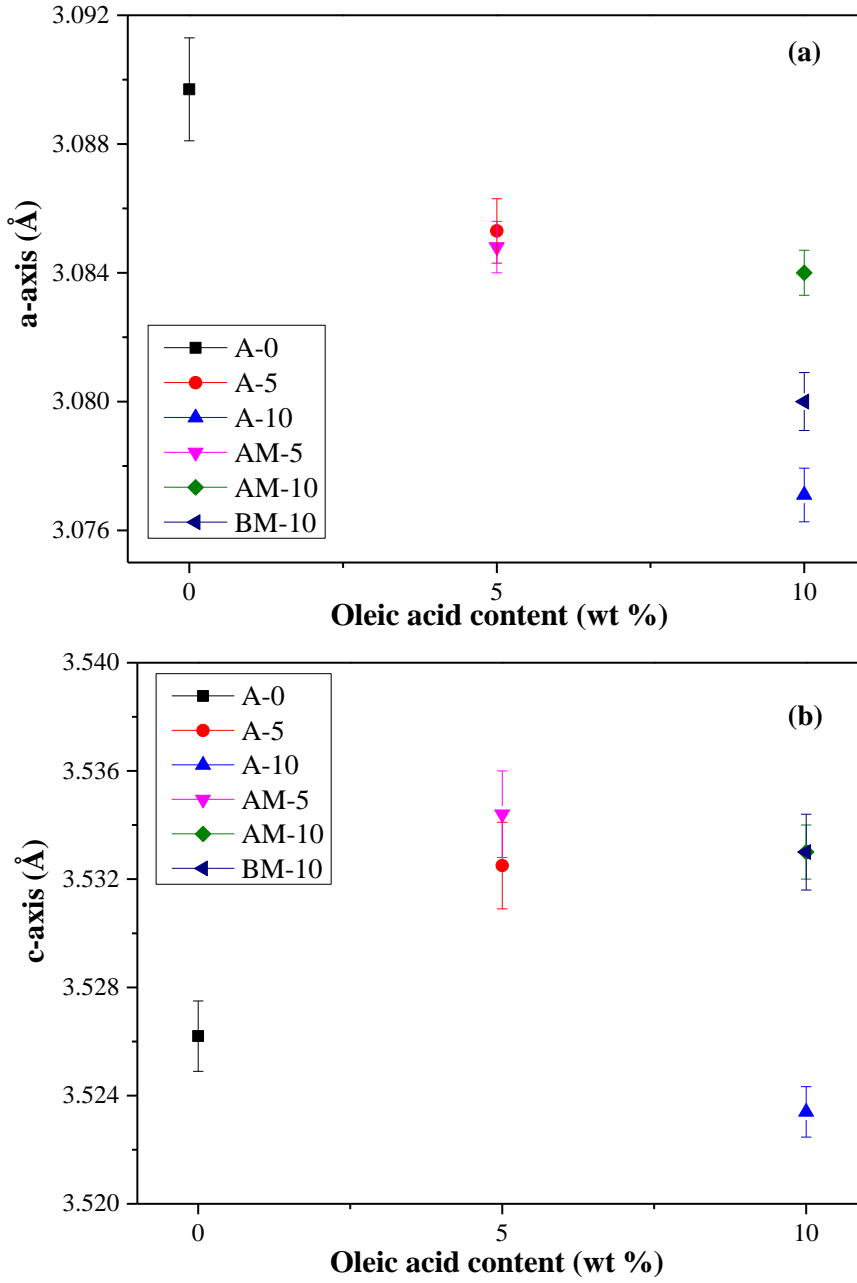


Figure 2. Variation of (a) a and (b) c lattice parameters versus oleic acid content for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples.

Şekil 2. A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 örnekleri için oleik asit miktarına karşı (a) a ve (b) c örgü parametrelerinin değişimi.

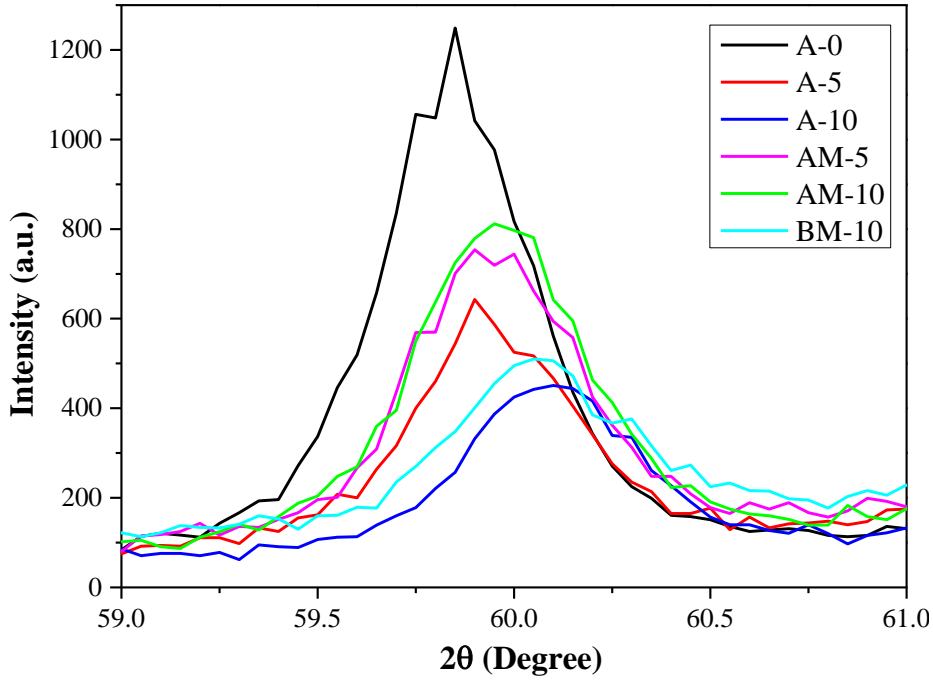


Figure 3. Variation of peak position and intensity of (110) peak observed at 59.9° for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples.

Şekil 3. A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 örnekleri için 59.9° 'de gözlenen (110) pikinin pik pozisyonunda ve şiddetindeki değişim

The J_c curves at 5 K and 20 K figured out from $M(H)$ loops, shown as inside figures, are given in Figure 5a and b, respectively. From the inside figure, it is seen that there is a flux jump in the magnetization curves at 5 K. As the magnetic diffusion rate becomes faster than the thermal diffusion rate at low temperature, magnetic flux abruptly moves to cause flux jumps (Kimishima et al., 2007). The hysteresis loops observed in Figure 5a and b are due to flux trapping in the samples and have a supporting role on J_c parameter. When the J_c curves at 5 K are examined in detail, it is seen that all the oleic acid added samples show a small J_c value at low magnetic fields until 3.5 T, compared to the A-0 reference sample. When $\mu_0 H > 3.5$ T, the AM-5 and AM-10 ball-milled samples show the highest J_c values. In addition, for $\mu_0 H > 5$ T the J_c values are higher for all the samples than that of the A-0 reference sample. A similar behaviour is seen in the J_c curves at 20 K in Figure 5b. For $\mu_0 H > 2.5$ T at 20 K, the AM-10 sample shows the highest J_c value. For $\mu_0 H > 4.5$ T the J_c

values are higher for all the oleic acid added samples than that of the A-0 reference one. One can see from Table 2 the J_c values at 6 T, 5 K and 4 T, 20 K for all the produced samples. The highest J_c values are respectively observed at 5 K for the AM-10, AM-5, BM-10, A-5, A-10 and A-0 samples. The highest J_c values for AM-10 sample are 2.60×10^4 A/cm² at 6 T, 5 K and 1.04×10^4 A/cm² at 4 T, 20 K. These J_c values are respectively about 3 times and 2.6 times higher than that of the A-0 reference sample, and about 2.8 times and 2.5 times higher than that of the A10 un-milled sample. In addition, the J_c value at 6 T, 5 K of AM-10 bulk sample which was ball milled for 2 h with a 1:20 powder mass-ball mass ratio and a rotation speed of 200 rpm, is compatible with the J_c value of W10B-MB wire sample with 10 wt % oleic acid addition and ball milled for 3 h with a 1:26 powder mass-ball mass ratio and a rotation speed of 400 rpm, as reported by Laliene et al. (2015).

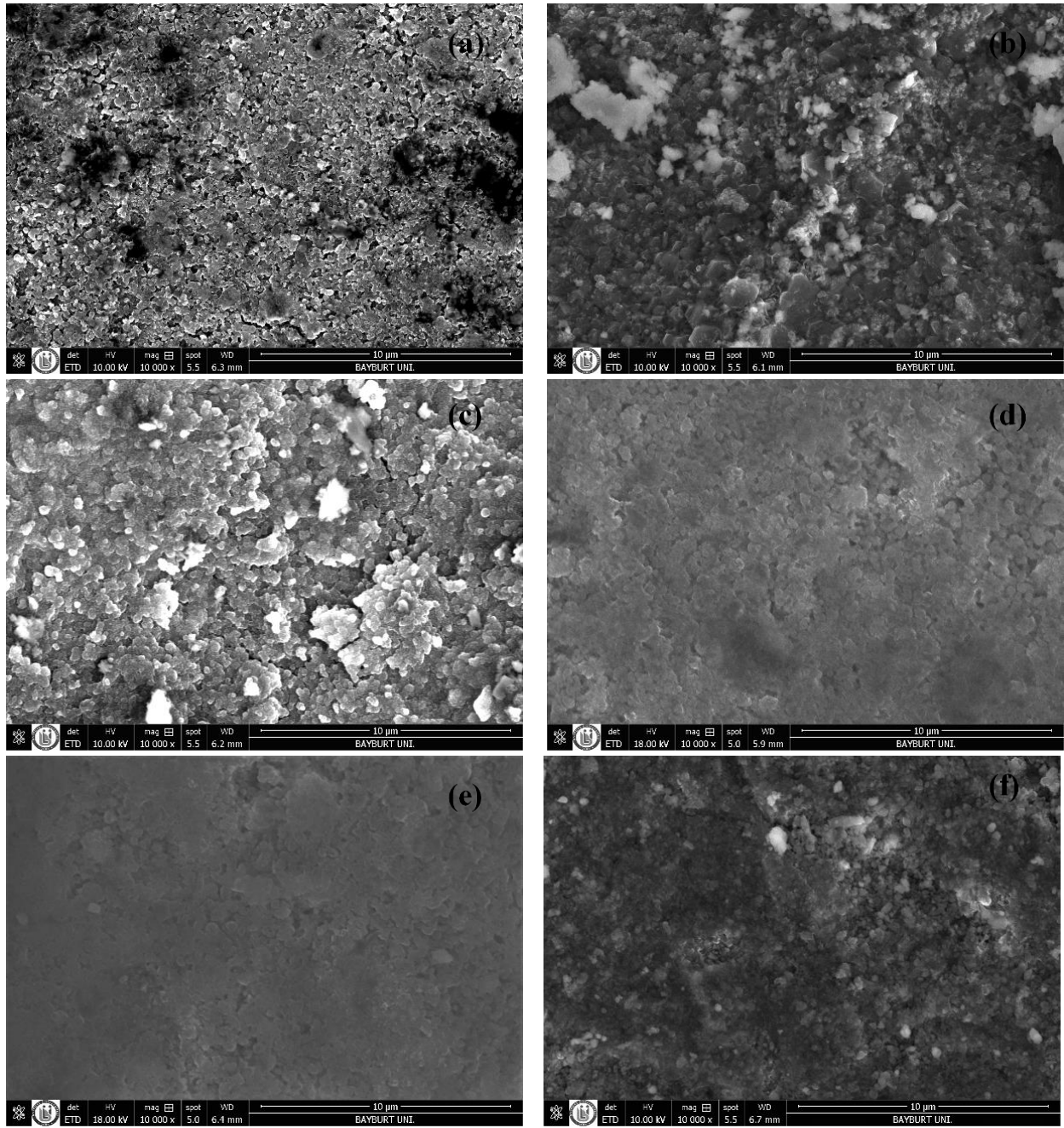


Figure 4. (a-f) SEM images of the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples, respectively.

Şekil 4. (a-f) Sırasıyla A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 örneklerinin SEM görüntüleri

In this study, the J_c values of all the AM-5, AM-10, BM-10 ball milled samples at 5 K for $\mu_0 H > 5$ T are higher compared with the J_c values of A-0, A-5 and A-10 un-milled samples. This result differs from that reported by [Laliena et al. \(2015\)](#). The J_c value at 5 K for W10B-MB ball-milled wire sample is lower until approximately for $\mu_0 H > 8.5$ T than that of the un-milled sample. Thus, it can be concluded

that the selected ball milling parameters used in this study is significantly effective in the increment of J_c values at high fields. In addition, comparing the J_c values of AM-5, AM-10 and BM-10 samples given in Table 2, one can say that ball milling is more effective for the first method used in this study to enhance the J_c value at high fields for both measurement temperatures.

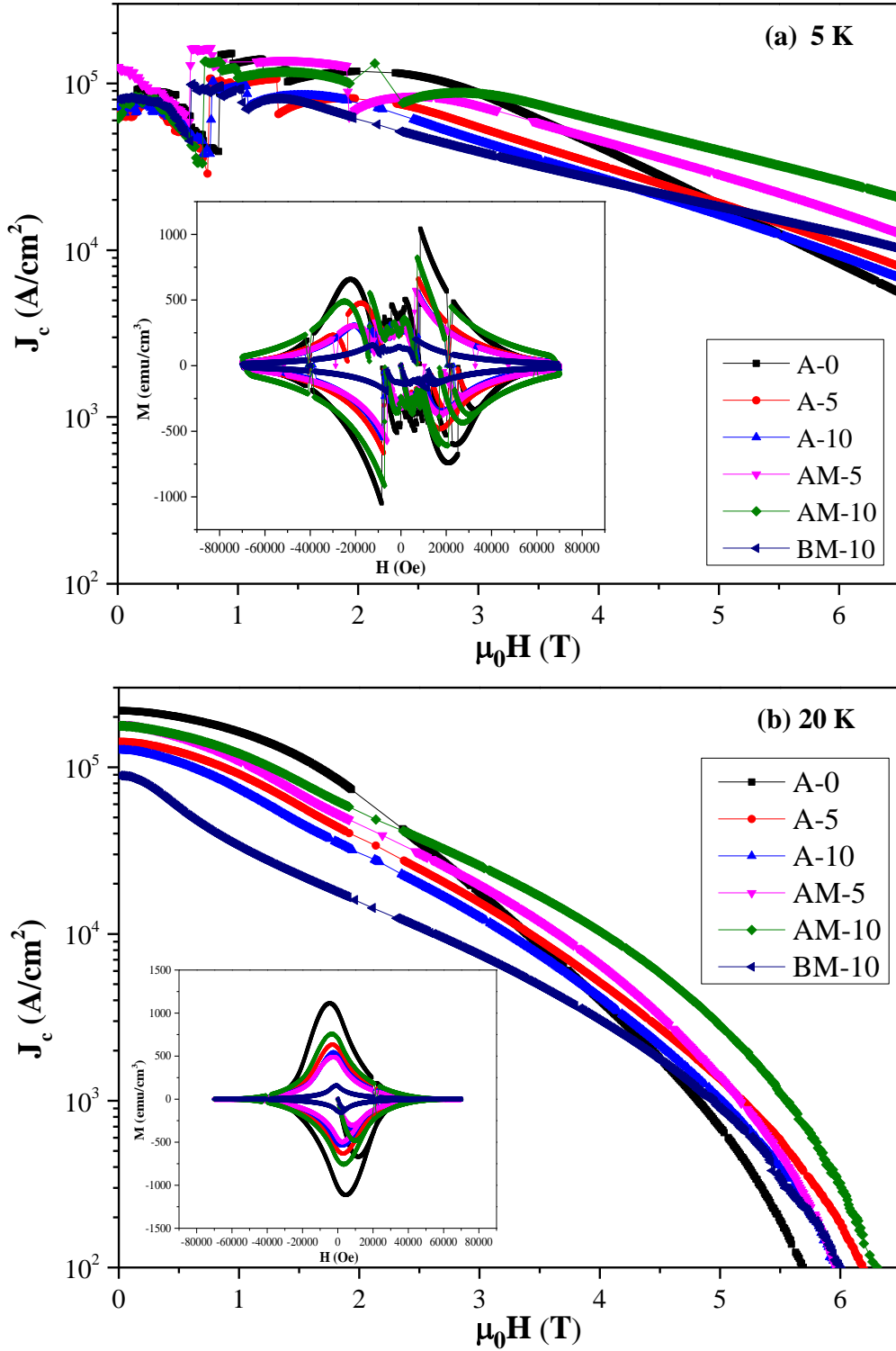


Figure 5. The J_c curves calculated from the $M(H)$ loops shown in the inside figures for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples at (a) 5 K and (b) 20 K.

Şekil 5. A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 örnekleri için (a) 5 K ve (b) 20 K’de iç şekillerde gösterilen $M(H)$ çevriminden hesaplanan J_c eğrileri

To investigate the flux pinning performance of the produced samples in detailed, the F_p values were calculated from the J_c curves shown in Figure 5 and the $F_p(\mu_0 H)$ curves were plotted in Figure 6a and b at 5 K and 20 K, respectively. The A-0 reference sample shows the highest F_p values for the low

field regions at 5 K and 20 K, among the other samples. For $\mu_0 H > 5$ T and $\mu_0 H > 4.5$ T, similar to the results obtained from Figure 5, the F_p values are respectively higher at 5 K and 20 K for the samples with oleic acid addition than that of the A-0 reference sample. As a result of these findings, the

increment of J_c values is attributed to the strong flux pinning performance of the oleic acid added samples at high fields, and also homogenous structure and strong grain connectivity, especially observed in the ball-milled samples (see Figure 4d-

f). The highest F_p value is obtained for the AM-10 sample at both measurement temperatures and high fields, compatible with the results obtained from Figure 4 and Figure 5.

Table 2. The J_c values at 6 T, 5 K and at 4 T, 20 K for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples, respectively.

Tablo 2. *Sırasıyla A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 örnekleri için 6 T, 5 K ve 4 T, 20 K'deki J_c değerleri.*

Samples	J_c (6 T, 5K) (A/cm ²)	J_c (4 T, 20 K) (A/cm ²)
A-0	0.83×10^4	0.40×10^4
A-5	1.08×10^4	0.52×10^4
A-10	0.92×10^4	0.42×10^4
AM-5	1.69×10^4	0.65×10^4
AM-10	2.60×10^4	1.04×10^4
BM-10	1.25×10^4	0.30×10^4

Figure 7a illustrates the magnetic moment depending on temperature, $m(T)$ curves between 30 K and 300 K for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples. In order to define the T_c values from the $m(T)$ curves, the curves are plotted between 35 K and 40 K, as shown in Figure 7b. For the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples, the T_c values are respectively obtained as 38.14 K, 37.87 K, 38.27 K, 38.63 K, 37.88 K and 37.64 K. For the A-10 oleic acid added and unmilled sample, the T_c value is almost same as that of the A-0 reference sample. It implies that the C

content substituted to the MgB₂ lattice is much less than in other samples. Compared with the A-0 reference sample, the T_c value increases about 0.5 K for the AM-5 ball milled sample, because of the enhancing homogeneity and grain connectivity, as shown in Figure 4d. For the AM-10 and BM-10 samples, the T_c values decrease because of more C content substituted into the lattice. The decrease observed in T_c value is more prominent in the BM-10 sample produced with second method.

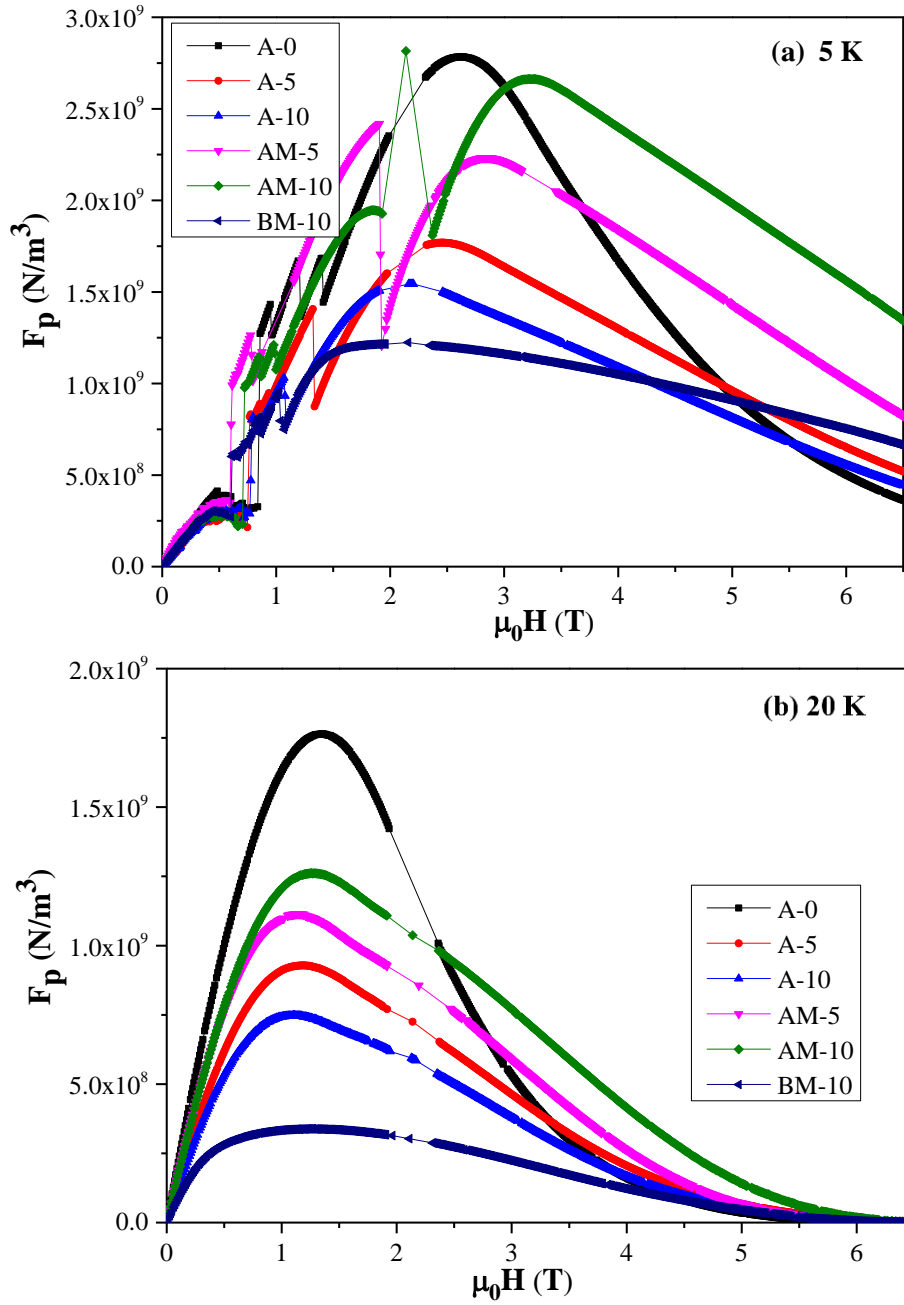


Figure 6. The flux pinning force density curves versus the magnetic field, $F_p(\mu_0 H)$ for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples at (a) 5 K and (b) 20 K

Şekil 6. A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 örnekleri için (a) 5 K ve (b) 20 K'de manyetik alana karşı akı çivileme kuvvet yoğunluğu eğrileri, $F_p(\mu_0 H)$.

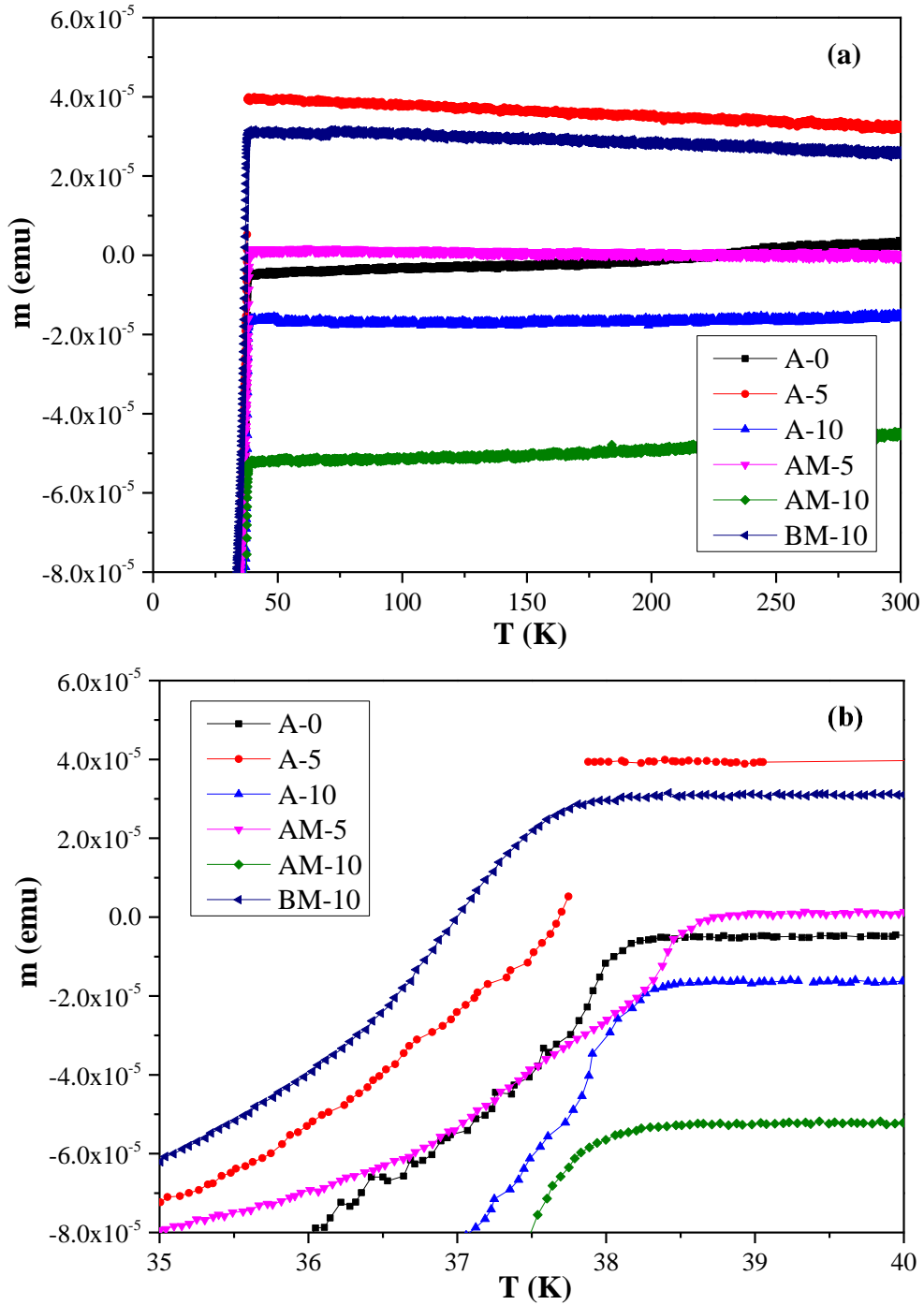


Figure 7. Magnetic moment depending on temperature, $m(T)$ curves between (a) 30 K and 300 K and (b) 35 K and 40 K for the A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10, and BM-10 samples.

Şekil 7. A-0, A-5, A-10, AM-5, AM-10 ve BM-10 örnekleri için (a) 30 K ve 300 K ve (b) 35 K ve 40 K aralığında sıcaklığa bağlı manyetik moment, $m(T)$ eğrileri.

The temperature dependence of resistivity, $\rho(T)$ curves between 300 K and 10 K for the A-0, A-5 and AM-5 samples are illustrated in Figure 8. The resistivity curves are intermittent for the temperature values at which the transition to zero resistivity is observed for the samples. Therefore, the T_c values of the samples could not be determined from the $\rho(T)$ curves. The values of residual resistivity ratio (RRR) and intrinsic residual resistivity (ρ_0) for the A-0, A-5 and AM-5

samples were calculated by using the resistivity values at $B = 0$ T obtained from Figure 8. The values of ρ_{40K} , ρ_{300K} , $\Delta\rho$, ρ_0 and RRR are given in Table 3. Because the ball milling process enhances the C substitution and the density of defects in the structure, the resistivity values of ρ_{40K} and ρ_{300K} of the AM-5 ball milled sample are the highest among the other samples. In addition, the ρ_0 value is the highest for the AM-5 sample, indicating that the mean free path of carries has become about 1.3

times shorter than that of the A-0 reference sample due to the enhanced electron scattering because of more C substitution into the lattice resulting in an increase in H_{c2} and thus J_c (Ye et al., 2014). The increment of ρ_0 value is compatible with the decrement of RRR value for the AM-5 sample. The decrease observed in RRR value indicates that the

electron scattering and the lattice disorders increase owing to more C substitution to B sites (Das et al., 2015). The RRR value is higher for the A-5 sample because the residual C that does not entrance the lattice, enhances the RRR value. These results imply that the ball milling improves the C substitution into the MgB_2 lattice.

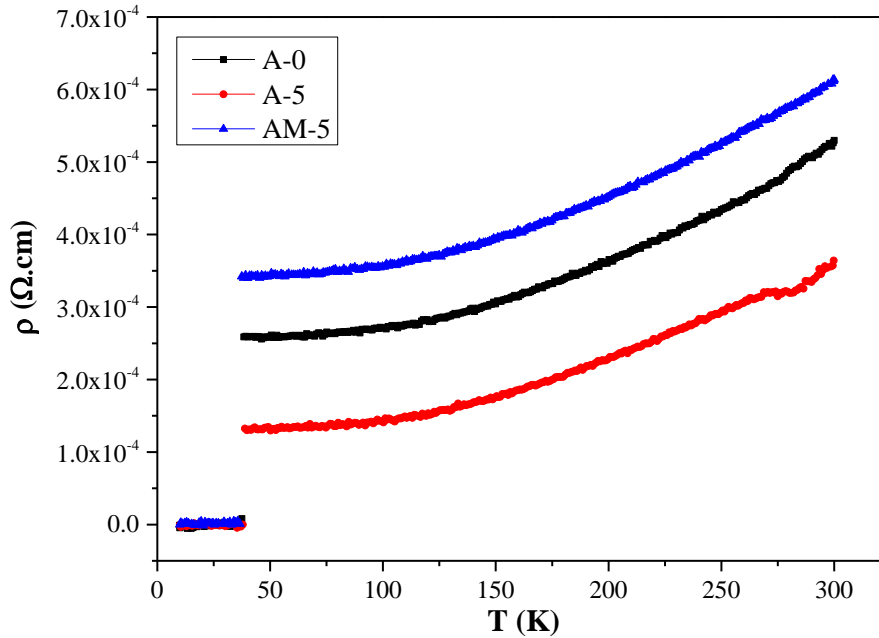


Figure 8. Resistivity versus temperature, $\rho(T)$ curves between 300 K and 10 K at $B = 0$ T for the A-0, A-5 and AM-5 samples.

Şekil 8. A-0, A-5 ve AM-5 örnekleri için 300 K ve 10 K arasında ve $B = 0$ T’de sıcaklığa karşı öz direnç, $\rho(T)$ eğrileri.

Table 3. The values of ρ_{40K} , ρ_{300K} , $\Delta\rho$, ρ_0 and RRR for the A-0, A-5 and AM-5 samples.

Tablo 3. A-0, A-5 ve AM-5 örnekleri için ρ_{40K} , ρ_{300K} , $\Delta\rho$, ρ_0 ve RRR değerleri.

Samples	ρ_{40K} ($\mu\Omega\text{cm}$)	ρ_{300K} ($\mu\Omega\text{cm}$)	$\Delta\rho$ ($\mu\Omega\text{cm}$)	ρ_0 ($\mu\Omega\text{cm}$)	RRR
A-0	258	529	271	4.09	2.05
A-5	130	364	234	2.39	2.80
AM-5	340	613	273	5.36	1.80

4. Conclusions

4. Sonuçlar

The influence of ball milling on some superconducting characteristics of the oleic acid added MgB_2 bulk samples prepared by two different ways was investigated in this research. The results show that ball milling process enhances the homogeneity and grain connectivity of the oleic acid added samples. In addition, the C substitution into the MgB_2 and the impurity scattering increase and thus the mean free path decreases. Ball milling also causes an increase in the amount of defects and disorders in MgB_2 , operating as pinning centres. Thus, the F_p and J_c values of the ball milled

samples at high magnetic fields increase while the T_c values slightly decrease. Because the first method supports the ball milling effect on the C substitution into B sites and the homogenous distribution of the oleic acid addition in the structure, the ball milling process used in this study with a 1:20 powder mass-ball mass ratio and for 2 h with a rotation speed of 200 rpm is more effective to enhance the J_c value at high fields for the samples produced with the first method, compared to the second one.

Acknowledgement*Teşekkür*

The author would like to thank Tayfur Kucukomeroglu for his kind technical assistance. The Scientific Research Project Coordinatorship of Bayburt University supported this study with project number 2019/02-69001-02. The samples were made at Karadeniz Technical University in Trabzon, Turkey.

Declaration of ethical code*Etik beyan*

The author of this article declares that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Conflicts of interest*Çıkar çatışması beyanı*

The author declares that there is no conflict of interest.

References*Kaynaklar*

- Bean, C. P. (1962). Magnetization of hard superconductors. *Physical review letters*, 8(6), 250. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.8.250>
- Buzea, C., & Yamashita, T. (2001). Review of the superconducting properties of MgB₂. *Superconductor Science and Technology*, 14(11), R115. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/14/11/201>
- Das, S., Bernhard, C., & Varma, G. D. (2015). Effect of combined addition of graphene oxide and citric acid on superconducting properties of MgB₂. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 509, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.12.005>
- Eltsev, Y., Lee, S., Nakao, K., Chikumoto, N., Tajima, S., Koshizuka, N., & Murakami, M. (2002). Anisotropic superconducting properties of MgB₂ single crystals probed by in-plane electrical transport measurements. *Physical Review B*, 65(14), 140501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.140501>
- Erdem, O., Abdioglu, M., Guner, S. B., Celik, S., & Kucukomeroglu, T. (2017). Improvement in levitation force performance of bulk MgB₂ superconductors through coronene powder adding. *Journal of Alloys and Compounds*, 727, 1213-1220. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.242>
- Erdem, O., Guner, S. B., Celik, S., & Kucukomeroglu, T. (2020). Superconducting and levitation force characterisation of pyrene added MgB₂ bulk superconductors. *Cryogenics*, 112, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103205>
- Erdem, O., & Yanmaz, E. (2015). Effect of Er doping on the superconducting properties of porous MgB₂. *Bulletin of Materials Science*, 38(1), 89-93. <https://doi.org/10.1007/s12034-014-0810-y>
- Erdem, O., & Yanmaz, E. (2017). Enhanced pinning properties of laser-irradiated bulk MgB₂ superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 30(3), 769-776. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3777-7>
- Gozzelino, L., Gerbaldo, R., Ghigo, G., Laviano, F., Torsello, D., Bonino, V., ... & Badica, P. (2019). Passive magnetic shielding by machinable MgB₂ bulks: measurements and numerical simulations. *Superconductor Science and Technology*, 32(3), 034004. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aaf99e>
- Jiang, J., Senkowicz, B. J., Larbalestier, D. C., & Hellstrom, E. E. (2006). Influence of boron powder purification on the connectivity of bulk MgB₂. *Superconductor Science and Technology*, 19(8), L33. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/19/8/L02>
- Kazakov, S. M., Puzniak, R., Rogacki, K., Mironov, A. V., Zhigadlo, N. D., Jun, J., ... & Karpinski, J. (2005). Carbon substitution in MgB₂ single crystals: Structural and superconducting properties. *Physical Review B*, 71(2), 024533. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.024533>
- Kimishima, Y., Takami, S., Okuda, T., Uehara, M., Kuramoto, T., & Sugiyama, Y. (2007). Complete flux jump in bulk MgB₂ sintered under high pressure. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 463, 281-285. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.03.492>
- Klöppel, S., Marian, A., Haberstroh, C., & Bruzek, C. E. (2021). Thermo-hydraulic and economic aspects of long-length high-power MgB₂ superconducting cables. *Cryogenics*, 113, 103211. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103211>
- Kulich, M., Kováč, P., Hain, M., Rosová, A., & Dobročka, E. (2016). High density and connectivity of a MgB₂ filament made using the internal magnesium diffusion technique. *Superconductor Science and Technology*, 29(3), 035004. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/3/035004>

- Laliena, C., Martínez, E., Angurel, L. A., & Navarro, R. (2015). Effect of ball milling and fatty acid addition on the properties of MgB₂ wires. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2364158>
- Liu, H. R., Xie, Z. W., Jin, L. H., Yang, F., Zhang, S. N., Wang, Q. Y., ... & Zhou, L. (2020). Improved superconducting properties in graphene-doped MgB₂ bulks prepared by high energy ball milling. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(11), 8837-8843. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03418-3>
- Majoros, M., Sumption, M. D., Parizh, M., Wan, F., Rindfleisch, M. A., Doll, D., ... & Collings, E. W. (2022). Magnetic, Mechanical and Thermal Modeling of Superconducting, Whole-Body, Actively Shielded, 3 T MRI Magnets Wound Using MgB₂ Strands for Liquid Cryogen Free Operation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(4), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3147137>
- Martínez, E., Navarro, R., & Andrés, J. M. (2013). Improvement of the critical current density on in situ PIT processed Fe/MgB₂ wires by oleic acid addition. *Superconductor Science and Technology*, 26(12), 125017. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/12/125017>
- Matsushita, T., Kiuchi, M., Yamamoto, A., Shimoyama, J. I., & Kishio, K. (2008). Essential factors for the critical current density in superconducting MgB₂: connectivity and flux pinning by grain boundaries. *Superconductor Science and Technology*, 21(1), 015008. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/01/015008>
- Naito, T., Ogino, A., Fujishiro, H., & Awaji, S. (2020). Effects of Carbon Doping on Trapped Magnetic Field of MgB₂ Bulk Prepared by in-situ Hot Isostatic Pressing Method. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-6. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2985355>
- Sun, X. G., Yang, X. S., Pan, X. F., Xi, D., Wang, Q. Y., Yan, G., ... & Zhao, Y. (2019). Ex situ MgB₂ superconducting tape with very high critical current density by using low-temperature sintering precursor powders. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32(5), 1225-1230. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4861-y>
- Surdu, A. E., Hamdeh, H. H., Al-Omari, I. A., Sellmyer, D. J., Socrovisciuc, A. V., Prepelita, A. A., ... & Sidorenko, A. S. (2011). Enhancement of the critical current density in FeO-coated MgB₂ thin films at high magnetic fields. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2(1), 809-813. <https://doi.org/10.3762/bjnano.2.89>
- Takenobu, T., Ito, T., Chi, D. H., Prassides, K., & Iwasa, Y. (2001). Intralayer carbon substitution in the MgB₂ superconductor. *Physical Review B*, 64(13), 134513. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.134513>
- Van Devener, B., Perez, J. P. L., & Anderson, S. L. (2009). Air-stable, unoxidized, hydrocarbon-dispersible boron nanoparticles. *Journal of Materials Research*, 24(11), 3462-3464. <https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0412>
- Wen, C., Liu, J., Yu, Z., Liu, J., Zhao, Z., & Wang, J. (2019). Research on superconducting magnet in a superconducting synchronous generator. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32(11), 3385-3395. <https://doi.org/10.1007/s10948-019-5113-5>
- Wu, Y. F., Lu, Y. F., Yan, G., Li, J. S., Feng, Y., Tang, H. P., ... & Zhang, P. X. (2006). Improved superconducting properties in bulk MgB₂ prepared by high-energy milling of Mg and B powders. *Superconductor Science and Technology*, 19(11), 1215. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/19/11/021>
- Ye, S. J., Matsumoto, A., Zhang, Y. C., & Kumakura, H. (2014). Strong enhancement of high-field critical current properties and irreversibility field of MgB₂ superconducting wires by coronene active carbon source addition via the new B powder carbon-coating method. *Superconductor Science and Technology*, 27(8), 085012. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/8/085012>

UV kürlenmeli vernik uygulanmış karakavak odununda renk, parlaklık, salınımsal sertlik ve yüzeye yapışma direnci üzerine yapay yaşlandırmanın etkisi

The effect of artificial aging on color, glossiness, pendulum hardness and adhesion to the surface of black poplar wood treated with UV curable varnish

Ümit AYATA^{*1,a}, Nevzat ÇAKICIER^{2,b}, Levent GÜRLEYEN^{3,c}

¹Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Bayburt

²Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce

³Gölyaka Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Gölyaka, Düzce

• Geliş tarihi / Received: 24.08.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 07.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 07.07.2022

Öz

Karakavak odunu mobilya, lambri ve kontrplak üretimi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, karakavak (*Populus nigra* L.) odununa uygulanmış 3 ve 5 kat UV sistem vernik katmanları ile yapay yaşlandırma uygulaması arasındaki ilişki araştırılmıştır. Buna ek olarak, yaşlandırma öncesi ve sonrasında (252 ve 504 saat) vernikli malzemeler üzerinde renk parametreleri (ΔE^* , ΔL^* , Δa^* , Δb^* , L^* , a^* ve b^*), parlaklık, salınımsal sertlik ve yüzeye yapışma direnci (pull-off) testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, her iki vernik türü için UVB-313 lambalarına sahip yaşlandırma koşulları sonlarında yaşlandırma süresinin artması ile yüzeye yapışma direncinde ve L^* değerinde azalma belirlenirken, a^* ve b^* değerleri için artışlar meydana gelmiştir. ΔE^* değerleri 3 kat uygulamasının 5 kat uygulamasınınkinden yüksek olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, her iki vernik uygulaması için bütün yönlerde ve derecelerde yapılan parlaklık ölçümleri, yaşlandırma süresinin artması ile azaldığı belirlenmiştir. Salınımsal sertlikte 3 kat uygulamasına sahip yüzeylerin, 5 kat uygulamasınınkinden yüksek olduğu görülmüş, her iki vernik türünde de 252. saatin sonunda azalmalar görülürken, 504. saatin sonunda artış elde edilmiştir. Sonuç olarak, istenilen sertlik direncine ait ortam koşullarına göre (mekân zemin tercihi) kullanım alanları doğrultusunda bu malzemenin kullanılması önerilebilir.

Anahtar kelimeler: Karakavak, Parlaklık, Renk, Salınımsal sertlik, UV sistem vernik, Yüzeye yapışma

Abstract

Black poplar wood is used for the manufacture of furniture, paneling, and plywood. In this study, the relationship between 3 and 5 layers of UV system varnish applied to black poplar (*Populus nigra* L.) wood and artificial aging was investigated. In addition, before and after aging (252 and 504 hours), color parameters (ΔE^* , ΔL^* , Δa^* , Δb^* , L^* , a^* , and b^*), glossiness, pendulum hardness, and surface adhesion resistance (pull-off) tests were performed on varnished materials. According to the results obtained, for both varnish types, a decrease in surface adhesion resistance and L^* value was determined with the increase of aging time after aging conditions with UVB-313 lamps, while increases were determined for a^* and b^* values. ΔE^* values were found to be higher than that of the 3-layer application. In addition, it was determined that the measurements made in all directions and degrees glossiness for both varnish applications decreased with increasing aging time. It was observed that the pendulum hardness of the surfaces with 3 coats application was higher than that of the 5 coat application, while decreases were observed at the end of the 252 hours in both varnish types, while an increase was obtained at the end of the 504 hours. As a result, it is recommended to use this material in line with the usage areas according to the ambient conditions of the desired hardness resistance (space floor preference).

Keywords: Black poplar, Glossiness, Color, Pendulum hardness, UV system varnish, Adhesion resistance

*a Ümit AYATA; umitayata@bayburt.edu.tr, Tel: (0458) 333 20 34, orcid.org/0000-0002-6787-7822

^b orcid.org/0000-0001-6566-7541

^c orcid.org/0000-0002-6867-8059

1. Giriş

1. Introduction

Ahşap ve ahşaptan türetilmiş malzemeler, mobilya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ahşap kaplamalar, zaman içinde yüksek dayanım sağladıkları ve estetik özellikler sundukları için ilgi görmektedir (Kaboorani vd., 2017). Yüzey işlemi ahşabın hizmet ömrünü uzatmak için kullanılabilir (Feist, 1982; Brischke vd., 2006). İç mekânlarda kullanılan ahşap üzerine boya ve diğer cilalar, onarmadan on yıllarca koruma sağlayabilir (Banov, 1973).

Ahşap döşeme ürünlerinin kalitesi, bitirme işlemi ile yakından ilgilidir. Bir kaplama sisteminin doğru seçimi, mekanik, optik ve kimyasal performansı en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir (Landry vd., 2010). Ahşabın ışıkla bozunması, şeffaf cilaların altında da meydana gelir ve bu, dış mekânlarda kullanılan şeffaf film oluşturucu verniklerin dayanıklılığını büyük ölçüde azaltır (Macleod vd., 2005; Chang & Chou, 2000).

Ahşap malzemenin yıpranması, güneş radyasyonu, su, atmosferik sıcaklık, nem, oksijen, mikroorganizmalar ve benzeri gibi malzeme görünümünü değiştirebilen parametrelerden etkilenir (Rowell, 2012). Bununla birlikte, ayrışma oranı, ahşap türlerinin dayanıklılığına (Reinprecht, 2016), üst yüzey işlemi türüne, teknik tasarıma, iklim koşullarına, maruz kalma süresine ve yönüne ve ayrıca malzeme yüzeyinin eğimine bağlıdır (Sandak vd., 2018; Evans, 1996).

Kaplama endüstrisindeki en önemli çevre sorunlarından biri, tamamı organik çözücülerden elde edildikleri için uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) kullanılmasıdır. Kaplama endüstrisinde VOC kullanımını azaltmak için ultraviyole ışık (UV) kürlenme teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. UV ile kürlenebilen kaplamalar, ahşap endüstrisinde kullanılan en popüler kaplamalardan biridir. Geleneksel kaplamalarla karşılaştırıldığında, UV ile kürlenmiş kaplamaların avantajları kısa kürlenme süreleri, düşük VOC içerikleri ve düşük alan gereksinimleridir (Holman, 1984; Roche, 1998; Koleske, 2002; Choi & Kim, 2006; Ali vd., 1996).

UV ile kürlenme veya foto-polimerizasyon tekniği, kaplama, yapıştırıcı ve mürekkep endüstrilerinin gelişiminde büyük bir ilerlemeyi temsil etmektedir (Kayaman-Apohan vd., 2003). UV kürlenme, anında kuruma, geniş formülasyon aralığı, azaltılmış enerji tüketimi, ısıya duyarlı substratın kaplanması, yüksek kürlenme hızı ve kürlenme

ekipmanı için düşük alan ve sermaye gereksinimi gibi birçok avantaj sağlar (Wang vd., 2008; Moon vd., 2005). UV ile kürlenebilen kaplama, uçucu organik bileşikleri olmayan veya düşük düzeyde olan bir kaplama sınıfını temsil eder (Patel vd., 2009; Srivastava vd., 2008) ve birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. UV ile kürlenebilen bir kaplamanın ana bileşenleri bir oligomer, bir fotobaşlatıcı ve bir monomerdur (Kunwong vd., 2011). UV kürlenme ayrıca düşük enerji tüketimine ve düşük çalışma sıcaklığına izin verir, bu da UV ile kürlenmiş yüksek katı maddeli kaplamaları ahşap döşeme endüstrisi için iyi bir seçim haline getirir (Mosjewski, 1999; Ross & Sigel, 2006).

Literatürde; rose gum (*Eucalyptus grandis*) ve Karayip çamı (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) (de Moura vd., 2013), limon (*Citrus limon* (L.) Burm.) (Ayata, 2019), meşe (*Quercus petraea* L.) (Gürleyen vd., 2019), mandshurian dişbudağı (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) (Li vd., 2021), sapsız meşe (*Quercus petraea*) (Ayata vd., 2016), iroko (*Chlorophora excelsa*), kestane (*Castanea sativa* Mill.), limba (*Terminalia superba*), sapelli (*Entandrophragma cylindrosum*) (Ayata & Çavuş, 2018), gülibrişim (*Albizia julibrissin*) (Gürleyen, 2020), kayısı (*Prunus armeniaca* L.) (Ayata vd., 2021a), kayın (*Fagus orientalis* L.) ve saplı meşe (*Quercus robur* L.) (Kaygin & Akgun, 2009), üvez (*Sorbus* L.) (Gürleyen vd., 2017b), kızılbaş (*Alnus glutinosa* Gaertn L.) (Salca vd., 2016), dişbudak (*Fraxinus excelsior*) (212°C'de 2 saat süreli ısıtma işlemi) (Ayata vd., 2017b), meşe (*Quercus* L.) (Stachowiak-Wencek, 2019), meşe, dişli meşe, akasya, ceviz, karaağaç, fijiyan longan (*Pometia pinnata*) ve *Newtonia* spp. (Zhao vd., 2021), Amerikan ceviz (*Juglans nigra*), ceviz (*Juglans regia*), kırmızı Amerikan meşesi (*Quercus rubra*), akçaağaç (*Acer pseudoplatanus* L.) (Ayata vd., 2018), monter çamı (*Pinus radiata*) (Viengkhou vd., 1996), şeker akçaağacı (*Acer saccharum*) (Vardanyan vd., 2014), sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) (Gürleyen vd., 2017a), doussie (*Azela africana*) (Gürleyen, 2021), adi dişbudak (*Fraxinus excelsior* L.) (Herrera vd., 2018), kayın (*Fagus orientalis* Lipsky.) (Ayata vd., 2017a), iğde (*Elaeagnus angustifolia* L.) (Ayata vd., 2022), adi çitlenbik (*Celtis australis* L.) (Ayata vd., 2021b), dut (*Morus alba*) (Çavuş, 2021), ak meşe (*Quercus alba* L.) (Wang vd., 2019) ağaç türlerine farklı kimyasallar (boyalı, boyasız) ile UV kürlenmeli verniklerin uygulandığı görülmekte olup, elde edilen malzemeler üzerinde emisyon, parlaklık, renk, kurşun kalem testi, salınımsal sertlik, yüzeye yapışma direnci, çapraz kesim testi vb. testlerin yapıldığı görülmektedir. Buna ek olarak bazı

malzemeler ise çeşitli yaşlandırma uygulamalarına (yapay, termal, doğal) tabi tutulup sonuçlar tartışılmıştır.

Salicaceae familyasının bir üyesi olan karakavak (*Populus nigra* L.), Britanya Adaları'ndan Akdeniz kıyılarına kadar Avrupa'da yetişir. Bu ağacın hızlı büyümesi ve yayılması, dünya çapında yaygın olarak yetiştirilmesini sağlar. Odun yaygın olarak yakıt olarak kullanılır. Ancak aynı zamanda mobilya, lambri ve kontrplak üretimi için de kullanılır. Karakavak, yüksek selüloz ve nispeten düşük lignin içeriği nedeniyle kâğıt hamuru ve kâğıt üretimi için uygundur (Balatinecz vd., 2001).

Karakavak (*Populus nigra* L.) odununda, %1'lik NaOH çözünürlüğü %15.12, alfa selüloz %41.17, holoselüloz %28.46 (Narlıoğlu, 2012), *Trametes versicolor* mantarına karşı ağırlık kaybı %28.59 (Hashemi vd., 2010), hava kurusu yoğunluk 396 kg/m³, eğilme direnci 75.10 N/mm², elastikiyet modülü 5438.00 N/mm², basınç direnci 42.00 N/mm², şok direnci 0.438 kgm/cm² (Bal & Ayata, 2020), ısı iletkenlik değeri 0.109 k(W/mK) (Çavuş vd., 2019), ses iletim kaybı 24.92 dB (Çavuş & Kara, 2020) olarak bulunmuştur.

Yapılan literatür araştırmasına bakıldığında, bu ağaç türüne ait ahşap malzeme yüzeylerine UV sistem kürlenmeli parke vernik kimyasalları kullanılarak bir malzemenin üretilmediği ve bu çalışmada üretilen UV vernik kaplanmış malzemeler üzerinde üst yüzey işlemlerine ait testlerinin de yapılmadığı görülmektedir.

Bu çalışma, karakavak (*Populus nigra* L.) odununa 3 ve 5 kat UV sistem vernik uygulandıktan sonra

elde edilen katmanların, hızlandırılmış yaşlandırma uygulaması ile arasındaki etkileşimi bildirmekte olup, yaşlandırma öncesi ve sonlarında (252 ve 504 saat) vernikli malzemelerde parlaklık, renk, yüzeye yapışma direnci ve salınımsal sertlik testlerine ait sonuçları içermektedir. Elde edilen sonuçların gerek karakavak odununun kullanım alanları hakkında ve gerekse parke endüstrisi adına önemli bilgiler sunacağı hedeflenmiştir.

2. Materyal ve metot

2.1. Materyal ve metot

2.1.1. Malzemeler

2.1.1.1. Materials

Karakavak (*Populus nigra* L.) İzmir'de bir kereste satıcısından temin edilmiştir. Ahşap malzemeler lif kıvrıklığı sorunu olmayan, böcek ve mantar kusuru olmayan, ardaksız ve budaksız olacak şekilde rastgele yöntem ile seçilmiştir. Test gruplarına göre yeterli sayıda olacak şekilde alınan 100 x 10 x 2 cm ebatlarında deney örnekleri kesme ve rendeleme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra, alınan örnekler üzerinde iklimlendirme işlemleri TS ISO 13061-1 (TS ISO 13061-1, 2021) standardına göre yapılmıştır.

2.2. UV sistem parke verniğinin uygulanması

2.2.1. Application of UV system parquet varnish

UV sistem parke verniği üretim aşamaları (3 ve 5 kat) Tablo 1'de verilmiştir. Uygulama endüstriyel uygulamalara göre, KPS Parke Fabrikası (Düzce, Türkiye)'da gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. UV sistem parke verniği üretim aşamaları (3 ve 5 kat)

Table 1. Production stages of UV system parquet varnish (3 and 5 layers)

	1	Kalibre zımpara uygulaması (80 ve 120 kum)	1	Kalibre zımpara uygulaması (80 ve 120 kum)	
3 kat uygulaması	2	Şeffaf UV kürlenmeli hidro astar (T8028-0000) 10 g/m ² (70 °C)	2	Şeffaf UV kürlenmeli hidro astar (T8028-0000) 10 g/m ² (70 °C)	5 kat uygulaması
	3	UV yüksek parlaklıkta perde kaplama (T9120-0900N1) 8 g/m ²	3	UV şeffaf kürlenmeli sızdırmazlık macunu (T9110-0000H) 20 g/m ² (70 °C)	
	4	UV lamba kurutma uygulaması (177 mJ/cm ²) (2 defa)	4	UV şeffaf kürlenmeli sızdırmazlık macunu (T9110-0000) 10 g/m ² (170 °C) (2 defa)	
	5	Kalibre zımparalama işlemi (280 ve 320 kum)	5	Kalibre zımparalama işlemi (280 ve 320 kum)	
	6	Şeffaf mat UV yağı (T9115-0000) (8 g/m ²)	6	Şeffaf mat UV yağı (T9115-0000) (8 g/m ²)	
	7	UV lamba kurutma uygulaması (71 mJ/cm ²)	7	UV lamba kurutma uygulaması (71 mJ/cm ²)	
	8	Şeffaf mat UV yağı (T9115-0000) (8 g/m ²)	8	Şeffaf mat UV yağı (T9115-0000) (8 g/m ²)	
	9	UV lamba kurutma uygulaması (314 mJ/cm ²) (2 defa)	9	UV lamba kurutma uygulaması (314 mJ/cm ²) (2 defa)	

2.3. Yapay yaşlandırma uygulaması

2.3.1. Artificial aging application

Kaplamaya ait hizmet ömrü, genellikle doğal koşulları (sıcaklık, UV radyasyonu, nem, yoğunlaşma, kirlilik) hızlandırılmış şekilde simüle eden

laboratuvar testleri kullanılarak değerlendirilir (Scrinzi vd., 2011a). Yapay yaşlandırma, ISO 4892-3 (ISO 4892-3, 2016) standardına göre UVB-313 lambalarıyla donatılmış bir QUV/sprey ile hızlandırılmış yaşlandırma test cihazında (Q-Lab, Westlake, OH, US) gerçekleştirilmiştir. Cihaz 0.76

ışık yoğunluğu ve 60 °C' de 8 saat UV ışık; 4 saat 50 °C sıcaklıkta kondenzasyon buhar yoğunlaştırma olacak şekilde UV-B 313 lambaları ile 252 ve 504 saatlerine sahip koşullarda yapılmıştır.

2.4. Renk ölçümlerinin belirlenmesi

2.4. Determination of color measurements

Renk testleri, ASTM D 2244'e (ASTM D 2244, 2007) göre yapılmıştır. Renk stabilitesi için bir CS-10 colorimeter (CHN Spec, Çin) cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, CIE 10° standart gözlemci; CIE D65 ışık kaynağı, aydınlatma sistemi: 8/d (8°/dağınık aydınlatma) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Renk verileri, hızlandırılmış

yaşlandırmadan önce ve sonlarında her bir kaplanmış numune üzerinden alınmıştır. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu, CIE'den standart. Bu sistem üç parametre tanımlar: Sırasıyla siyah/beyaz (açıklık), kırmızı/yeşil ve sarı/mavi renk çiftlerini temsil eden L^* , a^* ve b^* 'dir. Farklı ağaç türlerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı renk değişikliklerini değerlendirmek için kullanılabilirler (Rosu vd., 2010; Almeida vd., 2018). Barański vd., (2017)'e göre renk değiştirme kriterleri Tablo 2'de verilmiştir. Yaşlandırma sonlarında bu tabloya göre kıyaslanarak toplam renk farkı değerleri üzerinde yorumlara yer verilmiştir. Aşağıda verilen formüller yardımıyla toplam renk farklılıklarına (ΔE^* , ΔL^* , Δa^* ve Δb^*) ait sonuçlar belirlenmiştir.

$$\Delta a^* = a^*_{\text{yaşlandırılmış}} - a^*_{\text{yaşlandırılmamış}} \quad (1)$$

$$\Delta L^* = L^*_{\text{yaşlandırılmış}} - L^*_{\text{yaşlandırılmamış}} \quad (2)$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{yaşlandırılmış}} - b^*_{\text{yaşlandırılmamış}} \quad (3)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (4)$$

Tablo 2. Renk değiştirme kriterleri (Barański vd., 2017)

Table 2. Color change criteria (Barański vd., 2017)

ΔE^* Değeri		Gözlem Sonucu
$\Delta E^* < 0.2$	→	Görünmez renk değişimi
$2 > \Delta E^* > 0.2$	→	Hafif renk değişimi
$3 > \Delta E^* > 2$	→	Yüksek filtrede görünür renk değişimi
$6 > \Delta E^* > 3$	→	Filtrenin ortalama kalitesiyle görülebilen bir renk değişimi
$12 > \Delta E^* > 6$	→	Yüksek renk değişimi
$\Delta E^* > 12$	→	Farklı renk

2.5. Parlaklık ölçümlerinin belirlenmesi

2.5. Determination of glossiness measurements

Herhangi bir yüzeyin parlaklığı, farklı yönlerden gelen ışığın yansımaları nedeniyle bitmiş bir ürünün kalitesini değerlendirmek için kullanılır (Ged vd., 2010; Vardi vd., 2010). Bu test bir gloss meter (ETB-0833 model, Vetus Electronic Technology Co., Ltd., CN) cihazında, ISO 2813 (ISO 2813, 1994) standardına göre 20°, 60° ve 85° açılarda lifler dik ve paralel ölçümler olacak şekilde bütün verniklenmiş deney örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

2.6. Salımsal sertlik özelliklerinin belirlenmesi

2.6. Determination of pendulum hardness properties

Sertlik değerleri, pandüllü sertlik ölçüm cihazında (Model 299/300 Erichsen, Hemer, Germany) ASTM D 4366-95 (ASTM D 4366-95, 1984) standardına göre, köning (6°'den 3°'ye) metoduna göre belirlenmiştir. Cihaz, örnek platformuna yerleştirilen numune yüzeyinde 63±3.3 HRC sertliğinde ve 5±0.0005 mm çapında iki bilye ile

salınım yapan pandül salınımlarına göre katman sertliklerini belirler.

2.7. Yüzeye yapışma direncinin belirlenmesi

2.7. Determination of adhesion resistance to the surface

Yapışma testi, ASTM D 4541 (ASTM D 4541, 1995) standardına göre PosiTest AT-A (automatic) pull-off Adhesion Tester (Defelsko® corp., S/N AT11802, USA) cihazında yapılmıştır. Yapıştırma işleminde plastik çelik hızlı yapıştırıcı (reçine ve katalizör) 404 Plastik Çelik marka (Çekmeköy/İstanbul, Türkiye) yapıştırıcı kullanılmıştır. Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış vernikli yüzeyler 20 mm olan çekme silindirleri normal oda sıcaklığında 20°C±2 yapıştırılmıştır ve 24 saat süre ile kurumaya bırakılmıştır. Yapışma direnci aşağıdaki 5 no'lu formül kullanılarak hesaplanmıştır;

$$X = [(4F)/(\pi \cdot d^2)] \quad (5)$$

Burada; X = Yapışma direncini (MPa), F = Kopma anındaki kuvvetini (Newton) ve D = Çekme silindirinin çapını (mm) ifade etmektedir.

2.8. İstatistiksel analiz

2.8. Statistical analysis

Çalışmada, bir SPSS programı ile standart sapmalar, homojenlik grupları, minimum ve maksimum değerler, yüzde (%) değişim oranları, ortalamaları ve varyans analizleri belirlenmiştir. Toplamda 30 adet örnek [yaşlandırma grubu 3 x vernik türü 2 x örnek sayısı 5 = 30] üzerinde ölçümler alınmıştır.

3. Tartışma

3. Discussion

Renk parametrelerine (L^* , a^* ve b^*) için varyans analizi sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. Belirlenmiş olan bu sonuçlara göre, ışıklılık (L^*) değeri, kırmızı renk (a^*) tonu değeri ve sarı renk (b^*) tonu değeri için vernik türü (A), yaşlandırma süresi (B) ve etkileşim (AB) anlamlı olarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Renk parametrelerine ait belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları

Table 3. The results of the variance analysis determined for the color parameters

Test	Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
L^*	Vernik Türü (A)	1	3.078	3.078	4.545	0.038*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	2074.376	1037.188	1531.450	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	38.712	19.356	28.580	0.000*
	Hata	54	36.572	0.677		
	Toplam	60	273316.876			
a^*	Vernik Türü (A)	1	1.663	1.663	10.255	0.002*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	1256.707	628.353	3874.167	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	1.038	0.519	3.200	0.049*
	Hata	54	8.758	0.162		
	Toplam	60	10666.932			
b^*	Vernik Türü (A)	1	170.387	170.387	253.530	0.000*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	4833.285	2416.642	3595.878	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	156.275	78.138	116.266	0.000*
	Hata	54	36.291	0.672		
	Toplam	60	78783.765			

*: Anlamlı

Renk parametrelerine (L^* , a^* ve b^*) ait belirlenmiş olan SPSS sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, UVB-313 lambalarına sahip yaşlandırma koşullarında her iki vernik türü için yaşlandırma süresinin artması ile ışıklılık (L^*) değerinde azalma belirlenirken, kırmızı renk (a^*) tonu ve sarı renk (b^*) tonu değerleri için artışlar elde edilmiştir. Söğütü & Sönmez, (2006) tarafından L^* değerindeki artışın görülmesi daha “açık renk”, azalışın görülmesi ise “koyulaşması” anlamını verdiği şeklinde ifade edilmiştir.

Verilen bu bilgi kullanılarak, bu çalışmada her iki vernik uygulamasına sahip katmanların yaşlandırmalardan sonra L^* değerlerinin azalması üzerine, “koyulaşmanın” elde edildiği söylenebilir. Sarı renk (b^*) tonu değerlerindeki artış 3 kat uygulamada daha yüksek elde edilmiştir.

Ayata vd., (2021a) tarafından kayısı odununa, Gürleyen, (2021) tarafından doussie odununa ve Çavuş, (2021) tarafından dut odununa uygulanmış UV sistem parke vernikli çalışmalarda da UVA-340 lambalarına sahip yaşlandırma uygulamaları sonrasında b^* ve L^* değerlerinin azaldığı ve a^* değerinin arttığı bildirilmiştir. Çalışma literatür ile uyumlu bir durum sergilemiştir.

Dış mekâna maruz kalma sırasında, polimerler, güneş spektrumunda bulunan kısa dalga boylu UV ışınlarının etkisiyle kimyasal olarak bozulur. Dış mekân uygulamalarında polimerlerin hizmet ömrü, hava koşullarına bağlı olarak sınırlanır (Davis, 1977). Ayrışma, polimerlerde hızlı bir fiziksel özellik kaybına yol açar. Bu kayıp, polimer zincirinde rastgele bağların kesilmesinden kaynaklanır ve zincir boyunca göç eden serbest radikallerin oluşumuyla sonuçlanır. UV radyasyonuna maruz kalan kaplamalarda ve polimerlerde fotooksidatif bozunma, sararma ve renk değişikliği yaygın fenomenlerdir (Singh vd., 2001).

Toplam renk farklılıklarına (ΔE^* , ΔL^* , Δa^* ve Δb^*) ait sonuçları Tablo 5’de gösterilmektedir. Tablo 5’e göre, 3 kat uygulamasının ΔE^* değerleri 5 kat uygulamasınınkinden yüksek elde edilmiştir. Şeffaf kaplanmış yüzeylerde maruziyetin ilk saatlerinde koyu bir renk oluştuğu bildirilmiştir (Scrinzi vd., 2011b). Barański vd., (2017) tarafından bildirilen renk kategorisine göre her iki verniğe ΔE^* ait sonuçların “Farklı renk” kriterine denk geldiği belirlenmiştir. Yaşlandırma süresinin artması ile ΔE^* değerleri her iki vernik türünde de artmıştır.

Tablo 4. Renk parametrelerine ait belirlenmiş olan SPSS sonuçları**Table 4.** SPSS results determined for color parameters

Test	Vernik Türü	Yaşlandırma Süresi	N	Ortalama	SS	Değişim (%)	Homojenlik Grubu	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
L*	3 kat ▶	Kontrol →	10	75.99	1.06	-	A*	74.49	77.86	1.39
		252 saat →	10	63.63	0.25	↓16.27	D	63.28	63.98	0.39
		504 saat →	10	61.39	0.47	↓19.21	E**	60.53	61.99	0.77
	5 kat ▶	Kontrol →	10	74.62	1.26	-	B	72.23	76.78	1.69
		252 saat →	10	66.17	1.01	↓11.32	C	64.57	67.35	1.53
		504 saat →	10	61.57	0.22	↓17.49	E	61.25	61.85	0.36
a*	3 kat ▶	Kontrol →	10	6.17	0.35	-	D	5.56	6.65	5.67
		252 saat →	10	15.36	0.26	↑148.95	B	14.83	15.69	1.69
		504 saat →	10	16.52	0.22	↑167.75	A*	16.07	16.84	1.33
	5 kat ▶	Kontrol →	10	6.03	0.74	-	D**	4.75	6.77	12.27
		252 saat →	10	14.65	0.30	↑142.95	C	14.17	14.94	2.05
		504 saat →	10	16.37	0.31	↑171.48	A	15.92	16.69	1.89
b*	3 kat ▶	Kontrol →	10	18.79	0.40	-	D**	18.00	19.43	2.13
		252 saat →	10	40.35	0.66	↑114.74	B	38.87	41.26	1.64
		504 saat →	10	40.87	0.92	↑117.51	B	39.67	42.32	2.25
	5 kat ▶	Kontrol →	10	25.95	0.42	-	C	25.16	26.61	1.62
		252 saat →	10	44.03	1.00	↑69.67	A*	42.21	45.08	2.27
		504 saat →	10	40.14	1.19	↑54.68	B	38.82	41.81	2.96

N: Ölçüm Sayısı, SS: Standart Sapma, *: En yüksek değeri ifade etmektedir, **: En düşük değeri ifade etmektedir.

Tablo 5. Toplam renk farklılıklarına ait sonuçları**Table 5.** Results of the total color differences

Vernik Türü	Yaşlandırma Süresi	Renk kriterine göre kıyaslama (Barański vd., 2017)	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	
3 kat ▶	252 saat	Farklı renk ▶	$\Delta E^* > 12$	26.50	-12.36	9.19	21.57
	504 saat	Farklı renk ▶	$\Delta E^* > 12$	28.42	-14.60	10.35	22.08
5 kat ▶	252 saat	Farklı renk ▶	$\Delta E^* > 12$	21.75	-8.45	8.63	18.09
	504 saat	Farklı renk ▶	$\Delta E^* > 12$	21.88	-13.05	10.34	14.19

20°, 60° ve 85°'de açılarda ölçülmüş olan liflere dik ve paralel parlaklık ölçümlerine ait varyans analizi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre, bütün dereceler ve bütün parlaklık yönleri için vernik türü (A), yaşlandırma süresi (B) ve etkileşim (AB) anlamlı olarak bulunmuştur.

20°, 60° ve 85°'de açılarda ölçülmüş olan liflere dik ve paralel parlaklık ölçümlerine ait SPSS sonuçları Tablo 7'de gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre, bütün yönlerde ve derecelerde yapılan ölçümler her iki vernik uygulaması için yaşlandırma süresinin artması ile azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca yüzeye paralel ölçümler yüzeye dik ölçümlerden yüksek elde edilmiş, buna ek olarak, 5 kat uygulamasının ölçümleri 3 kat uygulamasınıninkinden yüksek elde edilmiştir.

Çavuş, (2021), Gürleyen, (2020), (2021) de ve Ayata vd., (2021a)'de verilen çalışmalarda da bu duruma benzer sonuçların elde edildiği bildirilmiştir. Parlaklık kaybı, organik madde kaybindan kaynaklanır. Bozunma süreçlerinden (kesme reaksiyonları) kaynaklanan kısa organik kısımlar, su püskürtme aşamaları sırasında matristen kolaylıkla elimine edilir (Perrin vd., 2004).

Yüzeye yapışma direnci için varyans analizi sonuçları Tablo 8'de verilmiştir. Belirlenmiş olan bu sonuçlara göre, yapışma direnci için vernik türü (A), yaşlandırma süresi (B) ve etkileşim (AB) anlamlı olarak bulunmuştur.

Tablo 6. Parlaklık değerlerine ait belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları
Table 6. The results of the variance analysis determined for the glossiness values

Test	Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
//20°	Vernik Türü (A)	1	0.817	0.817	68.692	0.000*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	4.885	2.443	205.458	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	0.549	0.275	23.103	0.000*
	Hata	54	0.642	0.012		
	Toplam	60	39.160			
//60°	Vernik Türü (A)	1	3.750	3.750	134.462	0.000*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	165.280	82.640	2963.193	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	0.837	0.419	15.006	0.000*
	Hata	54	1.506	0.028		
	Toplam	60	1022.640			
//85°	Vernik Türü (A)	1	8.893	8.893	43.161	0.000*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	512.496	256.248	1243.587	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	1.612	0.806	3.912	0.026*
	Hata	54	11.127	0.206		
	Toplam	60	2091.670			
120°	Vernik Türü (A)	1	0.171	0.171	19.041	0.000*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	3.536	1.768	197.275	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	0.176	0.088	9.837	0.000*
	Hata	54	0.484	0.009		
	Toplam	60	31.840			
160°	Vernik Türü (A)	1	0.160	0.160	20.942	0.000*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	142.962	71.481	9346.206	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	0.050	0.025	3.291	0.045*
	Hata	54	0.413	0.008		
	Toplam	60	723.290			
185°	Vernik Türü (A)	1	1.350	1.350	21.619	0.000*
	Yaşlandırma Süresi (B)	2	78.977	39.489	632.381	0.000*
	Etkileşim (AB)	2	1.308	0.654	10.473	0.000*
	Hata	54	3.372	0.062		
	Toplam	60	335.520			

*: Anlamlı

Yüze yapışma direncine ait SPSS sonuçları Tablo 9'da gösterilmektedir. Yapışma direnci sonuçlarına göre yüze yapışma direncinin her iki vernik türü için yaşlandırma süresinin artması ile azaldığı görülmektedir. Yaşlandırma süresinin artması ile 5 kat uygulamasına sahip UV sistem vernik katmanlarının % azalma oranının, 3 kat uygulamasınınkinden yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca her iki vernik türü için kontrol örneklerine ait sonuçlar birbirine çok yakın olarak elde edilmiştir.

Clerc vd., (2017) tarafından hava koşullarına bağlı olarak yapışma mukavemeti kaybının, çoğu zaman yapıştırıcının kimyasal bozulmasından ziyade ahşabın bozulmasından dolayı kaynaklandığı şeklinde bildirilmiştir. UV vernik uygulanmış rose gum ve Karayip çamı (de Moura vd., 2013), limon (Ayata, 2019), doussie (Gürleyen, 2021) ve gülbrişim (Gürleyen, 2020) odunlarında da yapılan yaşlandırma uygulamasından sonra yüze yapışma direncinin azaldığı bildirilmiştir.

Salınımsal sertlik değerleri için varyans analizi sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir. Salınımsal sertlik değerleri için varyans analizi sonuçları Tablo 10'da gösterilmektedir. Belirlenmiş olan sonuçlara göre, vernik türü (A), yaşlandırma süresi (B) anlamlı olarak elde edilirken, etkileşim (AB) anlamsız olarak belirlenmiştir (Tablo 10).

Tablo 11, salınımsal sertlik değerleri için SPSS sonuçlarını sunmaktadır. Salınımsal sertlik sonuçlarına bakıldığında 3 kat uygulamasına sahip yüzeylerin, 5 kat uygulamasınınkinden yüksek olduğu görülmektedir. Her iki vernik türünde de 252. saatin sonunda azalmalar görülürken, 504. saatin sonunda artış görülmüştür.

Literatürde salınım sayısının fazla olduğu yüzeylerin sert olduğu, az olduğu yüzeylerin ise daha düşük sertlikte olduğu bildirilmiştir (Sönmez, 1989). Bu duruma göre, 3 kat uygulamalı yüzeylerin, 5 kat uygulamalı yüzeylerden sert olduğu söylenebilir.

Tablo 7. Parlaklık değerlerine ait belirlenmiş olan SPSS sonuçları
Table 7. SPSS results of glossiness values determined

Test	Vernik Türü	Yaşlandırma Süresi	N	Ortalama	SS	Homojenlik Grubu	Değişim (%)	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
//20°	3 kat ►	Kontrol →	10	0.87	0.15	B	-	0.60	1.00	17.24
		252 saat →	10	0.61	0.03	C	↓29.89	0.60	0.70	4.92
		504 saat →	10	0.37	0.08	E**	↓57.47	0.30	0.50	21.62
	5 kat ►	Kontrol →	10	1.37	0.13	A*	-	1.30	1.70	9.49
		252 saat →	10	0.67	0.13	C	↓51.09	0.60	1.00	19.40
		504 saat →	10	0.51	0.07	D	↓62.77	0.40	0.60	13.73
//60°	3 kat ►	Kontrol →	10	5.62	0.15	B	-	5.30	5.80	2.67
		252 saat →	10	3.01	0.28	D	↓46.44	2.20	3.10	9.30
		504 saat →	10	1.92	0.06	F**	↓65.84	1.80	2.00	3.13
	5 kat ►	Kontrol →	10	6.45	0.10	A*	-	6.40	6.70	1.55
		252 saat →	10	3.30	0.05	C	↓48.84	3.20	3.40	1.52
		504 saat →	10	2.30	0.22	E	↓64.34	2.10	2.80	9.57
//85°	3 kat ►	Kontrol →	10	9.41	0.35	A*	-	9.00	9.80	3.72
		252 saat →	10	5.16	0.96	C	↓45.16	2.50	5.90	18.60
		504 saat →	10	1.87	0.14	E	↓80.13	1.70	2.10	7.49
	5 kat ►	Kontrol →	10	8.22	0.26	B	-	8.00	8.60	3.16
		252 saat →	10	4.43	0.28	D	↓46.11	4.00	4.90	6.32
		504 saat →	10	1.48	0.17	E**	↓82.00	1.10	1.60	11.49
↓20°	3 kat ►	Kontrol →	10	0.87	0.05	B	-	0.80	0.90	5.75
		252 saat →	10	0.60	0.00	C	↓31.03	0.60	0.60	0.00
		504 saat →	10	0.40	0.08	D**	↓54.02	0.30	0.50	20.00
	5 kat ►	Kontrol →	10	1.13	0.13	A*	-	0.80	1.20	11.50
		252 saat →	10	0.63	0.11	C	↓44.25	0.50	0.90	17.46
		504 saat →	10	0.43	0.13	D	↓61.95	0.30	0.60	30.23
↓60°	3 kat ►	Kontrol →	10	5.26	0.12	A*	-	5.10	5.40	2.28
		252 saat →	10	2.54	0.13	B	↓51.71	2.40	2.70	5.12
		504 saat →	10	1.68	0.04	D	↓68.06	1.60	1.70	2.38
	5 kat ►	Kontrol →	10	5.22	0.08	A	-	5.10	5.30	1.53
		252 saat →	10	2.36	0.07	C	↓54.79	2.30	2.50	2.97
		504 saat →	10	1.59	0.06	E**	↓69.54	1.50	1.70	3.77
↓85°	3 kat ►	Kontrol →	10	3.44	0.27	A	-	3.30	4.10	7.85
		252 saat →	10	2.36	0.20	B	↓31.40	2.00	2.80	8.47
		504 saat →	10	0.78	0.16	D	↓77.33	0.70	1.20	20.51
	5 kat ►	Kontrol →	10	3.48	0.23	A*	-	3.30	4.00	6.61
		252 saat →	10	1.68	0.40	C	↓51.72	1.20	2.60	23.81
		504 saat →	10	0.52	0.15	E**	↓85.06	0.30	0.70	28.85

N: Ölçüm Sayısı, SS: Standart Sapma, *: En yüksek değeri ifade etmektedir, **: En düşük değeri ifade etmektedir.

Tablo 8. Yüze yapışma direncine ait varyans analizi sonuçları
Table 8. Analysis of variance results of adhesion strength to the surface

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha < 0.05$
Vernik Türü (A)	1	3.123	3.123	89.007	0.000*
Yaşlandırma Süresi (B)	2	3.808	1.904	54.259	0.000*
Etkileşim (AB)	2	1.833	0.916	26.116	0.000*
Hata	24	0.842	0.035		
Toplam	30	65.476			

*: Anlamlı

Tablo 9. Yüze yapışma direncine ait SPSS sonuçları
Table 9. SPSS results of adhesion strength to the surface

Vernik Türü	Yaşlandırma Süresi	N	Ortalama (MPa)	Homojenlik Grubu	Değişim (%)	SS	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
3 kat ►	Kontrol →	5	1.82	A	-	0.33	1.55	2.37	18.13
	252 saat →	5	1.69	AB	↓7.14	0.11	1.53	1.79	6.51
	504 saat →	5	1.55	B	↓14.84	0.12	1.44	1.72	7.74
5 kat ►	Kontrol →	5	1.85	A*	-	0.18	1.64	2.04	9.73
	252 saat →	5	0.88	C	↓52.43	0.17	0.74	1.09	19.32
	504 saat →	5	0.40	D**	↓78.38	0.13	0.25	0.59	32.50

N: Ölçüm Sayısı, SS: Standart Sapma, *: En yüksek değeri ifade etmektedir, **: En düşük değeri ifade etmektedir.

Tablo 10. Salınımsal sertlik değerleri için varyans analizi sonuçları
Table 10. Analysis of variance results for pendulum hardness values

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
Vernik Türü (A)	1	1178.778	1178.778	86.252	0.000*
Yaşlandırma Süresi (B)	2	310.389	155.194	11.356	0.000*
Etkileşim (AB)	2	47.722	23.861	1.746	0.192**
Hata	30	410.000	13.667		
Toplam	36	44658.000			

*: Anlamlı, **: Anlamsız

Tablo 11. Salınımsal sertlik değerleri için SPSS sonuçları
Table 11. SPSS results for pendulum hardness values

Vernik Türü	Yaşlandırma Süresi	N	Ortalama	Homojenlik Grubu	Değişim (%)	SS	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
3 kat ▶	Kontrol →	6	41.50	A	-	4.51	34.00	47.00	10.87
	252 saat →	6	37.33	AB	↓10.05	5.01	31.00	43.00	13.42
	504 saat →	6	41.67	A*	↑0.41	4.32	38.00	50.00	10.37
5 kat ▶	Kontrol →	6	33.17	BC	-	2.79	30.00	37.00	8.41
	252 saat →	6	23.50	D**	↓29.15	2.43	20.00	27.00	10.34
	504 saat →	6	29.50	C	↓11.06	2.07	27.00	33.00	7.02

N: Ölçüm Sayısı, SS: Standart Sapma, *: En yüksek değeri ifade etmektedir, **: En düşük değeri ifade etmektedir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışma sonucunda aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Her iki vernik türü için UVB-313 lambalarına sahip yaşlandırma koşulları sonlarında yaşlandırma süresinin artması ile yüzeye yapışma direncinde ve L^* değerinde azalma belirlenirken, a^* ve b^* değerleri için artışlar belirlenmiştir.
- 3 kat uygulamasının toplam renk farkı (ΔE^*) değerleri için 5 kat uygulamasınınkinden yüksek olduğu görülmüştür.
- Yaşlandırma süresinin artması ile her iki vernik uygulaması için bütün derecelerde ve yönlerde yapılan parlaklık ölçümlerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Salınımsal sertlikte 3 kat uygulamasına sahip yüzeylerin, 5 kat uygulamasınınkinden yüksek olduğu görülmüş, her iki vernik türünde de 252. saatin sonunda azalmalar görülürken, 504. saatin sonunda artış belirlenmiştir.
- Sonuç olarak, karakavak odunundan UV sistem parke üretimi istenilen sertlik direncine ait ortam koşullarına göre (mekân zemin tercihi) kullanım alanları doğrultusunda bu malzemenin kullanılması önerilebilir.

Teşekkür

Acknowledgement

Yazarlar, UV sistem parke verniği uygulamaları için KPS Fabrikası'na (Düzce) teşekkür etmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Çalışmanın dizaynı, yazım, deneylerin yürütülmesi dâhil her aşamada yazarlar tarafından ortak ve eşit katkı sağlanmıştır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Ali, M. A., Khan, M. A., & Ali, K. M. I. (1996). Comparative study of electron-beam- and ultraviolet-cured films of urethane acrylate. *Journal of Applied Polymer Science*, 60(6), 879-885. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960509\)60:6<879::AID-APP11>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960509)60:6<879::AID-APP11>3.0.CO;2-S).
- Almeida, D. H., Almeida, T. H., & Christoforo, A. L. (2018). Mechanical properties of wood estimated by colorimetric technique. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken.

ASTM D 2244-3 (2007). Standard practice for calculation or color tolerances and color differences from instrumentally measured color

- coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4366-95 (1984). Standard test methods for hardness of organic coatings by pendulum test, ASTM, Philadelphia, PA.
- ASTM D 4541 (1995). Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Ayata, U., Gurleyen, L., & Cakicier, N. (2016). The determination of the surface adhesion resistance and pendulum hardness values on laminated parquets of a UV system varnish applied oak wood derived by using different water-based paints. International Forestry Symposium, 07-10 December, Kastamonu, Turkey, 827-831.
- Ayata, Ü. (2019). Effects of artificial weathering on the surface properties of ultraviolet varnish applied to lemonwood (*Citrus limon* (L.) Burm.). *Bioresources*, 14(4), 8313-8323. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.8313-8323>.
- Ayata, Ü., Efe, F. T., Türk, M., Çakıcıer, N., & Gürleyen, L. (2022). UV Sistem vernik uygulanmış iğde odununda renk ve salınımsal sertlik özellikleri üzerine farklı lambalara (UV-A ve -B) sahip hızlandırılmış yaşlandırma etkilerinin karşılaştırılması. *Eurasian Journal of Forest Science*, 10(1), 11-19. <https://doi.org/10.31195/ejefs.1039629>.
- Ayata, Ü., & Cavus, V. (2018). The determination of the surface adhesion resistance and pendulum hardness on the parquets applied UV varnish as single and double layers. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 541-545. <https://doi.org/10.21923/jesd.388346>.
- Ayata, Ü., Çakıcıer, N., & Gürleyen, L. (2021a). İç mekânda kullanılan UV sistem parke verniği uygulamasına sahip kayısı odununda yapay yaşlandırma performansının belirlenmesi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 40-50. <https://doi.org/10.33725/mamad.922311>.
- Ayata, Ü., Esteves, B., Gürleyen, L., Çakıcıer, N., Ferreira, J., Domingos, I., & Türk, M. (2021b). Effect of accelerated ageing on some surface properties of UV-coated hackberry (*Celtis australis* L.) wood parquet. *Drewno*, 64(208), 17-33. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.383.09>.
- Ayata, Ü., Gurleyen, L., Esteves, B., Gurleyen, T., & Cakicier, N. (2017a). Effect of heat treatment (ThermoWood) on some surface properties of parquet beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) with different layers of UV system applied. *Bioresources*, 12(2), 3876-3889. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3876-3889>.
- Ayata, Ü., Gürleyen, T., Gürleyen, L., Esteves, B., & Çakıcıer, N. (2017b). 212oC'de 2 saat süreyle ısıtılmış işlem görmüş (ThermoWood) ve tek/çift kat UV sistem parke vernik uygulanmış dişbudak (*Fraxinus excelsior*) odununda bazı yüzey özelliklerinin belirlenmesi. 5. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi, 29 Eylül - 01 Ekim, Bakü, Azerbaycan, 1318-1326.
- Ayata, Ü., Şahin, S., Gürleyen, L., & Esteves, B. (2018). UV sistem vernik uygulanmış lamine parkelerde yüzeye yapışma direnci üzerine termal yaşlandırmanın etkisi. *Multidisipliner Çalışmalar-3 (Sağlık ve Fen Bilimleri)*, Gece Kitaplığı Yayınevi, Birinci Basım, Ocak 2018, Editörler: Rıdvan KARAPINAR, Murat A. KUŞ, Ankara, Türkiye, 301-311. ISBN: 978-605-288-223-8.
- Bal, B. C., & Ayata, Ü. (2020). Karaçam ve karakavak odunlarının bazı mekanik özellikleri üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 21(4), 461-467. <https://doi.org/10.18182/tjf.795698>.
- Balatinecz, J. J., Kretschmann, D. E., & Leclercq, A. (2001). Achievements in the utilization of poplar wood-guideposts for the future. *Forestry Chronicle*, 77(2), 265-269. <https://doi.org/10.5558/tfc77265-2>.
- Banov, A. (1973). *Paints and Coatings Handbook*, Structures Publishing Company, Farmington.
- Barański, J., Klement, I., Vilkovská, T., & Konopka, A. (2017). High temperature drying process of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) with different zones of sapwood and red false heartwood. *Bioresources*, 12(1), 1861-1870. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.1861-1870>.
- Brischke, C., Bayerbach, R., & Otto Rapp, A. (2006). Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering*, 1(3-4), 91-107. <https://doi.org/10.1080/17480270601019658>.
- Cavus, V., Sahin, S., Esteves, B., & Ayata, U. (2019). Determination of thermal conductivity properties in some wood species obtained from Turkey. *Bioresources*, 14(3), 6709-6715. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.6709-6715>.
- Chang, S. T., & Chou, P. L. (2000). Photodiscoloration inhibition of wood coated with UV-curable acrylic clear coatings and its elucidation. *Polymer Degradation and Stability*, 69(3), 355-

360. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00082-3).
- Choi, J. H., & Kim, H. J. (2006). Three hardness test methods and their relationship on UV-curable epoxy acrylate coatings for wooden flooring systems. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 12(3), 412-417.
- Clerc, G., Brülisauer, M., Affolter, S., Volkmer, T., Pichelin, F., & Niemz, P. (2017). Characterization of the ageing process of one-component polyurethane moisture curing wood adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 72, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.09.008>.
- Çavuş, V. (2021). Weathering performance of mulberry wood with UV varnish applied and its mechanical properties. *BioResources*, 16(4), 6791-6798. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.6791-6798>.
- Çavuş, V., & Kara, M. (2020). Experimental determination of sound transmission loss of some wood species. *Kastamonu Univ., Journal of Forestry Faculty*, 20(2), 190-199. <https://doi.org/10.17475/kastorman.801786>.
- de Moura, L. F., Brito, J. O., Nolasco, A. M., Uliana, L. R., & Muniz, G. I. B. (2013). Evaluation of coating performance and color stability on thermally rectified *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woods. *Wood Research*, 58(2), 231-242.
- Davis, A. (1977). In: Grassie N, editor. *The weathering of polymers in development in polymer degradation - 1*. London: Applied Science Publishers.
- Evans, P. D. (1996). The influence of season and angle of exposure on the weathering of wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 54, 200.
- Feist, W. C. (1982). *Weathering of wood in structural uses, Structural uses of wood in adverse environments*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp 156-178.
- Ged, G., Obein, G., Silvestri, Z., Rohellec, J., & Viénot, F. (2010). Recognizing real materials from their glossy appearance. *Journal of Vision*, 10(9), 1-17. <https://doi.org/10.1167/10.9.18>.
- Gurleyen, L. (2021). Effects of artificial weathering on the color, gloss, adhesion, and pendulum hardness of UV system parquet varnish applied to doussie (*Azalia africana*) wood. *BioResources*, 16(1), 1616-1627. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1616-1627>.
- Gurleyen, L., Ayata, U., Esteves, B., & Cakicier, N. (2017a). Effects of heat treatment on the adhesion strength, pendulum hardness, surface roughness, color and glossiness of scots pine laminated parquet with two different types of UV varnish application. *Maderas-Ciencia y Tecnologia*, 19(2), 213-224. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000019>.
- Gurleyen, L., Ayata, U., Esteves, B., Gurleyen, T., & Cakicier, N. (2019). Effects of thermal modification of oak wood upon selected properties of coating systems. *Bioresources*, 14(1), 1838-1849. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1838-1849>.
- Gürleyen, L. (2020). UV sistem parke verniği uygulanmış gülibrişim (*Albizia julibrissin*) odununda bazı yüzey özellikleri üzerine yapay yaşlandırmanın etkisi. *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 21(4), 451-460. <https://doi.org/10.18182/tjf.795597>.
- Gürleyen, T., Ayata, Ü., Gürleyen, L., Esteves, B., & Çakıcıer, N. (2017b). Üvez (*Sorbus L.*) odununa uygulanan tek ve çift kat UV Sistem parke vernik katmanlarında renk, parlaklık ve salınımsal sertlik değerlerinin belirlenmesi. 5. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi, 29 Eylül - 01 Ekim, Bakü, Azerbaycan, 1327-1336.
- Hashemi, S. K. H., Latibari, A. J., Khademi-Eslam, H., & Alamuti, R. F. (2010). Effect of boric acid treatment on decay resistance and mechanical properties of poplar wood. *BioResources*, 5(2), 690-698.
- Herrera, R., Sandak, J., Robles, E., Krystofiak, T., & Labidi, J. (2018). Weathering resistance of thermally modified wood finished with coatings of diverse formulations. *Progress in Organic Coatings*, 119, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.02.015>.
- Holman, R. (1984). *U.V. and E.B. Curing Formulation for Printing Inks, Coatings and Paints*. p. 7-18, Selective Industrial Training Associates Limited, London, U.K.
- ISO 2813 (1994). *Paints and varnishes - determination of specular gloss of non-metallic paint films at 20 degrees, 60 degrees and 85 degrees*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 4892-3 (2016). *Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 3: Fluorescent UV lamps*, The International Organization for Standardization.
- Kaboorani, A., Auclair, N., Riedl, B., & Landry, V. (2017). Mechanical properties of UV-cured cellulose nanocrystal (CNC) nanocomposite

- coating for wood furniture. *Progress in Organic Coatings*, 104, 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.11.031>.
- Kayaman-Apohan, N., Amanoel, A., Arsu, N., & Güngör, A. (2003). Synthesis and characterization of UV-curable vinyl ether functionalized urethane oligomers. *Progress in Organic Coating*, 49, 23-32.
- Kaygin, B., & Akgun, E. (2009). A nano-technological product: An innovative varnish type for wooden surfaces. *Scientific Research and Essay*, 4(1), 001-007.
- Koleske, J. V. (2002). *Radiation Curing of Coatings*, p. 218-221, Bridgeport, NJ, U.S.A.
- Kunwong, D., Sumanochitraporn, N., & Kaewpirom, S. (2011). Curing behavior of a UV-curable coating based on urethane acrylate oligomer: the influence of reactive monomers. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 33(2), 201-207.
- Landry, V., Blanchet, P., & Riedl, B. (2010). Mechanical and optical properties of clay-based nanocomposites coatings for wood flooring. *Progress in Organic Coatings*, 67(4), 381-388. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.12.011>.
- Li, X., Wang, D., Zhao, L., Hou, X., Liu, L., Feng, B., Li, M., Zheng, P., Zhao, X., & Wei, S. (2021). UV LED curable epoxy soybean-oil-based waterborne PUA resin for wood coatings. *Progress in Organic Coatings*, 151, 105942. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105942>.
- Macleod, I. T., Scully, A. D., Ghiggino, K. P., Ritchie, P. J. A., Paravagna, O. M., & Leary, B. (1995). Photodegradation at the wood-clearcoat interface. *Wood Science and Technology*, 29(3), 183-189.
- Moon, J. H., Shul, Y. G., Hong, S. Y., Choi, Y. S., & Kim, H. T. (2005). A study on UV-curable adhesives for optical pick-up: I. Photo-initiator effects. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25(4), 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2004.09.003>.
- Mosjewski, R. (1999). *UV Curing for Wood Applications*. Radtech Report.
- Narlıoğlu, N. (2012). Kimyasal kâğıt hamuru üretiminde sodyum borhidrür'ün verim ve kristalite üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kahramanmaraş.
- Patel, M. M., Patel, K. I., Patel, H. B., & Parmar, J. S. (2009). UV curable polyurethane coatings derived from cellulose. *Iranian Polymer Journal*, 18(11), 903-915.
- Perrin, F. X., Irigoyen, M., Aragon, E., & Vernet, J. L. (2001). Evaluation of accelerated weathering tests for three paint systems: a comparative study of their ageing behaviour. *Polymer Degradation and Stability*, 72(1), 115-124. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00005-2).
- Reinprecht, L. (2016). *Natural Durability of Wood. Wood Deterioration, Protection and Maintenance*; John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK, pp. 14-16.
- Roche, G. (1998). *Low-VOC Coatings Using Reactive Diluents, Demonstration Project*.
- Ross, J. S., & Sigel, G. A. (2006). *Armstrong's World Coatings Quality Journey*, Radtech Report.
- Rosu, D., Teaca, C. A., Bodirlau, R., & Rosu, L. (2010). FTIR and color change of the modified wood as a result of artificial light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 99(3), 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2010.03.010>.
- Rowell, R. M. (2012). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2nd ed.; CRC Press/Taylor & Francis: Boca Raton, FL, USA, 2012; pp. 152-199.
- Salca, E. A., Krystofiak, T., Lis, B., Mazela, B., & Proszkyk, S. (2016). Some coating properties of black alder wood as a function of varnish type and application method. *BioResources*, 11(3), 7580-7594. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.7580-7594>.
- Sandak, J., Sandak, A., Grossi, P., & Petrillo, M. (2018). Simulation and visualization of aesthetic performance of bio-based building skin. Presented at IRG49 Scientific Conference on Wood Protection, Johannesburg, South Africa, 29 April-3 May 2018. IRG/WP 18-2063.
- Scrinzi, E., Rossi, S., & Deflorian, F. (2011a). Influence of natural and artificial weathering on aesthetic and protective properties of organic coatings. *Corrosion Reviews*, 9(5-6), 275-285. <https://doi.org/10.1515/CORRREV.2011.007>.
- Scrinzi, E., Rossi, S., Deflorian, F., & Zanella, C. (2011b). Evaluation of aesthetic durability of waterborne polyurethane coatings applied on wood for interior applications. *Progress in Organic Coatings*, 72(1-2), 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.03.013>.
- Singh, R. P., Tomer, N. S., & Bhadraiah, S. V. (2001). Photo-oxidation studies on polyurethane coating:

- effect of additives on yellowing of polyurethane. *Polymer Degradation and Stability*, 73(3), 443-446. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00127-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00127-6).
- Sögütlü, C., & Sönmez, A. (2006). Değişik koruyucular ile işlem görmüş bazı yerli ağaçlarda UV ışınlarının renk değiştirici etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 151-159.
- Sönmez, A. (1989). Ağaçtan yapılmış mobilya üstyüzeylerinde kullanılan verniklerin önemli mekanik fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılıkları. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Srivastava, A., Agarwal, D., Mistry, S., & Singh, J. (2008). UV curable polyurethane acrylate coatings for metal surfaces. *Pigment & Resin Technology*, 37(4), 217-223. <https://doi.org/10.1108/03699420810887843>.
- Stachowiak-Wencek, A. (2019). Influence of the packing method of wood products on the emission of volatile organic compounds. *Wood Research*, 64(3), 515-528.
- TS ISO 13061-1 (2021). Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri - Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - Bölüm 1: Fiziksel ve mekanik deneyler için nem muhtevasının belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Vardanyan, V., Poaty, B., Chauve, G., Landry, V., Galstian, T., & Riedl, B. (2014). Mechanical properties of UV-waterborne varnishes reinforced by cellulose nanocrystals. *Journal of Coatings Technology and Research*, 11(6), 841-852. <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9598-3>.
- Vardi, J., Golan, A., Levy, D., & Gilead, I. (2010). Tracing sickle-blade levels of wear and discard patterns: A new sickle gloss quantification method. *Journal of Archaeological Science*, 37(7), 1716-1724. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.031>.
- Viengkhou, V., Ng, L. T., & Garnett, J. L. (1996). Role of additives on UV curable coatings on wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 61(3), 2361-2366.
- Wang, F., Hu, J. Q., & Tu, W. P. (2008). Study on microstructure of UV-curable polyurethane acrylate films. *Progress in Organic Coatings*, 62(3), 245-250. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.12.005>.
- Wang, J., Wu, H., Liu, R., Long, L., Xu, J., Chen, M., & Qiu, H. (2019). Preparation of a fast water-based UV cured polyurethane-acrylate wood coating and the effect of coating amount on the surface properties of oak (*Quercus alba* L.). *Polymers*, 11, 1414. <https://doi.org/10.3390/polym11091414>.
- Zhao, Z., Niu, Y., & Chen, F. (2021). Development and finishing technology of waterborne UV lacquer-coated wooden flooring. *BioResources* 16(1), 1101-1114. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1101-1114>.

Stronsiyum gideriminde sentetik inorganik iyon değiştiricilerin kullanımı

Use of synthetic inorganic ion exchangers in strontium removal

Süleyman İNAN*^{1,a}

¹ Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, 35100, Bornova-İzmir

• Geliş tarihi / Received: 19.10.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 12.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 19.04.2022

Öz

Stronsiyum-90, nükleer reaktörlerin işletilmesi sırasında oluşan stronsiyumun en tehlikeli radyoaktif izotopudur. Nükleer kazalardan ve nükleer silah testlerinden kaynaklanan serpinti nedeniyle de çevreye yayılabilir. Tehlikeli radyonüklidlerin uzaklaştırılması ve radyoaktif atıkların güvenli yönetimi hayati bir zorunluluktur. İyon değişimi, sıvı radyoaktif atıkların yönetiminde en çok kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. İnorganik iyon değiştiriciler termal, kimyasal ve radyasyon direnci ile öne çıkar. Belirli katyonlar için seçicilik gösterirler. Bu derleme, ⁹⁰Sr'nin zeolitler, titanatlar, titanosilikatlar, diğer asit tuzları, hidrate oksitler ve metal sülfürler gibi sentetik inorganik iyon değiştiriciler ile uzaklaştırılmasına odaklanmıştır. Genel olarak, 100'den fazla yayın gözden geçirilmiş ve inorganik iyon değiştiriciler kullanılarak stronsiyum giderimi hakkında ayrıntılı veriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: İnorganik iyon değiştiriciler, Radyoaktif atık, Seçicilik, Sorpsiyon, Stronsiyum

Abstract

Strontium-90 is the most dangerous radioactive isotope of strontium, which is formed during the operation of nuclear reactors. It can also spread to the environment due to fallout from nuclear accidents and nuclear weapons tests. Removal of hazardous radionuclides and safe management of radioactive waste is a vital necessity. Ion exchange has been one of the most used methods in the management of liquid radioactive waste. Inorganic ion exchangers stand out for their thermal, chemical and radiation resistance. They show selectivity for certain cations. This review focused on removal of ⁹⁰Sr by synthetic inorganic ion exchangers such as zeolites, titanates, titanosilicates, other acid salts, hydrous oxides and metal sulfides. Overall, more than 100 publications are reviewed and detailed data on strontium removal using inorganic ion exchangers are presented.

Keywords: Inorganic ion exchangers, Radioactive waste, Selectivity, Sorption, Strontium

*a Süleyman İNAN; suleyman.inan@ege.edu.tr, Tel: (0232) 311 34 61, orcid.org/0000-0003-4185-0979

1. Giriş

1. Introduction

Bugün dünyada elektriğin yaklaşık %10'unu nükleer enerjiden sağlıyoruz. 393496 MWe toplam net kurulu güç ile 442 nükleer güç reaktörü faaliyettir. Mevcut kapasitenin yaklaşık %14'üne eşdeğer toplam net kurulu gücü 53760 MWe olan 51 reaktör yapım aşamasındadır (PRIS, 2021). Nükleer reaktörler 2019 yılında 2657.16 TWh elektrik sağlarken, 2020 yılında bu değer 2553.21 TWh'a düşmüştür (PRIS, 2021). Yakın gelecekte, yüksek karbondioksit emisyonu nedeniyle fosil yakıtlı santrallerin devreden çıkarılması gündemdedir. Ancak gelişen teknolojiye bağlı olarak dünya genelinde enerjiye olan talep sürekli artmaktadır. Nükleer santraller artan enerji talebinin baz yük kaynağı olarak sürekli enerji üretimi ile karşılanmasında kilit rol oynamaktadır. Bununla birlikte, güvenlik, atık yönetimi ve kamuoyu kabulü ile ilgili konularda geliştirmeler ve iyileştirmeler devam etmektedir.

Fisyon reaksiyonunda, uranyum-235, kütleinin yaklaşık yarısı oranında iki çekirdeğe bölünür. Bir fisyon ürünü olan stronsiyum-90 (^{90}Sr), yaklaşık %6 verimle oluşmaktadır. ^{90}Sr , kullanılmış nükleer yakıtın ve yakıtın yeniden işlenmesi sonucu ortaya çıkan yüksek seviyeli radyoaktif atıkların önemli bir bileşenidir. Nükleer silah testleri ve Fukushima gibi nükleer kazalar sonucunda da çevreye yayılmıştır.

Kullanılmış nükleer yakıt, plütonyum ve fakirleşmiş uranyumun geri kazanılması için yeniden işlenir. Yeniden işlemeyen kaynaklanan sıvı atıklar, sıvı fazın durumu, aktinit içeriği, fisyon ürünleri ve radyoaktivite açısından farklılıklar içerir (Taylor, 2015). ^{137}Cs ($t_{1/2} = 30.17$ y), ^{90}Sr ($t_{1/2} = 28.80$ y), ^{106}Ru ($t_{1/2} = 373.5$ gün) ve ^{88}Zr ($t_{1/2} = 83.4$ gün), yeniden işlemeyen kaynaklı atıklarda bulunan uzun ömürlü fisyon ürünleridir (Taylor, 2015; Baisden & Atkins-Duffi, 2011).

Öte yandan, nükleer santrallerin işletme, onarım ve bertaraf faaliyetleri sonucunda sıvı radyoaktif atık (SRA) oluşmaktadır. SRA, kimyasal ve radyokimyasal bileşim açısından farklılık gösterir. Kısa ömürlü radyonüklidler bozunur ve radyokimyasal bileşim zamanla önemli ölçüde değişir. Aktiviteye bağlı olarak, SRA yüksek aktif (10 Ci/L'den yüksek), orta aktif (10 ila 10^{-2} Ci/L), düşük aktif (10^{-2} ila 10^{-5} Ci/L) ve çok düşük aktif (10^{-6} ila 10^{-9} Ci/L) olarak sınıflandırılır. Aktivite 10^{-9} Ci/L'den az ise, SRA kabul edilen derişim limitlerinin altında seyreltilir ve deşarj edilir (Marinin & Brown, 2000).

Yüksek düzey SRA'da bulunan ^{90}Sr , nispeten uzun radyoaktif yarılanma ömrü (29 yıl) nedeniyle en

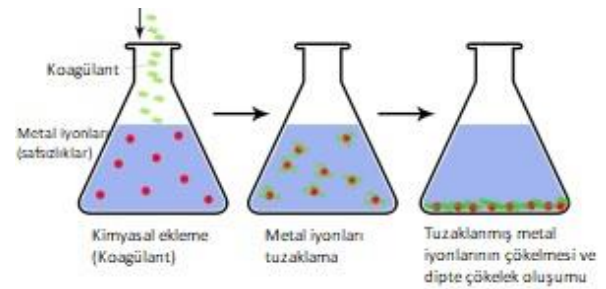
tehlikeli fisyon ürünlerinden biridir. Stronsiyum kalsiyuma benzer şekilde davranarak kemik yüzeylerinde ve kemik iliğinde birikme eğilimindedir. Stronsiyum vücuda yeme, içme veya solunum yoluyla alınabilir. (U.S. EPA, 2021). Dünya çapındaki bazı düzenleyici kurumlar için içme suyunda kabul edilebilir maksimum ^{90}Sr derişim seviyeleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. İçme suyunda kabul edilen maksimum ^{90}Sr seviyeleri

Table 1. Maximum acceptable levels of ^{90}Sr in drinking water

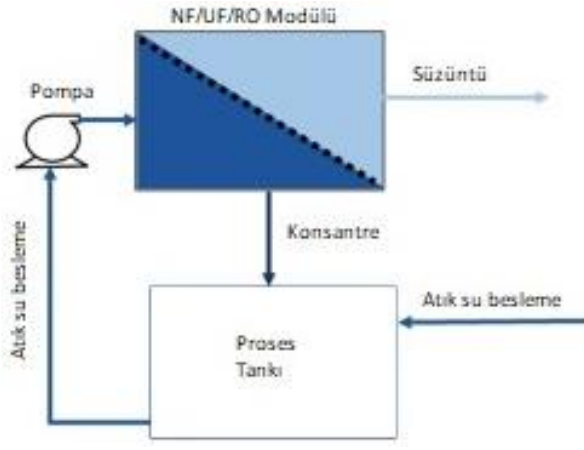
Kuruluş	Değer (Bq/L)
U.S. EPA	0.3 (U.S. EPA, 1980)
ISO/DIS 13160	10 (ISO, 2021)
WHO	10 (Radiological Aspects, 2021)

Uzun yarı ömrü ve yüksek çözünürlüğü, ana kirletici olarak radyoaktif stronsiyumun atıklardan uzaklaştırılmasını zorunlu kılar (Zhang vd., 2015a). Stronsiyumun SRA çözeltilerinden uzaklaştırılmasında koagülasyon (Rahman vd., 2011), buharlaştırma (Yang vd., 2017), membran prosesleri (Jia vd., 2017; Ambashta & Sillanpää, 2012; Luo & Wang, 2014), kimyasal çöktürme (Luo & Wang, 2014; Luo vd., 2013) solvent ekstraksiyonu (Xu vd., 2012; Kumar vd., 2011) adsorpsiyon ve iyon değişimi (Pavel & Popa, 2012; Fang vd., 2017; Krishna vd., 2004; Solbra vd., 2001; Awual vd., 2014) gibi teknikler kullanılmaktadır. Kimyasal çöktürme tekniğine ilişkin açıklayıcı şema Şekil 1'de görülmektedir. Bu yöntemde temel olarak, koagülant atık suya eklenir ve metal iyonları tuzaklaması için karıştırma işlemi uygulanır. Tuzaklanan metal iyonları kabın dibine çöker. Şekil 2'de ise atık suların kirleticilerin ayrılmasında kullanılan nanofiltrasyon, ultrafiltrasyon veya ters ozmoz yöntemine dayanan membran sistemine ilişkin görsel verilmiştir.



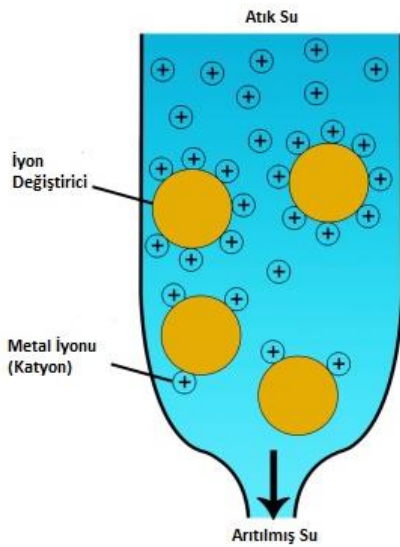
Şekil 1. Kimyasal çöktürme prosesi (Qasem vd., 2021)

Figure 1. Chemical precipitation process (Qasem vd., 2021)



Şekil 2. Atık yönetiminde kullanılan membrana dayalı arıtma sistemi (Qasem vd., 2021)
Figure 2. Membrane-based treatment system used in waste management (Qasem vd., 2021)

İyon değişim prosesleri basitliği, düşük maliyeti, yüksek kapasitesi ve seçici malzemeler nedeniyle öne çıkmaktadır. İyon değişiminin başlangıçta kil ve zeolitler gibi topraklarda gerçekleştiği keşfedilmiştir. Ticari olarak ilk temin edilebilen iyon değiştiriciler, amorf alüminosilikat jelleridir. Ancak düşük kimyasal kararlılıkları ve alternatif malzemelere duyulan ihtiyaç 1930'larda organik iyon değiştirici reçinelerin geliştirilmesinin önünü açmıştır. Bununla birlikte, 1940'larda nükleer teknolojinin kullanımının artması ile, daha iyi termal (>150°C) ve radyasyon kararlılığına sahip malzemelere duyulan gereksinim ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, araştırmacıların odak noktası inorganik iyon değiştiricilere yönelmiştir (Möller, 2002). İyon değişim prosesine ilişkin basit bir şema Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. İyon değişim süreci (Qasem vd., 2021)
Figure 3. Ion exchange process (Qasem vd., 2021)

Doğal inorganik iyon değiştiricilerin nispeten düşük seçiciliğe sahip olmaları ve kullanımlarının dar bir pH aralığında sınırlı olması gibi dezavantajları vardır. Sentetik inorganik iyon değiştiriciler kimyasal ve termal olarak kararlıdır. Ek olarak, yüksek radyasyon direnci sergilerler. Çok çeşitli metal katyonları için daha yüksek değişim kapasitesine ve seçiciliğe sahiptirler (Clearfield, 2000; Lopes vd., 2008). Sentetik inorganik iyon değiştiriciler, partikül boyutu, şekil ve gözeneklilik gibi iyi tanımlanmış kimyasal ve fiziksel özelliklerle sentezlenebilir (Figueiredo vd., 2018). Ayrıca atık immobilizasyon teknikleri ile uyumludurlar ve radyoaktif atıkların uzun süreli depolanması ve bertarafı için nihai atık formu olarak kullanılabilirler. Sentetik inorganik iyon değiştiricilerin en büyük dezavantajı, kolon kullanımına uygun olmayan ince tozlar olarak elde edilmeleridir. Bu sorun, tozların kolon işlemlerine uygun granül, pelet veya kompozit formda elde edilmesiyle çözülebilmekte aynı zamanda iyon değiştiricinin hızlı iyon değiştirme kinetiği ve seçiciliği korunmaktadır (Sylvester, 2000). Diğer yandan, sentetik malzemelerin üretim maliyetlerinin yüksek olması da bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.

Sentetik zeolitler (Smiciklas vd., 2021; Jimenez-Reyes vd., 2021; Camacho vd., 2010; Olmez Aytas vd., 2004; Barkat vd., 2015), titanatlar (Lehto & Clearfield, 1987; Li vd., 2021; Taylor-Pashow vd., 2011; Jozdani vd., 2019; Guevar vd., 2017), titanosilikatlar (Anthony vd., 1994; Miller & Brown, 1997; Clearfield vd., 2012), fosfatlar (Mu vd., 2017; Ivanets vd., 2021; Tang vd., 2018; Korneikov & Ivanenko, 2020), silikatlar (Hamed vd., 2016; Zhuravlev, 2020), metal oksitler ve bunların karışımları (Shabana & El-Dessouky, 2002; Vanketasan vd., 2000; Mishra & Singh, 1995; Trivedi & Axe, 1999; Ahmadi vd., 2014; İnan & Altaş, 2010; Zhang vd., 2015) stronsiyum ve diğer radyonüklidlerin uzaklaştırılması için iyon değiştirici malzemeler olarak kullanılmıştır. Kristal silikotitanat (CST) (Park vd., 2010) (Honeywell Şirketi, ABD), Sr-Treat (Lehto vd., 1999) (Fortum, Finlandiya) ticari adı altında sodyum titanat ve katmanlı, yarı kristal bir bileşik olan sodyum nonatitanat ($\text{Na}_4\text{TiO}_9\text{O}_{20}$) (Lehto & Clearfield, 1987) (UOP LLC, ABD) nükleer atık yönetiminde kullanılan ticari olarak mevcut iyon değiştiricileri örnekleridir. Tüm bu iyon değiştiricilerin ortak özelliği, bazik çözeltilerde stronsiyum giderimi için gösterdikleri yüksek performanslarıdır (Vijayan vd., 2011). Bu malzemelerin yüksek tuz derişimlerinde seçiciliği halen tartışmalıdır. Son zamanlarda, Manos ve Kanatzidis (2016) asidik çözeltiler de dahil olmak üzere daha geniş bir pH

aralığında stronsiyum iyonlarını uzaklaştırmak için umut verici malzemeler olarak metal sülfür iyon değiştiricileri geliştirmiştir. Bu grup altında; $K_{2x}Mn_xSn_{3-x}S_6$ ($x = 0.5-0.95$) (KMS-1), $K_{2x}Mg_xSn_{3-x}S_6$ ($x = 0.5-1$) (KMS-2) ve $K_{2x}Sn_{4-x}S_{8-x}$ ($x = 0.65-1$) (KTS-3) gibi bir çok iyon değiştirici

hazırlanmış ve incelenmiştir. Bununla birlikte, bu materyallerle ilgili daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç olduğu açıktır. Ayrıntılara girmeden önce, çeşitli iyon değiştirici tiplerinin stronsiyum sorpsiyon performansına ilişkin veriler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Sentetik inorganik iyon değiştiricilerin stronsiyum adsorpsiyon performansı
Table 2. Strontium adsorption performance of synthetic inorganic ion exchangers

İyon değiştirici	Ka(mL/g)	Kapasite(mg/g)	Verim(%)	pH aralığı	Kaynak
Zeolit 4A			99.9	4-12	(Fang vd., 2017)
Zeolit NaA			90.6	N/A	(Levenets vd., 2016)
Zeolit NaX			91.0	N/A	(Levenets vd., 2016)
Linde-type A			99.9	N/A	(Munthali vd., 2015)
Sodyum nonatitanat	235120			14.5	(Lehto & Clearfield, 1987)
Sodyum demir titanat		233.3		13.0	(Amesh vd., 2020)
Titanat nanotüp		97.7		2-10	(Ryu vd., 2016)
ETS-10 titanosilikat		211.2		N/A	(Pavel vd., 2011)
CST	7525	642.4		8-9	(Chitra vd., 2017)
Antimon silikat	35500			1-6	(Möller vd., 2001)
Mangan antimonat (MnSb)	830000	30.2		2-9	(Zhang vd., 2016b)
Zirkonyum dioksit		30.12		4-12	(İnan & Altaş, 2010)
Ta katılmış hex-WO ₃		44.43		1-8	(Li vd., 2014)
Sb ³⁺ /Sb ₂ O ₅		25.7	99.0	2-12	(Zhang vd., 2015a)
ZrO ₂ -MnO ₂		16.95		3-6	(Ahmadi vd., 2014)
TiO ₂ -SiO ₂		54.64	84.6	4-12	(Gürboğa & Tel, 2005)
KMS-1	>100000	77		1-14	(Manos & Kanatzidis, 2016)
KMS-2	>10000	87		3-10	(Manos & Kanatzidis, 2016)
KTS-3	>100000	102		2-12	(Sarma vd., 2016)

Bu derleme, radyoaktif atıklardan stronsiyumun uzaklaştırılmasında kullanılan sentetik inorganik iyon değiştiricilerin yapısal özelliklerine ve adsorpsiyon davranışlarına odaklanmaktadır. Bu kapsamda incelenen inorganik iyon değiştiriciler arasında zeolitler, çözünmeyen asit tuzları, hidrate oksitler ve metal sülfürler yer almaktadır.

2. İnorganik iyon değiştiriciler

2. İnorganik iyon değiştiriciler

2.1. Zeolitler

2.1. Zeolites

Zeolitler, açık kafes yapısına sahip hidrate alüminosilikatlardır. Kanallarında değişebilir katyonlar ve su molekülleri içerirler. Dört yüzlü SiO₄ ve AlO₄ gruplarını yapılarında bağlayarak düzenli tüneller ve boşluklar içeren çok çeşitli

malzemeler oluşturabilirler. Üç değerlikli alüminyumdan dolayı yapının negatif yükü, katyonların bağlanmasıyla nötralize edilir. Spesifik yapıya sahip zeolitler, I A ve II A gruplarındaki katyonlara oranla stronsiyum ve sezyum için yüksek seçicilik gösterirler. Zeolitler, düşük maliyetli ve bol bulunur olmaları nedeniyle radyostronsiyum ve radyosezyum iyonları içeren nükleer atık çözeltilerinin dekontaminasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır (Sylvester, 2000).

Öte yandan, kristal yapı özelliklerini önemli ölçüde etkilediğinden, endüstriyel ölçekte doğal zeolitlerin kullanımı sınırlıdır. Örneğin, küçük kanal çapları, daha büyük moleküllerin adsorpsiyonuna izin vermez. Ayrıca, doğal zeolitlerin radyonüklidler ve ağır metal iyonları için sentetik zeolitlere göre nispeten daha düşük adsorpsiyon kapasitesi vardır. Bu dezavantajlar, istenen özelliklere sahip sentetik zeolitlerin

geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmasını gerekli kılmıştır. Günümüzde en az 100 farklı zeolit yapısı bilinmektedir ve sürekli olarak mikro gözenekli kafes yapısında yeni malzemeler sentezlenmektedir. Sentetik zeolitlerin çoğunlukla ince taneli kristalimsi ve yüksek oranda dağılmış toz formunda olmaları kullanımlarını sınırlandırmaktadır (Krol, 2020).

Fang vd. (2017), Cs⁺, Sr²⁺ ve Co²⁺ iyonları dahil olmak üzere radyoaktif atık çözeltilerinin saflaştırılması için doğal zeolit ve zeolit 4A'nın performansını incelemiştir. Zeolit 4A'nın doğal zeolite kıyasla daha iyi bir Sr²⁺ adsorpsiyon performansı gösterdiğini bildirmişlerdir. Adsorpsiyon kinetiği daha hızlıdır ve adsorpsiyon verimi %90'ın üzerindedir. Mimura ve Akiba (1993) hidrotermal reaksiyon ile doğal klinoptilolit ve mordeniti yüksek derecede kristallığe sahip sentetik zeolit P'ye dönüştürmüştür. Sorpsiyon testleri, doğal zeolitlere kıyasla Sr²⁺ için zeolit P'nin adsorpsiyon hızı ve dağılım katsayısının arttığını doğrulamıştır. Yazarlar ayrıca Sr²⁺ yüklü zeolit P'nin 1000°C'nin üzerinde kalsinasyon ile kararlı seramik forma dönüştüğünü rapor etmişlerdir. Çiçek vd. (2012), zeolit 3A ve süngertaşının ⁸⁵Sr adsorpsiyon özelliklerini incelemiştir. Sorbent dozajı ve başlangıç Sr aktivitesi, yanıt yüzeyi metodolojisine göre önemli parametreler olarak tespit edilmiştir. Sorbent dozajı %0.1 w/v olduğunda maksimum dekontaminasyon faktörü 41.67 bulunmuştur. Zeolit 3A, Sr'nin

radyoaktif çözeltiden uzaklaştırılmasında süngertaşından daha etkili bulunmuştur. Abdel-Rahman vd. (2010), stronsiyum için tutucu bariyer olarak sentetik zeolit Na A-X'in kullanılmasını önermişlerdir. Stronsiyum kapasitesi 90 dakikada dengeye ulaşmış ve optimum pH 6.0 olarak tespit edilmiştir. Levenets vd. (2016) statik koşullarda stronsiyum sorpsiyonu için klinoptilolit ve sentetik zeolit sorpsiyon özelliklerinin karşılaştırılması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Sorpsiyon 168 saat sonunda dengeye ulaşmıştır. NaA ve NaX sentetik zeolitleri, sırasıyla %90.6 ve %91.0'lık Sr sorpsiyon verimine sahiptir. Klinoptilolit için ise verim %88.5'dir. Sorpsiyon verimi, stronsiyum derişimindeki artışla %20 oranında azalmıştır. Munthali vd. (2015) radyoaktif suyun dekontaminasyonu için Linde-tip A, faujasit X, faujasit Y ve mordenit kullanmıştır. Linde-tip A'nın stronsiyum için en iyi seçiciliği gösterdiği ve 0.5 M K⁺ varlığında bile adsorpsiyon veriminin %99.9'dan yüksek olduğu bildirilmiştir. Zeolit tip iyon değiştiriciler ideal olarak yalnızca sınırlı pH aralığında çalışmaktadırlar. Yüksek asidik koşullarda, zeolit yapısındaki alüminyum ve silisyum çözünme eğilimi gösterir ve iyon değişim kapasitesi azalır (Savva, 2015). Ayrıca, nispeten düşük seçicilikleri nedeniyle yüksek oranda tuz içeren sulu çözeltilerden radyonüklidlerin uzaklaştırılması için yeterli değildirler. Zeolitlerin stronsiyum adsorpsiyon davranışları Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. Zeolitlerin stronsiyum adsorpsiyon performansı
Table 3. Strontium adsorption performance of zeolites

İyon değiştirici	Kapasite veya % verim	Çalışma koşulları*	Sıvı faz	Kaynak
Zeolit 4A	%99.9	pH _i =12, C _i =1 mg/L, V=100 mL, m=1 g, T=25°C, t=1 saat	Simüle alkali atık çözeltisi	(Fang vd., 2017)
Zeolit P	161.92 mg/g	C _i =100-10000 mg/L, V=48 mL, m=0.16 g, T=25°C, t=3 gün	Sulu çözelti	(Mimura & Akiba, 1993)
Zeolit Na A-X	312.5 mg/g	pH _i =7, C _i =100-1000 mg/L, V=100 mL, m=0.1 g, T=25°C, t=3 saat	Yeraltı suyu	(Abdel-Rahman vd., 2010)
Zeolit NaX	%91.0	pH _i =7, C _i =6.66x10 ⁻⁴ mol/L, V=10 mL, m=0.05 g, T=25°C, t=168 saat	Sulu çözelti	(Levenets vd., 2016)
Linde-tip A	%99.9	C _i =10 mg/L, V=30 mL, m=0.5 g, T=25°C, t=1 saat	0.5 mol/L KNO ₃ de Sulu çözelti	(Munthali vd., 2015)

* pH_i: başlangıç pH'sı, C_i: başlangıç Sr derişimi, V: çözelti hacmi, m: iyon değiştirici miktarı, T: çalışma sıcaklığı, t: temas süresi

2.2. Çözünmeyen asit tuzları

2.2. Insoluble acid salts

2.2.1. Titanatlar

2.2.1. Titanates

Sodyum titanat ($\text{Na}_4\text{Ti}_4\text{O}_{20}\cdot n\text{H}_2\text{O}$) ve sodyum nonatitanat ($\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$), stronsiyumu, özellikle sodyum varlığında alkali çözeltilerden etkili bir şekilde ayırabilen amorf yapıda tabakalı malzemelerdir. Amorf sodyum titanat, geri akış altında konsantre sodyum hidroksit çözeltisi içinde titanyum dioksit tozu kullanılarak hazırlanabilir. Kesin kristal yapı henüz literatürde bildirilmemiştir, ancak sodyum titanatlar genellikle aralarında katyonlar bulunan katmanlar oluşturmak üzere köşe paylaşımı yoluyla birleştirilen kenar paylaşımli TiO_6 sekizyüzlü zincirlerinden meydana gelir. Oda sıcaklığında, ara katman boşluğu yaklaşık 10 Å'dir. Bu mesafe, kuruma koşullarına ve ara katman boşluğundaki su moleküllerinin miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Bu boşluk, hidratlı formlarındaki stronsiyum katyonlarının yapıya difüzyonu için yeterlidir. Yüksek seçicilik, stronsiyumun $\text{Sr}(\text{OH})^+$ olarak sorpsiyonu ile açıklanabilir. Ticari adı Sr-Treat olan sodyum titanat, Fortum Ltd. tarafından üretilmiştir ve endüstriyel uygulamalar için büyük ölçekte kullanılmaktadır. Kalsiyum varlığında, malzemenin stronsiyuma göre kalsiyum için daha yüksek seçiciliği nedeniyle Sr-Treat'in performansı önemli ölçüde düşük kalmıştır. Bu nedenle, yüksek derişimlerde tuz içeren atık çözeltilerinde sodyum titanat kullanımı azalmıştır. Sodyum titanatın katyon değişim performansı da hafif asidik atık çözeltilerde düşüktür. Bu nedenle sodyum titanat kullanarak stronsiyumu ayırmak için kalsiyumun uzaklaştırılması ve çözeltilinin nötralize edilmesi gerekir (Savva, 2015).

Lehto ve Clearfield (1987) sodyum titanatın ($\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$) stronsiyum için iyon değişim davranışlarını incelemiştir. $\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$ 'nun alkali metallere kıyasla stronsiyum için seçici olduğunu rapor etmişlerdir. Bu bulgu çok önemlidir, çünkü nükleer atıklar genellikle ^{90}Sr ile birlikte yüksek derişimlerde Na^+ iyonları içerir. 4 M Na^+ içeren çözeltideki stronsiyum için K_d değerlerinin hala 3000 mL/g civarında olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, toprak alkali metallerinin varlığında seçicilik nispeten daha düşük kalmaktadır. Behrens vd. (1998), simule edilmiş sulu atıklardan ve yeraltı suyundan ^{89}Sr ve ^{137}Cs iyonlarının uzaklaştırılmasında katmanlı $\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20}\cdot x\text{H}_2\text{O}$ dahil olmak üzere birkaç iyon değiştiriciyi test etmiştir. Tüm sentetik iyon değiştiriciler, ^{89}Sr 'nin en az %97'sini simule yeraltı

suyundan başarıyla uzaklaştırmıştır. Sodyum nonatitanat, alkali ortamda Sr^{2+} için seçici bir malzeme olarak bilinir. pH düştüğünde, H^+ iyonlarına ilgisi artar dolayısıyla, K_D değerleri pH 7'nin altında belirgin bir şekilde düşer. Mevcut çalışmadan elde edilen veriler de bu sonucu doğrulamıştır. Alkali yapıdaki NCAW simulantında, sodyum nonatitanat 235000 mL/g'nin üzerinde bir K_D değerine sahiptir. Daha az alkali özellik gösteren simulantta ise 25300 mL/g'lık K_D değeri elde edilmiştir. Amesh vd. (2020) diğer bir titanat bazlı bileşik, sodyum demir titanatı (NaFeTiO) hazırlamış, sezyum, stronsiyum ve öropiyuma karşı iyon değiştirme davranışlarını araştırmıştır. Sr için K_D değerleri pH 6'ya kadar artış göstermiş ve stronsiyum alım kapasitesi 233 mg/g olarak bulunmuştur. Stronsiyum iyonlarının adsorpsiyonunda sodyum titanatların yanı sıra farklı metal katyonları içeren titanat bileşikleri de hazırlanmıştır. Ryu vd. (2016), hidrotermal olarak yapılandırılmış titanat nanotüpler (TiNT 'ler) ile deniz suyundan Sr^{2+} 'nin uzaklaştırılması ve geri kazanılması için bir araştırma yürütmüştür. Sorpsiyon kinetiği, yalancı ikinci dereceden model ile uyumludur. İzoterm verileri Langmuir modeli ile açıklanabilmektedir ve maksimum Sr^{2+} adsorpsiyon kapasitesi 97 mg/g'dır. Adsorpsiyonda etkin mekanizmanın iyon değişimi olduğu belirlenmiştir. Sr^{2+} iyonlarının alımı, Ca^{2+} iyonlarının varlığında önemli ölçüde azalmıştır. Ca^{2+} iyonlarının yüksek derişimi nedeniyle TiNTS'nin deniz suyunda kullanımının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

2.2.2. Titanosilikatlar

2.2.2 Titanosilicates

Titanosilikat iyon değiştiriciler, stronsiyumun nükleer atıklardan seçici olarak ayrılması için ayarlanabilir özelliklere sahip, ilgi çeken bir diğer çözünmeyen asit tuzları grubudur. Bu malzemeler titanosilikat kafesten oluşur, ancak kristal yapıları ve Ti:Si oranları farklıdır. Bu durum, iyon değişim özelliklerinde farklılıklara yol açar.

Birinci tip malzeme, $\text{Na}_2\text{Ti}_2\text{O}_3\text{SiO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (NaTS) ideal formülüne sahip sodyum titanosilikattır. Kristal formda sentezlenebilir ve yapısı X-ışını yöntemleri ile belirlenebilir. Malzeme, nötr ile bazik ortamda stronsiyum gideriminde etkilidir ve kalsiyum varlığında stronsiyum için seçiciliğe sahiptir. Ancak, zayıf asidik yapısından dolayı pH 7'nin altında ^{90}Sr giderimi için etkin olarak kullanılamamaktadır. Stronsiyum ilgisine ek olarak, sodyum titanosilikat, geniş pH aralığında sezyum iyonları için seçiciliğe sahiptir. Ticari olarak temin edilebilen CST, yaklaşık %15 mol

niyobyum içerir. Toz formda (IE-910) ve kolon proseslerinde kullanıma uygun küreler halinde (IONSIV IE-911) üretilmekte ve pazarlanmaktadır.

İkinci tip malzeme, $KFe_4(AsO_4)_3(OH)_4$ ideal formül ile doğal mineral farmakosideritin kristal yapısına sahiptir. Kübik sistemde kristalize olur. Farmakosiderit yapısında hem Si hem de Ti için Ge ile yer değiştirmenin mümkün olduğu belirlenmiştir. Bu materyaller hem Cs^+ hem de Sr^{2+} için seçicilik gösterebilirler de sodyum titanosilikat kadar etkili değildirler (Sylvester, 2000).

Cs^+ ve Sr^{2+} katyonlarının uzaklaştırılmasında mikro gözenekli titanosilikat iyon değiştirici ETS-10 ($(Na, K)_2Si_5TiO_{13} \cdot nH_2O$), Pavel vd. (2011) tarafından sentezlenmiştir. Adsorpsiyon izotermi, başlangıç derişiminin artışı ile yüksek Sr^{2+} alımına işaret etmektedir. Sr^{2+} başlangıç derişimi 3520 mg/L olduğunda 211.2 mg/g'lık maksimum Sr^{2+} alım kapasitesine ulaşılmıştır. Stronsiyum alımının iyon değişimi ve fiziksel adsorpsiyon yoluyla gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca, Sr^{2+} 'nin titanosilikat matrisine immobilizasyon özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, titanosilikat içeren Sr^{2+} 'nin termal ve yüzey karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Titanosilikat, atık sulardan stronsiyum ve sezyumun giderilmesi için umut verici yüksek kapasiteli bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Sr^{2+} içeren matris, yaklaşık 800°C'de kalsinasyondan sonra kolaylıkla katılaştırılabilir ve cam-seramik malzemeye dönüştürülebilir. Chitra vd. (2017) hidrotermal yöntemle CST iyon değiştiriciyi hazırlamıştır. Yazarlar, tüneller ve boşluklardan oluşan sitinakit yapıya sahip CST'nin geniş bir pH aralığında stronsiyum ve sezyum iyonlarının yakalanmasında oldukça seçici olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak, radyoaktif stronsiyum CST yapısı içinde sabitlenebilir ve nihai bertaraf için seramik atık formuna dönüştürülebilir. Simüle edilmiş atıktaki CST, 0.6 M NaOH ve 0.1 M $NaNO_3$ varlığında hızlı bir kinetiğe sahiptir ve ^{90}Sr için oldukça seçicidir. 6 mmol SiO_2 içeren gerçek atık çözeltisinde 24 saatte adsorpsiyon dengesi kurulmuştur. Sr'nin K_D değeri ve iyon değiştirme kapasitesi sırasıyla 7525 mL/g ve 642.4 mg/g olarak belirlenmiştir. Aynı grubun bir başka çalışmasında Oleksiienko vd. (2015), sulu çözeltilerden Sr^{2+} 'yi uzaklaştırmak için sol-jel yöntemiyle titanosilikat bileşiklerini sentezlemiştir. Sentezlenen titanosilikat, pH 4 - 12 arasında Sr^{2+} için yüksek adsorpsiyon kabiliyetine sahiptir. Maksimum Sr^{2+} adsorpsiyon kapasitesi 0.01 M NaCl çözeltisinde 159.3 mg/g olarak hesaplanmıştır. Sorpsiyon kinetiği hızlıdır ve yalancı ikinci dereceden model ile uyumludur. 500 mg/L başlangıç stronsiyum derişimine kadar

adsorpsiyon üzerinde rakip iyonların önemli bir etkisi belirlenmemiştir.

2.2.3. Diğer asit tuzları

2.2.3 Other acid salts

Bu grup altında incelenen iyon değiştiriciler çok değerlikli metallerin asidik tuzlarıdır. Periyodik tablonun IV, V ve VI. gruplarındaki metallerin asidik oksitlerinin karışımları olarak hazırlanırlar. Dört değerlikli metallerin asit tuzları bu grubun en çok rapor edilen üyesidir. Çözünürlükleri yoktur. Bileşimleri stokiometrik değildir ve çöktürme koşullarına bağlıdır. Bu sınıflandırma altında sentezlenen iyon değiştiriciler arasında zirkonyum, titanyum, toryum, kalay, seryum, krom, demir, niyobyum ve tantalın fosfat, arsenat, molibdat, tungstat, antimonat, silikat, vanadat ve tellurat bileşikleri bulunur (Naushad, 2009).

Möller vd. (2001), çöktürme yöntemi ile kristal ve amorf antimon silikat iyon değiştiricileri hazırlamıştır. Her iki bileşik de 0.1 M HNO_3 çözeltisinde ^{85}Sr için yüksek seçicilik göstermiştir. Kristal ve amorf malzemeler için sırasıyla 35500 ve 19700 mL/g'lık K_D değerleri elde edilmiştir. Asidik ortam da dahil olmak üzere geniş bir pH aralığında seçicilikleri, onları diğer iyon değiştiriciler arasında benzersiz kılmaktadır. Antimon silikat bileşikleri, Zhang vd. (2015b) tarafından başlangıç materyali olarak daha az toksik $SbCl_3$ kullanılarak sentezlenmiştir. Sb oranı arttığında piroklor yapı gözlenmiş, ancak Si oranındaki artış daha büyük yüzey alanı sunan amorf bir yapı ortaya çıkarmıştır. İyon değiştiricinin Sr alımının pH 1.2 ile 11 arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Si/Sb oranı 2.9 olduğunda, 10^8 mL/g'lık maksimum K_D değerine ulaşılmıştır. 0.1 M Ca^{2+} varlığında K_d değeri 102 mL/g'a düşmüştür. Adsorpsiyon kinetiği, yalancı ikinci derece modelini takip etmektedir. Solbra vd. (2001) titanyum silikat iyon değiştirici, $M_2Ti_2O_3SiO_4 \cdot nH_2O$ (M = H, Na), ile sezyum ve stronsiyum alımı üzerine bir çalışma yürütmüştür. Adsorpsiyon testleri $NaNO_3$, $CaCl_2$, NaOH ve HNO_3 varlığında yapılmıştır. Sr alımı nötral ve alkali çözeltilerde mümkün olmuştur.

Zhang vd. (2016a) tarafından kobalt ve stronsiyum iyonlarının uzaklaştırılması için kalay antimonat sorbenti hazırlanmıştır. Sorbent, nano ölçekli ve piroklor yapıda rutil kristallerinden oluşmaktadır. Kalay antimonat, stronsiyum için pH 2 - 12 aralığında yüksek bir kapasiteye sahiptir. Sr adsorpsiyonu Freundlich izotermine iyi şekilde uyum göstermiştir. Zhang vd. (2016b) mangan antimonat (MnSb) malzemeleri ile asidik

çözültiden stronsiyum(II) ve kobalt(II)'nin uzaklaştırılmasına odaklanan başka bir araştırmayı rapor etmiştir. Malzemelerin yüksek yüzey alanı, Sr^{2+} ve Co^{2+} iyonlarının alımı için uygun bir yapı oluşturmaktadır. $pH > 2$ 'deki çözültülerde elde edilen K_D değeri 8.3×10^5 mL/g'dır. Sorpsiyon, Na^+ , Mg^{2+} ve Ca^{2+} iyonlarının varlığından etkilenmiştir. Sorpsiyon kinetiği hızlıdır ve artan sıcaklıkla birlikte Sr^{2+} alımı artmıştır. Sr adsorpsiyonu Freundlich izotermi ile açıklanabilmiştir. [Sonar vd. \(2011\)](#) tarafından kalay, mangan ve zirkonyum antimonatlar ve kompozitleri sentezlenmiş, düşük düzey radyoaktif atıklardan radyostronsiyumun uzaklaştırılmasında test edilmişlerdir. Kompozit malzemeler, toz halindeki malzemelerin polimetil

meta akrilat ile kaplanarak kürecik oluşturmasıyla elde edilmiştir. pH 11'in üzerindeki tüm kompozitler için 2000 ± 200 'lık K_D değerine ulaşılmıştır. [El-Latif ve Elkady \(2011\)](#) sol-jel, çöktürme ve hidrotermal teknikleri kullanarak nano-zirkonyum vanadat iyon değiştiricileri hazırlamışlardır. Başlatıcı derişimi, reaksiyon sıcaklığı ve süresi, ortaya çıkan ürünün iyon değişim özellikleri üzerinde etkili olmuştur. Tüm örnekler stronsiyuma kıyasla sezyum için yüksek ilgi göstermiştir. Kimyasal, termal ve radyasyon kararlılıkları oldukça yüksektir. Çözünmeyen asit tuzlarının stronsiyum adsorpsiyon davranışlarına ilişkin özet Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çözünmeyen asit tuzlarının stronsiyum adsorpsiyon performansı

Table 4. Strontium adsorption performance of insoluble acid salts

İyon değiştirici	Kapasite veya % verim	Dağılma katsayısı	Çalışma koşulları*	Sıvı faz	Kaynak
Sodyum titanat	195.36 mg/g	-	$pH_i=12.83$, $C_i=0.08$ mol/L, $m=0.2$ g, $t=5$ gün	Alkali çözelti	(Lehto & Clearfield, 1987)
Sodyum nonatitanat	-	235120 mL/g	$pH_i=14.5$, $V/m=200$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	Alkali NCAW (nötralize akış asit atığı) simulantı	(Behrens vd., 1998)
Sodium demir titanat	233 mg/g	-	$pH_i=14$, $V/m=200$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=6$ saat	0.1 M $NaNO_3$ varlığında 0.1 M $NaOH$ çözeltisi	(Amesh vd., 2020)
Titanat nanotüp	91.74 mg/g	-	$pH_i=8$, $V/m=1000$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=30$ dak	Sulu çözelti	(Ryu vd., 2016)
ETS-10 titanosilikat	211.2 mg/g	-	$pH_i=neutral$, $C_i=3520$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	Sulu çözelti	(Pavel vd., 2011)
Kristal silikotitanat	-	17525 mL/g	$pH_i=8-9$, $V/m=100$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	Radyoaktif çözelti	(Chitra vd., 2017)
Titanosilikat	79.64 mg/g	-	$pH_i=7.08$, $V/m=100$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=24$ saat	0.01 M $NaCl$	(Oleksiienko vd., 2015)
Kristal antimon silikat	-	35500 mL/g	$pH_i < 6$, $V/m=100-200$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=1-4$ gün	0.1 M HNO_3	(Möller vd., 2001)
Mangan antimonat	30.2 mg/g	-	$pH_i=4$, $C_i=10$ mg/L, $V/m=4000$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=40$ saat	Sulu çözelti	(Zhang vd, 2016b)

* pH_i : başlangıç pH'sı, C_i : başlangıç Sr derişimi, V: çözelti hacmi, m: iyon değiştirici miktarı, T: çalışma sıcaklığı, t: temas süresi

2.3. Hidrate metal oksitler ve karışımları

2.3. Hydrous metal oxides and mixtures

Hidrate oksitler, metal katyonları ve anyonların ayrılmasında yaygın olarak kullanılan önemli bir inorganik iyon değiştirici grubudur. Bu malzemeler

çoğunlukla amorfudur ve hazırlama koşullarına bağlı olarak özellikleri değişebilir. Parçacık ve kafes hidratları olarak iki gruba ayrılabilirler. 3, 4, 13 ve 14. gruptaki metallerin çoğu partikül hidratları oluşturur. Yüzey büyük ölçüde hidroksil grupları, koordineli ve hidrojen bağlı su

molekülleri ile kaplıdır. pH arttıkça kation alımı artarken, pH azaldıkça anyon alımı artar. Partikül hidratlara tipik örnekler SnO₂ ve ZrO₂'dir (Vijayan vd. 2011).

Hidrate ZrO₂, en çok rapor edilen partikül hidratlardan biridir. İnan vd. (2006) hidrate ZrO₂ ile stronsiyum sorpsiyon davranışlarını incelemişlerdir. Hidrate zirkonyum dioksit, alkali çözeltilerde yüksek sorpsiyon verimine sahiptir. Sorpsiyon dengesine 240 dakikada ulaşılmış ve sorpsiyon verileri Langmuir izotermi ile açıklanmıştır. Tek tabaka stronsiyum kapasitesi 30.12 mg/g olarak hesaplanmıştır. Sıcaklığın sorpsiyon verimi üzerinde pozitif etkisi tespit edilmiştir. Proses endotermiktir ve kendiliğinden gerçekleşmiştir. Ancak Ca²⁺ ve Ba²⁺ varlığında sorbentin seçiciliği düşük kalmıştır. ZrO₂ ile yürütülen bir diğer çalışmada, Venkatesan vd. (2000) sıcaklığın sorpsiyon kinetiği üzerinde bir etkisi olduğuna dikkat çekmiştir. Sr²⁺ alımı 30°C'de 100 dakikada dengeye ulaşmaktadır. pH 8'in üzerinde sorpsiyon veriminde kayda değer bir artış görülmüştür. Bu, Sr'nin yüzeyde SrOH⁺ iyonları olarak adsorplanması ile açıklanabilir. Baryum ve stronsiyumun hidrate demir oksit üzerindeki adsorpsiyon çalışmaları Mishra ve Tiwary (1999) tarafından yürütülmüştür. pH, temas süresi, derişim ve sıcaklığın sorpsiyon üzerindeki etkisi incelenmiştir. İzoterm verileri Freundlich modeli ile tanımlanmış ve sorpsiyon kinetiği yalancı birinci dereceden denklem ile uyumlu bulunmuştur. 10⁻² M başlangıç Sr²⁺ derişiminde hidrate demir oksitin alım kapasitesi 22.97 mg/g'dır. Sıcaklığın etkisi 303 ve 333 K aralığında incelenmiştir. 333 K'da Sr²⁺ alım kapasitesi 0.058 mg/g bulunmuştur. Çözelti pH'sının metal sorpsiyonu üzerinde önemli bir etkisi gözlenmiştir. pH 5.2'den 9.2'ye arttığında Sr²⁺ alımında kademeli bir artış görülmektedir. pH 9.2 ile 10.8 arasında Sr alımı hemen hemen sabitken, pH 11'in üzerinde keskin bir artış gözlemlenmiştir. Shabana ve El-Dessouky (2002), hidrate titanyum dioksit kullanarak klorürlü çözeltilerden sezyum ve stronsiyum iyonlarının sorpsiyonu üzerine bir çalışma rapor etmişlerdir. Malzeme, nötral çözeltilerde her iki iyon için de nispeten yüksek iyon değişim kapasitesi göstermiştir. Asidik çözeltilerde stronsiyum ilgisi daha düşüktür. Kolonda, 10⁻² M NaCl'de Sr²⁺ iyonlarının alımı, Cs⁺ iyonlarından yaklaşık %51 daha az gerçekleşmiştir. Dyer vd. (2000) tünel yapılı iki tip mangan oksit hazırlamış ve bunların radyonüklidlere karşı sorpsiyon davranışlarını incelemiştir. 0.1 M NaNO₃ çözeltisinde Mg formundaki todorokit tipi malzemeler, diğer zayıf asit iyon değiştiriciler gibi Sr için benzer sorpsiyon

özelliklerine sahiptir. pH 2'de Sr alımı ihmal edilebilir düzeyde tespit edilmiştir. Ca formundaki todorokit tipi malzemeler, stronsiyum için kalsiyuma göre daha yüksek seçicilik göstermiştir. Logunov vd. (2004), tuzluluk içermeyen sulardan ⁹⁰Sr'nin uzaklaştırılması için mangan dioksit bazlı sorbentleri kullanmıştır. Optimum Sr sorpsiyonu pH 6.9'da elde edilmiştir.

Kafes yapısındaki hidratlar, 5. ve 15. gruptaki daha yüksek oksidasyon basamaklarında bulunan metaller tarafından oluşturulur. Tipik olarak, metal oksitler zayıf asidiktir ve bu nedenle asidik koşullarda iyon değiştirici olarak davranmazlar. Antimon pentoksitte olduğu gibi metalin daha yüksek değeri ile asitlikleri artar. Sb, iyon değişim kapasitesi 5.1 meq/g olan antimon pentoksit [(H₃O)₂Sb₂O₆·xH₂O] yapısı oluşturabilir. Diğer hidrate oksitler arasında asidik koşullarda stronsiyum için en yüksek alım kapasitesine sahiptir. Bu yapı piroklor olarak adlandırılır ve kation seçiciliği boyut sınırlamaları ile ilişkilidir (Vijayan vd. 2011).

Zhang vd. (2015a) Sr²⁺ adsorpsiyonu için seçiciliği yüksek olan antimon pentoksit bazlı iyon değiştiriciyi rapor etmiştir. Materyal, yüksek tuzlu çözeltilerde, pH 2 – 12 aralığında etkili olmuştur. Sb³⁺/Sb oranı 0.41 olduğunda, optimum adsorpsiyon elde edilmiş ve K_d değeri 8.8 x 10⁸ mL/g bulunmuştur. 0.1 mol/L Ca²⁺ varlığında K_d değeri 10²-10³ mL/g aralığındadır. K_F değeri sıcaklık artışıyla artış göstermiş ve 323 K'da 40.6 mg/g olarak elde edilmiştir. Sorpsiyon kinetiği yalancı ikinci derece modele uymaktadır. Sorpsiyon partikül içi difüzyon yoluyla meydana gelmiştir. Tantal katkılı altıgen tungsten oksidin (hex-WO₃) nükleer atıklardan stronsiyum ve sezyum ayırma performansı Li vd. (2014) tarafından incelenmiştir. Stronsiyum adsorpsiyon kapasitesini arttırmak için Ta katkı olarak ilave edilmiştir. Ta/W yer değiştirme oranı 0.07 olduğunda maksimum Sr kapasitesine ulaşılmıştır. Optimum koşullar, pH 4 ve 2 saatlik temas süresi olarak gözlenmiştir. Sr sorpsiyon verileri hem Langmuir hem de Freundlich izotermine uymaktadır. Ta katkılı hex-WO₃ için maksimum Sr kapasitesi 44.43 mg/g hesaplanmıştır. Sorpsiyon işlemi ekzotermiktir ve kendiliğinden gerçekleşmiştir.

Tekli hidrate oksitler bir araya gelerek karışık oksitler oluşturur ve üstün özelliklere sahip iyon değiştiriciler elde edilir. Gürboğa ve Tel (2005), stronsiyum adsorpsiyonu için TiO₂-SiO₂ karışık jel kürelerinin hazırlanması üzerine bir çalışma yürütmüştür. %60 TiO₂ içeren karışık oksit, pH

10.6'da %84.6 adsorpsiyon verimine sahiptir. Adsorpsiyon dengesine 120 dakikada ulaşmıştır. İzoterm verileri, Freundlich izotermiyle iyi bir uyum göstermiştir. Sıcaklık adsorpsiyon üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Maksimum adsorpsiyon verimi 323 K'da %93.1 olarak elde edilmiştir. Beklendiği gibi Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının varlığında K_D değerleri azalmıştır. Zirkonyum ve mangan karışık oksitlere odaklanan birçok çalışma mevcuttur. Zirkonyum dioksit, bazik çözeltilerde ($pH > 8$) stronsiyum için yüksek bir afiniteye sahiptir. Ayrıca, yüksek kimyasal ve radyasyon kararlılığı gösterir. Mangan dioksit ise daha asidik yüzey sağlayarak hafif asidik koşullarda katyon değişimini mümkün kılar. Hidrate, amorf MnO_2-ZrO_2 kullanılarak sulu çözeltiden stronsiyum iyonlarının adsorpsiyon çalışmaları, [Ahmadi vd. \(2014\)](#) tarafından yürütülmüştür. Maksimum adsorpsiyon verimine pH 5.5'te ulaşılmış ve pH 5'in altında inorganik iyon değiştiricilerin çoğunda olduğu gibi nispeten daha düşük sorpsiyon gözlenmiştir. Maksimum stronsiyum alım kapasitesi 66 mg/g bulunmuştur. Sorpsiyon kinetiği yalancı ikinci dereceden model ile iyi bir

şekilde açıklanmış ve adsorpsiyon mekanizması kemisorpsiyon olarak modellenmiştir. [İnan ve Altaş \(2010\)](#) asidik çözeltilerden stronsiyum iyonlarının adsorpsiyonu için Mn-Zr karışık hidrate oksiti hazırlamıştır. Sorpsiyon verimi pH 4'te %80'e ulaşmış ve pH 8'e kadar sabit kalmıştır. Sorpsiyon Langmuir izotermi ile uyumludur ve maksimum Sr^{2+} alım kapasitesi 30.9 mg/g'dır. Ca^{2+} varlığında stronsiyum sorpsiyon kapasitesi azalış göstermiştir. Adsorban Sr^{2+} iyonlarına karşı Ba^{+2} iyonlarından daha seçicidir. Termodinamik veriler endotermik ve kendiliğinden gerçekleşen bir prosese işaret etmektedir. Nano boyutlu MnO_2-ZrO_2 ile ilgili bir diğer çalışma, [Ahmadi vd. \(2015\)](#) tarafından yapılmıştır. Yazarlar, nano boyuttaki kompozitin birçok avantajı olduğunu bildirmişlerdir. MnO_2-ZrO_2 yüksek adsorpsiyon verimine sahiptir ve optimum pH 5.5 olarak belirlenmiştir. Sorpsiyon 30 dakikada denegeye ulaşmış ve daha sonra sabit kalmıştır. Sorpsiyon yalancı ikinci dereceden model ile tanımlanmıştır. Hidrate metal oksit ve karışımlarının stronsiyum adsorpsiyon davranışlarına ilişkin veri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Hidrate metal oksit ve karışımlarının stronsiyum adsorpsiyon performansı
Table 5. Strontium adsorption performance of hydrous metal oxides and mixtures

İyon değiştirici	Kapasite veya % verim	Çalışma koşulları*	Sıvı faz	Kaynak
MnO_2-ZrO_2 kompoziti	16.95 mg/g	$pH_i=5.5$, $C_i=50$ mg/L, $V/m=100$ mL/g, $T=45^\circ C$, $t=60$ dak	Sulu çözelti	(Ahmadi vd., 2014)
Mn-Zr karışık hidrate oksit	30.86 mg/g	$pH_i=4.1$, $C_i=100$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=180$ dak	Asidik çözelti	(İnan & Altaş, 2010)
Ta katkılı Hex- WO_3	44.43 mg/g	$pH_i=4$, $C_i=180$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=25^\circ C$, $t=2$ saat	Asidik çözelti	(Li vd., 2014)
TiO_2-SiO_2	%84.6	$pH_i=10.6$, $C_i=5$ mg/L, $V/m=250$ mL/g, $T=23^\circ C$, $t=2$ saat	Alkali çözelti	(Gürboğa & Tel, 2005)
Sb^{3+}/Sb_2O_5	25.7 mg/g	$pH_i=4$, $C_i=4$ mg/L, $V/m=4000$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=40$ saat	Asidik çözelti	(Zhang vd., 2015a)
Hidrate ZrO_2	30.12 mg/g	$pH_i=11.7$, $V/m=250$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=4$ saat	Alkali çözelti	(İnan vd., 2006)
Hidrate ZrO_2	>%90	$pH_i \geq 8$, $C_i=10$ mg/L, $V/m=1000$ mL/g, $T=30^\circ C$, $t=100$ dak	Sulu çözelti	(Venkatesan vd., 2000)

* pH_i : başlangıç pH'sı, C_i : başlangıç Sr derişimi, V: çözelti hacmi, m: iyon değiştirici miktarı, T: çalışma sıcaklığı, t: temas süresi

2.4. Metal sülfürler 2.4. Metal sulfides

Son zamanlarda geliştirilmiş metal sülfür iyon değiştiriciler (MSİD'ler), sıvı atıkların yönetiminde

oldukça etkili olan malzemelerdir. Bu malzemeler katmanlı, üç boyutlu kristal kafes, amorf ve aerjel gibi çeşitli formlarda hazırlanabilmektedir. MSİD'lerin temel özelliği, yapılarındaki S^{2-} ligandları nedeniyle sahip oldukları üstün Sr^{2+}

adsorpsiyon performansdır. Ayrıca düşük maliyetli sentez, hızlı kinetik, yüksek kapasite ve spesifik katyonlar için seçicilik gibi avantajları bulunmaktadır (Manos & Kanatzidis, 2016). Ağır metallerin (Qi vd., 2017; Li vd., 2014a; Li vd., 2014b; Manos & Kanatzidis, 2009) ve radyonüklidlerin (Yang vd., 2016; Neeway vd., 2016; Sengupta vd., 2014; Manos & Kanatzidis, 2012) adsorpsiyonu için başarıyla kullanılmışlardır. Bugüne kadar, Sr^{2+} adsorpsiyonu için KMS-1 (Manos vd., 2008), KMS-2 (Mertz vd., 2013), KTS-3 (Sarma vd., 2016) ve $[Me_2NH_2]_{4/3}[Me_3NH]_{2/3}Sn_3S_7 \cdot 1.25H_2O$ (FJSM-SnS) (Qi vd., 2015) gibi birçok katmanlı metal sülfür bileşiği geliştirilmiştir. Çokyüzlü metal sülfür, $K_6Zn_4Sn_5S_{17}$, (Manos vd., 2005) gibi üç boyutlu kristal yapıya sahip metal sülfürler de incelenmiştir. $K_6Zn_4Sn_5S_{17}$ 'nin yapısındaki üç farklı büyüklükteki boşluk nedeniyle Cs^+ ve NH_3^+ için yüksek seçicilik gösterdiği bildirilmiştir (Manos vd., 2006). Sahip oldukları farklı yapılar göz önüne alındığında, metal sülfürlerin çeşitli metal iyonlarına karşı davranışlarını araştırmak için daha kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır (Zhang vd., 2018).

Manos ve Kanatzidis (2016), MSİD'leri kullanarak toksik metal iyonlarının ve radyonüklitlerin sorpsiyonu için kapsamlı araştırmalar yürütmüştür. Sr^{2+} sorpsiyon çalışmaları KMS-1 ve KMS-2 tipi malzemeler kullanılarak yapılmıştır. Maksimum tek tabaka Sr^{2+} sorpsiyon kapasiteleri KMS-1 ve KMS-2 için sırasıyla 77 ve 87 mg/g olarak bulunmuştur. Her iki malzeme de geniş bir pH aralığında Sr^{2+} için yüksek kapasite göstermiştir. KMS-1, 5 M Na^+ çözeltisinde pH 14'te 1.2×10^4 mL/g K_D değerine sahiptir. Ayrıca, KMS-1 oksit tipi iyon değiştiricilere kıyasla asidik çözeltelerde kabul edilebilir bir ilgiye sahiptir. Çünkü, yapıdaki S^{2-} ligandlarının protonlara karşı sınırlı bir ilgisi vardır. KMS-2, Sr^{2+} 'nin giderilmesinde hem asidik hem de alkali çözeltelerde çok iyi sonuç vermiştir. pH 3'te K_d değeri 6.3×10^4 'tür. Mertz vd. (2013) yapıdaki mangani(Mn) magnezyum(Mg) ile değiştirerek KMS-2 iyon değiştiriciyi geliştirmiştir. Mg toksik değildir ve yalnızca tek bir kararlı değerlik basamağına sahiptir. KMS-2'nin Sr^{2+} için KMS-1'den daha yüksek alım kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir. KMS-2'nin Sr^{2+} için K_d değeri nötral pH'da 2.1×10^4 mL/g olarak hesaplanmıştır. Malzemenin pH 3 - 10 aralığındaki kimyasal kararlılığı, onu nükleer atık akışları için kullanılabilir hale getirir. Ancak, Ni^{2+} iyonlarının varlığında KMS-2'nin seçiciliği azalmaktadır. Bu davranış, malzemenin daha yumuşak iyonlara olan ilgisi ile açıklanabilir. Başka bir çalışmada Sarma vd. (2016), Cs^+ , Sr^{2+} ve UO_2^{2+} iyonlarının hızlı ve

seçici olarak uzaklaştırılması için yeni bir metal sülfür olan KTS-3 bileşiğini sentezlemiştir. Materyal, pH 2 - 12 arasında kimyasal olarak kararlıdır. KTS-3, pH 4 - 10 aralığında stronsiyum için ~%98 sorpsiyon verimine sahiptir. Sr^{2+} için pH 2 ve 12'de sorpsiyon verimi %81 ve %88 olarak bulunmuş, K_D değerleri sırasıyla 10^3 - 10^5 aralığında tespit edilmiştir. Cs^+ iyonlarının Sr^{2+} sorpsiyonu üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak 1 mol/L'ye kadar Na^+ iyonlarının varlığında K_D değerlerinde önemli bir düşüş gözlenmiştir. Sorpsiyonun yaklaşık %92'si 5 dakikada tamamlanmıştır. KTS-3, daha önce rapor edilmiş KMS tipi malzemelerden daha yüksek olan 102 mg/g'lık Sr^{2+} iyon değişim kapasitesine sahiptir. Zhang vd. (2018) yeni bir metal sülfür adsorban ile sulu çözeltiden radyoaktif Sr^{2+} 'nin seçici adsorpsiyonunu incelemiştir. Malzeme kimyasal ve termal olarak kararlıdır ve çok yüzlü yapıdan oluşmaktadır. Sorpsiyon işlemi 10 dakikada tamamlanmış ve yalancı ikinci dereceden modele uyum göstermiştir. Langmuir modeline göre maksimum tek tabaka kapasitesi 298 K'de 19.3 mg/g olarak belirlenmiştir. Malzeme, hem düşük hem de yüksek derişimlerde Sr^{2+} için etkili bulunmuştur. Sorpsiyon mekanizması, yüzeydeki iyon değişimi ve S-Sr etkileşimlerinden oluşmaktadır. Başka bir metal sülfür bileşiği, Na/Zn/Sn/S (NaZTS), kuaterner metal sülfür nanolevhaları, radyoaktif stronsiyum iyonlarının adsorpsiyonu için Zhang vd. (2020) tarafından sentezlenmiştir. Önceki çalışmalarda belirtildiği gibi NaZTS, >%98.4 adsorpsiyon verimi ile pH 3 - 12 aralığında Sr^{2+} iyonlarını uzaklaştırmıştır. Sorpsiyon kinetiği çok hızlıdır ve 5 dakikada sorpsiyon dengesi kurulmuştur. 318 K'da maksimum Sr^{2+} alımı 40.4 mg/g'dır. Malzemenin yapısında üstün adsorpsiyon özelliklerinden sorumlu olan S^{2-} ligandları bulunmaktadır. Liang vd. (2019) potasyum niyobyum sülfür (KNbS) bileşiğini hazırlamış ve Sr^{2+} , Co^{2+} gibi iyonlara karşı adsorpsiyon davranışını araştırmıştır. Sr^{2+} için adsorpsiyon dengesine 35 dakikada ulaşılmıştır. Maksimum Sr^{2+} alım kapasitesi 80 mg/g'dır. Malzemenin optimum uzaklaştırma performansı pH 4 - 10 aralığında tespit edilmiştir. Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının Sr^{2+} alımı üzerinde önemli etkileri olduğu bulunmuştur. Sorpsiyon işlemi, kimyasal adsorpsiyonun iyon değişiminde rol oynadığını gösteren yalancı ikinci derece modele uygunluk göstermiştir. Ayrıca, Sr^{2+} sorpsiyonu tek tabakalı olarak meydana gelmiş ve Langmuir izotermi ile açıklanmıştır.

3. Sonuçlar

3. Conclusions

Bu derleme kapsamında sıvı nükleer atıklardaki stronsiyum iyonlarının uzaklaştırılmasında kullanılan sentetik inorganik iyon değiştiriciler incelenmiş ve yapılan çalışmalar rapor edilmiştir. Stronsiyum iyonları çok çeşitli tiplerdeki radyoaktif atıklarda bulunmaktadır. Stronsiyumu hafif asidik, nötral ve alkali çözeltilerden seçici olarak ayırabilen ticari ve endüstriyel ölçekli iyon değiştiriciler vardır. Temel sorun, yüksek kalsiyum iyonu derişiminde ve yüksek asidik çözeltilerde stronsiyumu uzaklaştırabilme yeteneğine sahip iyon değiştiricileri tasarlamaktır. Bu sorunların aşılabilmesi için yeni materyaller geliştirilmekte ve çalışmalar devam etmektedir. Radyonüklid yüklü inorganik iyon değiştiriciler, nihai bertaraf için katı atık formları olarak yüksek dayanıklılığa sahiptir.

Zeolitler, kil mineralleri ve hidroksiapatitler gibi doğal inorganik iyon değiştiriciler, birçok araştırmacı tarafından stronsiyumun uzaklaştırılması için sıklıkla kullanılmıştır. Doğal mineraller bol, ucuz malzemeler olmasına rağmen, asidik koşullarda bozdukları için yalnızca belirli bir pH aralığında yüksek kapasiteye sahiptirler. Seçicilikleri yoktur ve mekanik özellikleri kolon ayırımı için uygun değildir. Özellikle alkali çözeltide stronsiyumun seçici olarak uzaklaştırılması için titanyum bazlı iyon değiştiriciler önerilmiştir. Ticari adı Sr-Treat olan sodyum titanat, stronsiyum içeren nükleer atık akışlarının arıtılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kalsiyum iyonlarının varlığında stronsiyum seçiciliği düşük kalmaktadır. Titanosilikatlar, özellikle alkali ortamlarda stronsiyum iyonları için yüksek kapasite ve seçicilik gösteren asit tuzlarıdır. Toz halindeki CST, dünya çapında pazarlanmaktadır. Çok değerlikli metallerin üstün özelliklere sahip birçok asidik tuz bileşimi de rapor edilmiştir. Bu bileşikler suda çözünmez ve yüksek kimyasal, termal ve radyasyon kararlılığına sahiptirler. Hemen hepsi stronsiyum için nötralden alkali pH aralığına kadar yüksek kapasite ve seçicilik gösterir. Öte yandan, asidik ortamda stronsiyum iyonlarının uzaklaştırılması için antimon, tungsten gibi yüksek valens değerliğine sahip elementleri içeren iyon değiştiriciler umut verici veriler sağlamıştır. Hidrate oksitler, metal katyonları olarak Zr, Ti, Si, Mn, Fe, Al, Sb ve W dahil olmak üzere iyon değiştiricilerin en büyük gruplarından biridir. Malzemelerin yüzeyi katyon değişiminden sorumlu olan hidroksil grupları ile kaplıdır. Genelde zayıf asidiktirler ve asidik ortamda iyon değiştirici görevi görmezler. Artan pH ile katyon

alım kapasiteleri artar. Öte yandan, beş değerlikli antimon ve altı değerlikli tungsten içeren oksit bileşikleri daha yüksek asidik karaktere sahiptir ve asidik yüzeyleri nedeniyle asidik çözeltide de stronsiyum iyonlarına ilgi gösterirler. Karışık hidrate oksitler, tekli oksitlerden daha üstün malzemeler elde etmek için birlikte çöktürme veya sol-jel yöntemi ile hazırlanmaktadır. Metal sülfürler, çeşitli atık çözeltilerden belirli katyonları adsorbe edebilen nispeten yeni malzemelerdir. Hazırlanışları basittir, kapasite ve seçicilik açısından metal iyonlarının alımı için üstün özelliklere sahiptirler. Yüzeylerinde S²⁻ ligandlarının bulunması nedeniyle asidik çözeltide protonlara karşı ilgi göstermezler, dolayısıyla katyon değiştirici olarak davranırlar. Bu davranış, metal sülfürleri asidik ortamdan stronsiyum iyonlarının alımı için özellikle umut verici kılmaktadır. Rapor edilen çalışmaların sonuçları, metal sülfürlerin geniş bir pH aralığında stronsiyumu seçici olarak uzaklaştırabilme yeteneklerini ortaya koymaktadır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Abdel-Rahman, R. O., Ibrahim, H. A., Hanafy, M., & Abdel-Monem, N. M. (2010). Assessment of synthetic zeolite NaA-X as sorbing barrier for strontium in a radioactive disposal facility. *Chemical Engineering Journal*, 157(1), 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.057>
- Ahmadi, S. J., Akbari, N., Shiri-Yekta, Z., Mashhadizadeh, M. H., & Pourmatin, A. (2014). Adsorption of strontium ions from aqueous solution using hydrous, amorphous MnO₂-ZrO₂ composite: A new inorganic ion exchanger. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299, 1701-1707. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2852-9>
- Ahmadi, S. J., Akbari, N., Shiri-Yekta, Z., Mashhadizadeh, M. H., & Hosseinpour, M. (2015). Removal of strontium ions from nuclear waste using synthesized MnO₂-ZrO₂ nano-

- composite by hydrothermal method in supercritical condition. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(3), 478-485. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2852-9>
- Ambashta, R. D., & Sillanpää, M. E. T. (2012). Membrane purification in radioactive waste management: A short review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 105, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.12.002>
- Amesh, P., Suneesh, A. S., Venkatesan, K. A., Maheswari, R. U., & Vijayalakshmi, S. (2020). Preparation and ion exchange studies of cesium and strontium on sodium iron titanate. *Separation and Purification Technology*, 238, 116393. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116393>
- Anthony, R. G., Dosch, R. G., Gu, D., & Philip, C. V. (1994). Use of silicotitanates for removing cesium and strontium from defense waste. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 33(11), 2702-2705. <https://doi.org/10.1021/ie00035a020>
- Awual, M. R., Suzuki, S., Taguchi, T., Shiwaku, H., Okamoto, Y., & Yaita, T. (2014). Radioactive cesium removal from nuclear wastewater by novel inorganic and conjugate adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 242, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.072>
- Baisden, P. A., & Atkins-Duffi, C. E. (2011). Radioactive waste management. In A. Vertes, S. Nagy, Z. Klencsar, R. G. Lovas, & F. Rosch (Eds.), *Handbook of Nuclear Chemistry*. Springer.
- Barkat, M., Nibou, D., Amokrane, S., Chegrouche, S., & Mellah, A. (2015). Uranium (VI) adsorption on synthesized 4A and P1 zeolites: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Comptes Rendus Chimie*, 18(3), 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2014.09.011>
- Behrens, E. A., Sylvester, P., & Clearfield, A. (1998). Assessment of a sodium nonatitanate and pharmacosiderite-type ion exchangers for strontium and cesium removal from DOE waste simulants. *Journal of Environmental Science and Technology*, 32(1), 101-107. <https://doi.org/10.1021/ES9704794>
- Camacho, L. M., Deng, S., & Parra, R. R. (2010). Uranium removal from groundwater by natural clinoptilolite zeolite: Effects of pH and initial feed concentration. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 393-398. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.017>
- Chitra, S., Shanmugamani, A. G., Sudh, R., Kalavathi, S., & Paul, B. (2017). Selective removal of cesium and strontium by crystalline silicotitanates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 312, 507-515. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5249-3>
- Clearfield, A. (2000). Inorganic ion exchangers, past, present, and future. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 18(4), 655-678. <https://doi.org/10.1080/07366290008934702>
- Clearfield, A., Medvedev, D. G., Kerlegon, S., Bossier, T., Burns, J. D., & Jackson, M. (2012). Rates of exchange of Cs⁺ and Sr²⁺ for poorly crystalline sodium titanium silicate (CST) in nuclear waste systems. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 30(3), 229-243. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.639256>
- Çiçek, E., Cojocaru, C., Zakrzewska-Trznadel, G., Harasimowicz, M., & Miskiewicz, A. (2012). Response surface methodology for the modelling of ⁸⁵Sr adsorption on zeolite 3A and pumice. *Environmental Technology*, 33(1), 51-59. <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.549514>
- Dyer, A., Pillinger, M., Newton, J., Harjula, R., Möller, T., & Amin, S. (2000). Sorption behavior of radionuclides on crystalline synthetic tunnel manganese oxides. *Chemistry of Materials*, 12(12), 3798-3804. <https://doi.org/10.1021/cm001142v>
- El-Latif, M. M. A., & Elkady, M. F. (2011). Synthesis, characterization and evaluation of nano-zirconium vanadate ion exchanger by using three different preparation techniques. *Materials Research Bulletin*, 46(1), 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.09.032>
- Fang, X-H., Fang, F., Lu, C-H., & Zheng, L. (2017). Removal of Cs⁺, Sr²⁺, and Co²⁺ ions from the mixture of organics and suspended solids aqueous solutions by zeolites. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(3), 556-561. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.11.008>
- Figueiredo, B. R., Cardoso, S. P., Portugal, I., Rocha, J., & Silva, C. M. (2018). Inorganic ion exchangers for cesium removal from radioactive wastewater. *Separation and Purification Reviews*, 47(4), 306-336. <https://doi.org/10.1080/15422119.2017.1392974>
- Guevar, C., Hertz, A., Brackx, E., Barre, Y., & Grandjean, A. (2017). Mechanisms of strontium removal by a Ba-titanate material for the wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4948-4957. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.024>
- Gürboğa, G., & Tel, H. (2005). Preparation of TiO₂-SiO₂ mixed gel spheres for strontium adsorption. *Journal of Hazardous Materials*, 120(1-3), 135-

142.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.12.037>
- Hamed, M. M., Holiel, M., & Ahmed, I. M. (2016). Sorption behavior of cesium, cobalt and europium radionuclides onto hydroxyl magnesium silicate. *Radiochimica Acta*, 104(12), 873-890. <https://doi.org/10.1515/ract-2016-2579>
- ISO-International Organization for Standardization. (2021, 10 Ekim). *ISO/DIS 13160(en) Water quality-strontium 90 and strontium 89-test methods using liquid scintillation counting or proportional counting*. <https://www.iso.org/standard/78205.html>
- Ivanets, A., Radkevich, A., Shashkova, I., Kitikova, N., Zarubo, A., & Venhlinkskaya, E. (2021). Study of dynamic adsorption and desorption kinetics of cesium, strontium, cobalt radionuclides on granular phosphate adsorbent. *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 327, 1291-1298. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07584-w>
- İnan, S., & Altaş, Y. (2010). Adsorption of strontium from acidic waste solution by Mn-Zr mixed hydrous oxide prepared by co-precipitation. *Separation Science and Technology*, 45(2), 269-276. <https://doi.org/10.1080/01496390903409666>
- İnan, S., Tel, H., & Altaş, Y. (2006). Sorption studies of strontium on hydrous zirconium dioxide. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 267(3), 615-621. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0094-9>
- Jia, F., Li, J., Wang, J., & Sun, Y. (2017). Removal of strontium ions from simulated radioactive wastewater by vacuum membrane distillation. *Annals of Nuclear Energy*, 103, 363-368. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.02.003>
- Jimenez-Reyes, M., Almazan-Sanchez, P. T., & Solache-Rios, M. (2021). Radioactive waste treatments by using zeolites. A short review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 233, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106610>
- Jozdani, S. M. B., Nilchi, A., & Abdolmohammadi, S. (2019). Disposal of cesium ion from wastewater using biocompatible titanate nanotube. *Desalination and Water Treatment*, 138, 219-229. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23335>
- Korneikov, R. I., & Ivanenko, V. I. (2020). Extraction of cesium and strontium cations from solutions by titanium(IV) phosphate-based ion exchangers. *Inorganic Materials*, 56(5), 528-532. <https://doi.org/10.1134/S0020168520050088>
- Krishna, M. V. B., Rao, S., Arunachalam, J., Murali, M., Kumar, S., & Manchanda, V. (2004). Removal of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from actual low level radioactive waste solutions using moss as a phyto-sorbent. *Separation and Purification Technology*, 38(2), 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.11.002>
- Krol, M. (2020). Natural vs. synthetic zeolites. *Crystals*, 10(7), 622. <https://doi.org/10.3390/cryst10070622>
- Kumar, J. R., Kim, J.-S., Lee, J.-Y., & Yoon, H.-S. (2011). A brief review on solvent extraction of uranium from acidic solutions. *Separation and Purification Reviews*, 40(2), 77-125. <https://doi.org/10.1080/15422119.2010.549760>
- Lehto, J., & Clearfield, A. (1987). The ion exchange of strontium on sodium titanate Na₄Ti₉O₂₀-xH₂O. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters*, 118(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/BF02165649>
- Lehto, J., Bordkin, L., Harjula, R., & Tusa, E. (1999). Separation of radioactive strontium from alkaline nuclear waste solutions with the highly effective ion exchanger SrTreat. *Nuclear Technology*, 127(1), 81-87. <https://doi.org/10.13182/NT99-A2985>
- Levenets, V. V., Lonin, A. Y., Omelnik, O. P., & Shchur, A. O. (2016). Comparison the sorption properties of clinoptilolite and synthetic zeolite during sorption strontium from the water solutions in static conditions: Sorption and quantitative determination of strontium by the method PIXE. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 3961-3966. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.011>
- Li, H., Huang, Y., Liu, J., & Duan, H. (2021). Hydrothermally synthesized titanate nanomaterials for the removal of heavy metals and radionuclides from water: A review. *Chemosphere*, 282, 131046. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131046>
- Li, J., Wang, X., Yuan, B., & Fu, M. (2014a). Layered chalcogenide for Cu²⁺ removal by ion exchange from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 200, 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.09.008>
- Li, J., Wang, X., Yuan, B., Fu, M., & Cui, H. (2014b). Robust removal of heavy metals from water by intercalation chalcogenide [CH₃NH₃]_{2x}Mn_xSn_{3-x}S₆·0.5H₂O. *Applied Surface Science*, 320, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.057>
- Li, X., Mu, W., Xie, X., Liu, B., Tang, H., Zhou, G., Wei, H., Jian, Y., & Lou, S. (2014). Strontium

- adsorption on tantalum-doped hexagonal tungsten oxide. *Journal of Hazardous Materials*, 264, 386-394. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.032>
- Liang, C., Jia, M., Wang, X., Du, Z., Men, J., & Ding, H. (2019). Preparation of potassium niobium sulfide and its selective adsorption properties for Sr^{2+} and Co^{2+} . *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322, 377-387. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06685-5>
- Logunov, M. V., Skobtsov, A. S., Soldatov, B. V., Pazdnikov, A. P., Voroshilov, Y. A., & Rovny, S. I. (2004). Research and application of inorganic selective sorbents at Mayak PA. *Comptes Rendus Chimie*, 7(12), 1185-1190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crci.2004.05.006>
- Lopes, C. B., Lito, P. F., Otero, M., Lin, Z., Rocha, J., Silva, C. M., Pereira, E., & Duarte, A. C. (2008). Mercury removal with titanasilicate ETS-4: Batch experiments and modelling. *Microporous and Mesoporous Materials*, 115(1-2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.10.055>
- Luo, X., & Wang, J. (2014). Study on radioactive wastewater treatment by precipitation and membrane separation. *Applied Mechanics and Materials*, 490-491, 972-975. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.972>
- Luo, X., Zhang, G., Wang, X., & Gu, P. (2013). Research on a pellet coprecipitation micro-filtration process for the treatment of liquid waste containing strontium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 298(2), 931-939. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2495-x>
- Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2016). Metal sulfide ion exchangers: superior sorbents for the capture of toxic and nuclear waste-related metal ions. *Chemical Science*, 7(8), 4804-4824. <https://doi.org/10.1039/C6SC01039C>
- Manos, M. J., Iyer, R. G., Quarez, E., Liao, J. H., & Kanatzidis, M. G. (2005). $\{\text{Sn}[\text{Zn}_4\text{Sn}_4\text{S}_{17}]\}^{6-}$: A robust open framework based on metal-linked penta-supertetrahedral $[\text{Zn}_4\text{Sn}_4\text{S}_{17}]^{10-}$ clusters with ion-exchange properties. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(23), 3552-3555. <https://doi.org/10.1002/anie.200500214>
- Manos, M. J., Chrissafis, K., & Kanatzidis, M. G. (2006). Unique pore selectivity for Cs^+ and exceptionally high NH_4^+ exchange capacity of the chalcogenide material $\text{K}_6\text{Sn} [\text{Zn}_4\text{Sn}_4\text{S}_{17}]$. *Journal of American Chemical Society*, 128(27), 8875-8883. <https://doi.org/10.1021/ja061342t>
- Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2009). Sequestration of heavy metals from water with layered metal sulfides. *Chemistry-A European Journal*, 15(19), 4779-4784. <https://doi.org/10.1002/chem.200900353>
- Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2012). Layered metal sulfides capture uranium from seawater. *Journal of American Chemical Society*, 134(39), 16441-16446. <https://doi.org/10.1021/ja308028n>
- Manos, M. J., Ding, N., & Kanatzidis, M. G. (2008). Layered metal sulfides: Exceptionally selective agents for radioactive strontium removal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(10), 3696-3699. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711528105>
- Marinin, D. V., & Brown, G. N. (2000). Studies of sorbent/ion-exchange materials for the removal of radioactive strontium from liquid radioactive waste and high hardness groundwaters. *Waste Management*, 20(7), 545-553. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00017-9)
- Mertz, J. L., Fard, Z. H., Malliakas, C. D., Manos, M. J., & Kanatzidis, M. G. (2013). Selective removal of Cs^+ , Sr^{2+} , and Ni^{2+} by $\text{K}_{2x}\text{Mg}_x\text{Sn}_{3-x}\text{S}_6$ ($x=0.5-1$) (KMS-2) relevant to nuclear waste remediation. *Chemistry of Materials*, 25(10), 2116-2127. <https://doi.org/10.1021/cm400699r>
- Miller, J. E., & Brown, N. E. (1997). Development and properties of crystalline silicotitanate (CST) ion exchangers for radioactive waste applications. Technical report, SAND97-0771. <https://doi.org/10.2172/469131>
- Mimura, H., & Akiba, K. (1993). Adsorption behavior of cesium and strontium on synthetic zeolite P. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 30(5), 436-443. <https://doi.org/10.1080/18811248.1993.9734500>
- Mishra, S. P., & Singh, V. K. (1995). Radiotracer technique in adsorption study XIII. Adsorption of barium and strontium ions on chromium(IV) oxide powder. *Applied Radiation and Isotopes*, 46(9), 847-853. [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(95\)00149-8](https://doi.org/10.1016/0969-8043(95)00149-8)
- Mishra, S. P., & Tiwary, D. (1999). Ion exchangers in radioactive waste management. Part XI. Removal of barium and strontium ions from aqueous solutions by hydrous ferric oxide. *Applied Radiation and Isotopes*, 51(4), 359-366. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(99\)00065-2](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(99)00065-2)
- Möller, T. (2002). *Selective crystalline inorganic materials as ion exchangers in the treatment of nuclear waste solutions*. [Doctoral Thesis, University of Helsinki].

- Möller, T., Harjula, R., Pillinger, M., Dyer, A., Newton, J., Tusa, E., Amin, S., Webb, M., & Araya, A. (2001). Uptake of ^{85}Sr , ^{134}Cs and ^{57}Co by antimony silicates doped with Ti^{4+} , Nb^{5+} , Mo^{6+} and W^{6+} . *Journal of Materials Chemistry*, 11(5), 1526-1532. <https://doi.org/10.1039/B009888O>
- Mu, W., Yu, Q., Zhang, R., Li, X., Hu, R., He, Y., Wei, H., Jian, Y., & Yang, Y. (2017). Controlled fabrication of flower-like α -zirconium phosphate for the efficient removal of radioactive strontium from acidic nuclear wastewater. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(46), 24388-24395. <https://doi.org/10.1039/C7TA07803J>
- Munthali, M. W., Johan, E., Aono, H., & Matsue, N. (2015). Cs^+ and Sr^{2+} adsorption selectivity of zeolites in relation to radioactive decontamination. *Journal of Asian Ceramics Societies*, 3(3), 245-250. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.04.002>
- Naushad, M. (2009). Inorganic and composite ion exchange materials and their applications. *Ion Exchange Letters*, 2, 1-14.
- Neeway, J. J., Asmussen, R. M., Lawter, A. R., Bowden, M. E., Lukens, W. W., Sarma, D., Riley, B. J., Kanatzidis, M. G., & Qafoku, N. P. (2016). Removal of TcO_4^- from representative nuclear waste streams with layered potassium metal sulfide materials. *Chemistry of Materials*, 28(11), 3976-3983. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b01296>
- Oleksiienko, O., Levchuk, I., Sitarz, M., Meleshevych, S., Strelko, V., & Sillanpää, M. (2015). Removal of strontium (Sr^{2+}) from aqueous solutions with titanosilicates obtained by the sol-gel method. *Journal of Colloid and Interface Science*, 438, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.09.075>
- Olmez Aytas, S., Akyil, S., & Eral, M. (2004). Adsorption and thermodynamic behavior of uranium on natural zeolite. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 260, 119-125. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000027070.25215.92>
- Park, Y., Shin, W. S., Reddy, S., Shin, S.-J., & Choi, S.-J. (2010). Use of nano crystalline silicotitanate for the removal of Cs, Co, Sr from low-level liquid radioactive waste. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 5(2), 238-242. <https://doi.org/10.1166/jno.2010.1101>
- Pavel, C. C., & Popa, K. (2014). Investigations on the ion exchange process of Cs^+ and Sr^{2+} cations by ETS materials. *Chemical Engineering Journal*, 245, 288-294. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.036>
- Pavel, C. C., Walter, M., Pöml, P., Bouexiere, D., & Popa, K. (2011). Contrasting immobilization behavior of Cs^+ and Sr^{2+} cations in a titanosilicate matrix. *Journal of Materials Chemistry*, 21(11), 3831-3837. <https://doi.org/10.1039/C0JM03135F>
- Popa, K., & Pavel, C. C. (2012). Radioactive wastewaters purification using titanosilicates materials: State of the art and perspectives. *Desalination*, 293, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.02.027>
- PRIS-Power Reactor Information System. (2021, 10 Ekim). *The database on nuclear power reactors*. <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- PRIS-Power Reactor Information System. (2021, 10 Ekim). *Trend in electricity supplied*. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendinElectricalProduction.aspx>
- Qasem, N.A.A., Mohammed, R.H., Lawal, D.U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *Npj Clean Water*, 4, 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Qi, X., Du, K., Feng, M., Gao, Y., Huang, X., & Kanatzidis, M. G. (2017). The layered $\text{A}_2\text{Sn}_3\text{S}_7$ (A=organic cation) as efficient ion-exchanger for rare earth element recovery. *Journal of the American Chemical Society*, 139(12), 4314-4317. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b00565>
- Qi, X., Du, K., Feng, M., Li, J., Du, C., Zhang, B., & Huang, X. (2015). A two-dimensionally microporous thiostannate with superior Cs^+ and Sr^{2+} ion-exchange property. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(10), 5665-5673. <https://doi.org/10.1039/C5TA00566C>
- Radiological Aspects. (2021, 10 Ekim). *Guidelines for Drinking-Water Quality*. Erişim adresi https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDW9rev1and2.pdf.
- Rahman, R. O. A., Ibrahim, H. A., & Hung, Y. T. (2011). Liquid radio-active wastes treatment: A review. *Water*, 3(2), 551-565. <https://doi.org/10.3390/w3020551>
- Ryu, J., Kim, S., Hong, H.-J., Hong, J., Kim, M., Ryu, T., Park, I.-S., Chung, K.-S., Jang, J. S., & Kim, B.-G. (2016). Strontium ion (Sr^{2+}) separation from seawater by hydrothermally structured titanate nanotubes: Removal vs. recovery. *Chemical Engineering Journal*, 304, 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.131>
- Sarma, D., Malliakas, C. D., Subrahmanyam, K. S., Islama, S. M., & Kanatzidis, M. G. (2016). $\text{K}_{2x}\text{Sn}_{4-x}\text{S}_{8-x}$ ($x=0.65-1$): A new metal sulfide for

- rapid and selective removal of Cs⁺, Sr²⁺ and UO₂²⁺ ions. *Chemical Science*, 7(2), 1121-1132. <https://doi.org/10.1039/C5SC03040D>
- Savva, S. N. (2015). *New materials for strontium removal from nuclear waste streams*. [Doctoral Thesis, University of Birmingham].
- Sengupta, P., Dudwadkar, N. L., Vishwanadh, B., Pulhani, V., Rao, R., Tripathi, S. C., & Dey, G. K. (2014). Uptake of hazardous radionuclides with layered chalcogenide for environmental protection. *Journal of Hazardous Materials*, 266, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.010>
- Shabana, E. I., & El-Dessouky, M. I. (2002). Sorption of cesium and strontium ions on hydrous titanium dioxide from chloride medium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 253(2), 281-284. <https://doi.org/10.1023/A:1019610128059>
- Smiciklas, I., Coha, I., Jovic, M., Nodilo, M., Sljivic-Ivanovic, M., Smiljanic, S., & Grahek, Z. (2021). Efficient separation of strontium radionuclides from high-salinity wastewater by zeolite 4A synthesized from Bayer process liquids. *Scientific Reports*, 11, 1738. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81255-y>
- Solbra, S., Allison, N., Waite, S., Mikhalovsky, S. V., Bortun, A. I., Bortun, L. N., & Clearfield, A. (2001). Cesium and strontium ion exchange on the framework titanium silicate M₂Ti₂O₃SiO₄·nH₂O (M = H, Na). *Environmental Science & Technology*, 35(3), 626-629. <https://doi.org/10.1021/es000136x>
- Sonar, N. L., Pardeshi, V., De, V., Shukla, R., Valsala, T. P., Kulkarni, Y., Manoj, N., Pillai, C. S., Tyagi, A. K., Raj, K., & Manchanda, V. K. (2011). Evaluation of metal antimonate compounds for the removal of radiostrontium from radioactive liquid waste: Characterization and sorption behavior. *Separation Science and Technology*, 46(11), 1776-1787. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.571226>
- Sylvester, P. (2000). *Strontium from nuclear wastes: Ion exchange*. Academic Press.
- Tang, M., Chen, J., Wang, P., Wang, C., & Ao, Y. (2018). Highly efficient adsorption of uranium(VI) from aqueous solution by a novel adsorbent: Titanium phosphate nanotubes. *Environmental Science: Nano*, 5, 2304-2314. <https://doi.org/10.1039/C8EN00761F>
- Taylor-Pashow, K. M. L., Missimer, D. M., Jurgensen, A., & Hobbs, D. T. (2011). Characterization of modified monosodium titanate - an improved sorbent for strontium and actinide separations. *Separation Science and Technology*, 46(7), 1087-1097. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.554951>
- Taylor, R. (2015). *Reprocessing and recycling of spent nuclear fuel*. Elsevier.
- Trivedi, P., & Axe, L. (1999). A comparison of strontium sorption to hydrous aluminum, iron, and manganese oxides. *Journal of Colloid and Interface Science*, 218(2), 554-563. <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6465>
- U.S. EPA-United States Environmental Protection Agency. (2021, 10 Ekim). *Radionuclide basics: Strontium-90*. <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-strontium-90>
- U.S. EPA, EMSL. (1980). *Method 905.0: Radioactive strontium in drinking water, prescribed procedures for measurement of radioactivity in drinking water*, EPA/600/4/80/032. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-905.0.pdf>
- Venkatesan, K. A., Panner Selvam, G., & Vasudeva Rao, P. R. (2000). Sorption of strontium on hydrous zirconium oxide. *Separation Science and Technology*, 35(14), 2343-2357. <https://doi.org/10.1081/SS-100102106>
- Vijayan, S., Belikov, K., & Drapailo, A. (2011). Inorganic sorbents for radiostrontium removal from waste solutions: Selectivity and role of calixarenes. Technical Report, AECL-CW-121600-CONF-001.
- Xu, C., Wang, J., & Chen, J. (2012). Solvent extraction of strontium and cesium: A review of recent progress. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 30(6), 623-650. <https://doi.org/10.1080/07366299.2012.700579>
- Yang, A., Yang, P., & Huang, C. P. (2017). Effect of Mg(II) on the removal of uranium from low radioactive wastewater by flocculation using polyacrylamide. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 21(4), 4017006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000359](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000359)
- Yang, H., Luo, M., Luo, L., Wang, H., Hu, D., Lin, J., Wang, X., Wang, Y., Wang, S., & Bu, X. (2016). Highly selective and rapid uptake of radionuclide cesium based on robust zeolitic chalcogenide via stepwise ion-exchange strategy. *Chemistry of Materials*, 28, 8774-8780. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b04273>
- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., Jiang, F., & Zhang, M. (2015a). Strontium(II) adsorption on use of silicotitanates for removing cesium and strontium from defense waste Sb(III)/Sb₂O₅. *Chemical Engineering Journal*, 267, 245-252.

- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., & Jiang, F. (2015b). Adsorption characteristics of strontium on synthesized antimony silicate. *Chemical Engineering Journal*, 277, 378-387. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.145>
- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., Jiang, F., Zhang, M., & Cheng, X. (2016a). Competitive adsorption of strontium and cobalt onto tin antimonate. *Chemical Engineering Journal*, 285, 679-689. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.013>
- Zhang, L., Wei, J., Zhao, X., Li, F., Jiang, F., Zhang, M., & Cheng, X. (2016b). Removal of strontium(II) and cobalt(II) from acidic solution by manganese antimonate. *Chemical Engineering Journal*, 302, 733-743. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.040>
- Zhang, M., Gu, P., Zhang, Z., Liu, J., Dong, L., & Zhang, G. (2018). Effective, rapid and selective adsorption of radioactive Sr²⁺ from aqueous solution by a novel metal sulfide adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 351, 668-677. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.069>
- Zhang, M., Gu, P., Yan, S., Dong, L., & Zhang, G. (2020). Na/Zn/Sn/S (NaZTS): Quaternary metal sulfide nanosheets for efficient adsorption of radioactive strontium ions. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122227. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122227>
- Zhuravlev, I. (2020). Titanium silicates precipitated on the rice husk biochar as adsorbents for the extraction of cesium and strontium radioisotope ions. *Colloids and Interfaces*, 3(1), 36. <https://doi.org/10.3390/colloids3010036>

Atık lastiklerin, beton üretiminde agrega olarak kullanımının betonun taze ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması

Investigating the effect of the use of waste tires as aggregate in concrete production on the fresh and mechanical properties of concrete

Süleyman İPEK^{*1,a}, Kasım MERMERDAŞ^{2,b}, Alparslan ULUSOY^{2,c}, Yusuf İŞIKER^{3,d}

¹Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Bingöl, Türkiye

²Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

³Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 20.12.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 19.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 29.04.2022

Öz

Kullanım ömrünü tamamlamış araç lastiklerinin geri dönüştürülmesi çözüm bekleyen global ölçekte bir sorundur. Bu lastiklerin depolanarak muhafaza edilmesi sorunu çözmek yerine olası problemlerle yüzleşmeyi geciktiren bir durumdur. Bu bağlamda atık lastiklerin çevreye zarar vermeden ve düşük maliyetlerle geri dönüştürülmesi birçok araştırmacının ilgili odağı olmuştur. 21. yy.ın başından buyana, bu lastiklerin öğütülerek beton üretiminde kullanılan agrega boyutlarına getirilip sonrasında beton üretiminde doğal agrega yerine kullanılabilirliği bu alanda çalışan bilim insanlarının araştırma konusu olmuştur. Literatürde bu konu ile ilgili çalışmaların sayısı da her geçen gün artmaktadır. Bu çalışma da temelinde bu alandaki son gelişmeleri derleyerek literatüre kazandırma amacına sahiptir. Bilindiği üzere betonun hem taze durumdaki hem de sertleşmiş durumdaki özellikleri çok geniş bir yelpazeye sahiptir. Buradaki çalışmanın amacına uygun bir şekilde sunulabilmesi için de atık lastiklerden elde edilmiş lastik agregalarının betonun taze özelliklerinden işlenebilirlik ve reolojik davranışı, sertleşmiş özelliklerinden ise basınç ve çekme dayanımı, elastik modül, kırılma parametreleri ve aşınma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Derlenen bilgilerden elde edilen bulgular neticesinde lastik agregasının beton üretiminde kullanılması genel olarak betonun bahsedilen özelliklerini kötüleştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu özelliklerin ne derece etkilendiği de lastik agreganın şekli, boyut, yüzey özellikleri ve ikame seviyesi ile ilişkilidir. Bundan dolayı bu tür betonların yapısal betonlarda kullanımı önerilmemekle beraber yapısal olmayan, kentsel peyzaj yapılarında, yol banket kenar bordürleri, kilit taşları, satıh kaplamaları vb. üretimlerde kullanılmasının iyi bir geri dönüşüm alternatifi olacağı vurgulanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Atık yönetimi, Beton, Geri dönüşüm, Lastik agregası

Abstract

Recycling of end-of-life tires is a global problem that needs a solution. Storing and preserving these tires is a situation that delays facing potential problems instead of solving the problem. In this context, recycling of waste tires without harming the environment and at low costs has been the focus of many researchers. Since the beginning of the 21st century, the possibility of these tires to be granulated to the size of aggregate employed in concrete production and then to be used instead of natural aggregate in the manufacturing of the concrete has been the subject of research by scientists studying in this field. In the literature, the number of studies conducted on this subject has been increasing day by day. This study basically aims to compile the latest developments in this field and bring them to the literature. As it is known, the properties of concrete both in the fresh state and hardened state have a wide range. In order to present the study in accordance with its scope, the influence of tire aggregates obtained from waste tires on the fresh properties of concrete like workability and rheological behavior and the hardened properties such as the compressive and tensile strengths, elastic modulus, fracture parameters, and wear resistance were investigated. As a consequence of the findings achieved from the compiled information, it can be concluded that the incorporation of rubber aggregate in concrete production has generally adverse influences on the mentioned properties of concrete. In addition, the degree of affection of these properties is related to the shape, size, surface properties, and level of substitution of the rubber aggregate. Therefore, although the use of such concretes for structural purposes is not recommended, it is emphasized that it will be a good recycling alternative to use in non-structural like urban landscape structures, road shoulder side borders, keystones, surface coatings, etc.

Keywords: Waste management, Concrete, Recycle, Rubber aggregate

*a Süleyman İPEK; sipek@bingol.edu.tr, Tel: (0426) 216 00 12/1970, orcid.org/0000-0001-8891-949X

^b orcid.org/0000-0002-1274-6016

^c orcid.org/0000-0002-1376-2448

^d orcid.org/0000-0002-6777-0080

1. Giriş

1. Introduction

Durağan veya seyir halindeki bir taşıtın güvenli bir şekilde yer ile temasını sağlayan en önemli parçalarından biri olan lastikler, 1846'da demiryolu mühendisi İskoç Robert William Thomson tarafından "pnömatik tekerlekler" için üretilip patenti alınmıştır. Öte yandan, sıvı lastik kullanımıyla kanvas ve/veya deri parçaları birbirine yapıştırılarak bisiklet için şişme lastikler 1880'li yılların sonunda veteriner hekim İskoç John Boyd Dunlop tarafından icat edilmiştir. Bugünün lastikleri ise, 1891'de iki erkek kardeş, Andre ve Edouard Michelin tarafından çıkarılabilir lastik olarak üretilmiştir (ETRMA, 2015). Araç lastikleri, kullanım ömürleri tamamlandığında yani değiştirilme amacıyla söküldüklerinde, bu minvalde tekrar kullanılmayacakları anlamına gelir. Dolayısıyla, bu işleme lastikler, hurda lastiği olarak bilinen atık madde duruma gelir ve ürün/malzeme geri dönüşümü, enerji geri kazanımı veya çöp depolama alanlarına dayalı atık yönetim sistemine girerler.

Kullanılmayan ve/veya istenmeyen malzemeler olan atık maddeler; zirai işlemler, ticari, endüstriyel veya madencilik işlemleri gibi bir dizi üretim aşamasından veya ev içi faaliyetlerden arındırılmış maddeler olarak ifade edilir. Birleşmiş Milletler Çevre Koruma Ajansı'na göre atık maddeler, tehlikeli ve tehlikesiz olmak üzere iki sınıfta ele alınır. Kimyevi maddeleri, ticari üretim işlemlerinden kalan yan ürünlerden elde edilen maddeleri veya ağır metalleri ve atıl durumda olup evden çıkarılan ev eşyalarını kapsayan tehlikeli atık maddeler, çevreye veya canlıların sağlığına zarar verebilme potansiyeline sahiptirler. Bununla beraber yeniden kullanım ve geri dönüştürülebilme imkanına sahip atıl durumdaki maddeler esasında tehlike arz etmeyen atık madde olarak değerlendirilebilir.

Lastik Üreticileri Birliği, atıl durumdaki lastiklerin, doğru kullanıldığında, çevresel sorunların yaşanmasına sebep olmadığını belirtmektedir. Ancak, yanlış kullanımı söz konusu olduğunda, atık lastiklerin çevre ve sağlık için tehlike oluşturabildiği de ifade edilmektedir. Bundan dolayı, atıl durumdaki lastikler, mevcut durumlarında tehlike arz etmiyor olsa da lastiklerin yakılması veya lastik yangınlarının meydana gelmesi ile yüksek miktarlarda toksik gazlar, ağır metaller ve madeni yağ açığa çıkacağı için tehlikeli atık madde kategorisinde değerlendirilebilir. Ayrıca bu lastikler sahip oldukları şekilden dolayı depolandıkları alanlarda içlerinde su tutarak birçok

kemirgen ve sineğe ev sahipliği yapabilmekte ve beraberinde sürüngenlere yuva olmaktadır. Bu durum da o bölgelerdeki hem insan sağlığını olumsuz etkileyebilmekte hem de doğal habitatı bozabilmektedir.

Dünya genelindeki atık (hurda) lastiğin büyük bir çoğunluğunu (yaklaşık %88'ini) Çin, Avrupa Birliği ülkeleri, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Hindistan üretmektedir. Avrupa Birliği ülkeleri (yaklaşık %96), Japonya (yaklaşık %91) ve Amerika Birleşik Devletleri (yaklaşık %89) ile mukayese edildiğinde kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüştürülmesi ve/veya geri kazanılması konusunda dünyadaki en gelişmiş bölgelerin başında gelmektedir (Sienkiewicz vd., 2012). Kauçuk lastiklerin, doğal bir şekilde doğada yok olmasının uzun zaman aldığı da göz önünde bulundurursak, bunların yeniden kullanımları veya geri dönüştürülmeleri yüksek derecede önem arz eden acil bir konudur (İpek vd., 2020; İpek & Mermerdaş, 2020). Çoğu ülkenin atıl durumdaki lastiklerin imhası ile ilgili politikaları, bunların toplanıp yönetilmeleri ile ilişkilidir. Bu atıl durumdaki lastikleri geri dönüştürmek için çok çeşitli geri dönüşüm veya yeniden kullanım yöntemleri geliştirilmiş ve önerilmiştir. Bu bağlamda, kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüşümü kaplama yöntemiyle, enerji geri kazanımı yoluyla, piroliz tekniğiyle, ürün ve malzeme geri dönüşümü şeklinde olmak üzere beş yöntemle yapılmaktadır (Sienkiewicz vd., 2012).

Yeniden kaplama, lastiklerin ömrünü uzatmak için kullanılan, dış ve oluklardan oluşan eskimiş dış kısmının yenisiyle değiştirilerek kaplanması işlemidir. Ancak sahip oldukları zayıf yapıdan ötürü araba lastiklerinin yaklaşık %85'i kaplama işlemine genellikle uygun bulunmazken kamyon lastikleri daha iyi bakıldıkları ve daha sağlam bir yapıya sahip olduğundan, araba lastiklerinden daha yüksek oranda bu işleme uygun bulunur. Lastiklerin bu işleme uygun bulunmaması durumunda, lastikler atıl duruma gelerek imha edilmesi gereken bir malzeme statüsüne girer ve geri dönüşümü için başka bir yöntemin kullanılması gerekir. Atık lastiklerden, yakarak kurtulmak, yüksek miktarda (kalorifik değeri kömürünkünden nispeten daha yüksek) ısı enerjisi sağladığı için bu yöntemlerden en kolay, en pratik ve en karlı olanı olarak değerlendirilir (Holka & Jarzyna, 2017). Ayrıca kıyılmış lastiklerden oluşan diğer birçok katı yakıttan daha iyi bir enerji kaynağı olan bu madde, lastikten türetilmiş yakıt (tyre derived fuel, TDF) olarak adlandırılır. Klinker üretim fırını, tüm lastik bileşenlerinin tam

yanmasını sağlayan 1200 °C'den daha yüksek bir sıcaklığa gereksinim duyduğundan ve ayrıca bu fırınlar parçalanmış lastiklerin de kullanılmasına olanak sağladığından, çimento endüstrisinde TDF yaygın bir şekilde kullanılabilir (Sienkiewicz vd., 2012). Bununla beraber çimento endüstrisinde yakıt olarak lastik kullanımı, Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi'nin 2008 yılında yayınladığı rapora göre atmosferik emisyon standartlarına hâlâ uygundur (WBCSD, 2008). Bu nedenle, bu yakıt, çimento sektöründe klinker fırınlarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, buhar kazan ve fırınlarının, kömür ile birlikte yakılmasıyla ısıl verimini

arttırdığından, termik santrallerde, kağıt ve kağıt hamuru fabrikalarında, demir-çelik fabrikalarında ve endüstriyel kazanlarda (Sienkiewicz vd., 2012) öğütülmüş kauçuk atıkları ile beraber yakıt olarak da kullanılabilir (Singh vd., 2009). Ancak atık lastiklerin yanmasıyla yüksek miktarda zehirli, tehlikeli ve kirletici gazlar açığa çıktığından dolayı atıl vaziyetteki lastiklerin yakılarak yok edilmesi birçok ülkede ya yasaklanmış ya da yasalarla sınırlandırılmıştır (Holka & Jarzyna, 2017; Siddika vd., 2019). Tablo 1'de yakıt olarak kullanılan bazı maddelerin sağladığı kalorifik enerji ve buna bağlı CO₂ emisyonları verilmiştir.

Tablo 1. Bazı yakıtların kalorifik enerji miktarı ve yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları (Singh vd., 2009)

Table 1. Calorific energy amount of some fuels and CO₂ emissions from fuels (Singh et al., 2009)

Yakıt	Enerji (GJ/ton)	Emisyonlar	
		kg.CO ₂ /ton	kg.CO ₂ /GJ
Lastikler	32.0	2270	85
Kömür	27.0	2430	90
Hayvan fosili	32.4	3240	100
Dizel yakıt	46.0	3220	70
Doğal gaz	39.0	1989	51
Ahşap	10.0	1122	110

Kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüşümü için kullanılan bir diğer yöntem de oksidatif olmayan şartlar altında yüksek sıcaklıklarda kimyasal bağları parçalayarak organik maddenin kimyasal bileşimi ve fiziksel fazını termokimyasal bozunma aracılığıyla aynı anda ve geri dönüşümsüz bir şekilde değiştiren bir işlem olan (Martinez vd., 2013) pirolizdir. Bu bağlamda, piroliz yöntemi aracılığı ile atık lastik, piroliz yağı, karbon karası ve hidrokarbon gazı gibi değerli bileşenlere dönüştürülür. Atık lastiklerin piroliz yöntemiyle geri dönüştürülmesinin ilk aşamasını, atıl durumdaki lastiklerin tüm lastik olarak temizlenip reaktörün içine yerleştirilerek parçalanması oluşturur. Reaktörün fırına yerleştirilmesinden ve oksijeninin boşaltılmasından sonra termik işlem başlar. Bileşenlere bağlı olarak birkaç saat sürebilen depolimerizasyon/gaz giderme işlemi, reaktörün çalışıp lastiklerin homojen bir şekilde ısınmasıyla başlar. Lastiğin piroliz işlemi esnasında piroliz gazını yağdan ayıran yoğuşma gerçekleşir. Sonrasında, yoğuşmamış piroliz gazı, gaz temizleyiciden kükürt giderilsin ve temizlensin diye akıtılır. Akabinde, depolanması için bir gaz tankına pompalanan bu gaz, elektrik enerjisi üretiminde kullanılır. Bu esnada enerji veya hidrojen üretimi için ya da taze karbon siyahı

yapabilmek için ısıtma yağı olarak kullanılabilir diye yoğunlaşabilir hidrokarbon süzülür. Bütün bu lastik piroliz işleminin akabinde reaktör fırından çıkarılarak, pirolize edilmiş lastiklerdeki karbon kömürü ve çelik teller ayrılıp sonra temizlenmiş karbon kömürüne öğütme işlemi uygulanır. Karbon siyahı, öğütme işleminden sonra elde edilir. Piroliz yöntemi ile tamamı geri dönüştürülmüş atık lastikten, çelik, yağ, karbon siyahı ve yüksek kalorili yanıcı gaz olmak üzere dört ürün elde edilmiş olur. Piroliz yöntemiyle atıl durumdaki lastiklerin geri dönüştürülmesinde izlenen süreçlerin tamamı, çevreye zarar vermeden ve bir kirlilik oluşturmadan gerçekleştirilir.

Kullanım ömürlerini tamamlamış lastikleri, bir başka geri dönüştürme da lastiklerin lastik türevi ürünlerin imalatında kullanılmasıdır. ABD ve Avrupa'da, lastik türevi ürünlerin üretiminde, kullanım ömrünü tamamlamış lastikleri geri dönüştüren birçok şirket bulunmaktadır. Bu bağlamda, her şirket, atıl durumdaki araç lastikleri farklı bir alanda geri dönüştürüyor olmasına rağmen, bunlar; trafik ile ilgili ürünler, kaldırımlar, kaldırım taşları, yeşil yollar, patikalar, döşeme kaplama, spor alanı yüzey kaplaması ve oyun alanı kaplama malzemesi, paspas, suni çim, erişilebilirlik rampaları, hayvan bakım ürünleri,

peyzaj ve kauçuk malç, ve dış cephe kaplama malzemesi şeklinde alt başlıklar halinde kategorize edilmektedirler.

Son olarak, kullanım ömrünü tamamlamış lastikleri, kendilerinden elde edilen kırıntı ve yonga (parça) formlarında ucuz bir dolgu malzemesi olarak geri dönüştürmek de mümkündür. Bu amaçla lastikler, farklı koşullar altında gerekli boyutlarda lastik kırıntısı veya yonga elde etmek amacıyla mekanik olarak öğütülür (Karger-Kocsis vd., 2013). Bu yöntemler kendi içlerinde uygulama biçimi ve uygulama sıcaklığına göre değişkenlik gösterirken yaygın olarak doğrama ve kriyojenik öğütme, kırıntı lastik üretiminde kullanılan iki ana yöntemdir (Karger-Kocsis vd., 2013; Shu & Huang, 2014).

Ancak tüm bu geri dönüşüm yöntemleri kendi içlerinde ya çevre dostu olmadığı için ya yüksek maliyetli olduğu için ya da sürdürülebilir bir çözüm üretmediği için, insanları, atık lastiklerin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi için alternatif yöntemler aramaya teşvik etmiştir. Bu bağlamda, çok geniş bir uygulama alanına ve büyük bir endüstri hacmine sahip olan inşaat

mühendisliği projelerinde atıl durumdaki lastiklerin belirli formlarda kullanılması bu lastiklerden kurtulmak için etkili ve çevre dostu bir yöntem olarak düşünülmektedir. Dünya genelinde üretilen hazır beton (Türkiye’de 160 milyon ton, Avrupa’da 620 milyon ton (THBB, 2020), yaklaşık olarak dünyada 4.4 milyar ton (Hilburg, 2019) – 2019 yılı için) ve asfalt yol (Türkiye’de 46 milyon ton ve 300 Avrupa’da milyon ton (EAPA, 2018), ABD’de (Epps & Johnson, 2020) 375 milyon ton – 2017 yılı için) miktarları göz önünde bulundurulduğunda, atık kauçuk lastiklerin inşaat mühendisliğinin bu iki sektöründe kullanılmasının hem çok etkili hem de oldukça doğa dostu ve yenilikçi bir yol olacağı söylenebilir (Güneyisi, 2010; Dondi vd., 2014; İpek ve Mermerdaş, 2022). Doğal rezervlerden elde edilen hammadde sınırsız değildir; bu nedenle, katı atık yönetiminin üç R’si (*Reduce-Reuse-Recycle/Azalt-Yeniden Kullan-Geri Dönüştür*) olarak da bilinen atık hiyerarşisine uymak sürdürülebilir bir yaşam yaratmak için elzemdir (Achilleos vd., 2011). Atık lastiklerin geri dönüştürülmesinden elde edilmiş kauçuk parçacıklarının, inşaat mühendisliği uygulamalarındaki kullanım alanları özetle Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. İnşaat mühendisliği uygulamalarında parçalanmış atık lastiklerin geri dönüşüm malzemesi olarak kullanımı

Table 2. Use of shredded waste tires as recycling material in civil engineering applications

Uygulama alanı	Ayrıntılar
Beton teknolojisi	Özel beton üretiminde
	Kendiliğinden yerleşen beton
	Geçirimli beton
	Hafif beton beton
	Geri dönüşümlü agrega betonu üretiminde
	Hafif beton
Geoteknik uygulamaları	Harç üretiminde
	Yapısal olmayan (bölücü) blokların üretiminde
Ulaştırma teknolojisi	Zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde
	Zemin dolgu malzemesi olarak
	Asfalt yolların kaplama performansının iyileştirilmesinde

2. Atık lastiğin stoklama işlemi ve çevresel tehditler

2. The storage of waste tire and environmental threats

2.1. Lastiğin içeriği ve üretimi

2.1. Content and production of tire

Atık lastiklerin neden çevresel tehditler oluşturduğunu daha iyi anlayabilmek ve tahayyül edebilmek için lastiklerin içeriği ve üretiminin iyi bilinmesi gerekir. Termoset polimerler sınıfında yer alan araç lastikleri, ağırlıkça %60-65’ine kadar

kauçuk, %25-35’ine kadar karbon siyahı ve kalan kısmı ise hızlandırıcılar ve dolgu maddeleri olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bazı lifli malzemelerle yapılan C_xH_y , lastikli malzemelerin bir formudur. Binek araç ve kamyon lastiğinin üretiminde doğal ve sentetik kauçuk (örneğin bütül kauçuk ve stiren-bütadien kopolimer) karışımı kullanılır. Kendine özgü elastik özelliklere sahip olan doğal kauçuk hevea ağacından elde edilirken, toplam kauçuk ağırlığının yaklaşık %58’ini oluşturan sentetik kauçuk ise genellikle petrol bazlı ürünlerden elde edilmektedir (Shulman, 2004). Bu lastiklerin

karakteristik elastomerik polimerleri, lastiklerin temel materyali olan kauçuk ile sağlanır. Böylece, bünyesinde kauçuğun bulunması sayesinde dış kuvvetlerin tesiri altındayken kalıcı olmayan deformasyon gösterebilme davranışına sahip olurlar (Martinez vd., 2013). Öte taraftan, lastiğe aşınmaya karşı mukavemet ve direnç sağlayabilmek amacıyla yarı-grafit yapıların amorf bir karbonu olan karbon siyahı kullanılır. Tüm bunlara ek olarak, lastik üretiminde yumuşak ve işlenebilir bir kıvam elde edebilmek adına bir miktar uzatıcı yağ (aromatik, naftenik ve parafinik hidrokarbonların bir karışımı) kullanılır. Bunların dışında lastiğin kalan bileşeni yaklaşık %3 inorganik dolgu ve %7 ise organik dolgu maddesidir. Lastik imalatı esnasında, markaya göre ve lastiğin kullanım amacına bağlı olarak, yüzün üzerinde bileşen kullanılabilir (Mastral vd., 2000).

Tekerleğin hayatımıza girişinin üzerinden beş bin yılı aşkın bir süre geçmiş bulunmaktadır. İnsanlığın belirli dönemlerinde belirli malzemelerden üretilen tekerleğin günümüzdeki (tekerler+lastik) formuna,

kauçuk malzemesinin 18. yy.da keşfedilmesiyle ulaşılmıştır. Kauçuk malzemesi önceleri hortum, yapışkan, silgi, ve benzeri malzeme üretiminde kullanılması maksadıyla piyasaya sürülmüştür. Bu malzeme ile ekonomik bir şekilde araç lastiği üretebilme olanağı, Charles Goodyear'ın vulkanizasyonu keşfetmesiyle oluşmuştur. Kükürt ile ısıtıldığında, yapışkan ve yumuşak bir kıvamda olan kauçuk; akabinde belirli bir sertlik ve aynı zamanda elastiklik mertebesine ulaşarak lastik üretiminin temel taşı haline gelmektedir. Araç lastikleri ilk başlarda dolgulu bir formda üretilmekteydi, belirli bir süre bu formda kullanılan lastikler pnömatik lastik olarak adlandırılan, içerisinde basınçlı hava bulunan bir forma evrilmiştir. Taşıt lastikleri bünyesindeki kauçuğun içinde; çelik tel, reçine, yağ, elyaf ve çinko oksit bulundurmaktadır. Bu bağlamda taşıt lastiği üretiminde kullanılan malzemeler Tablo 3'de sunulmakta olup, tipik bir araç lastiğine ait kesit görünüşü ve otomobil lastiği üretiminde kullanılan malzemelerin yüzde dağılımı sırasıyla Şekil 1a ve 1b'de sunulmaktadır.

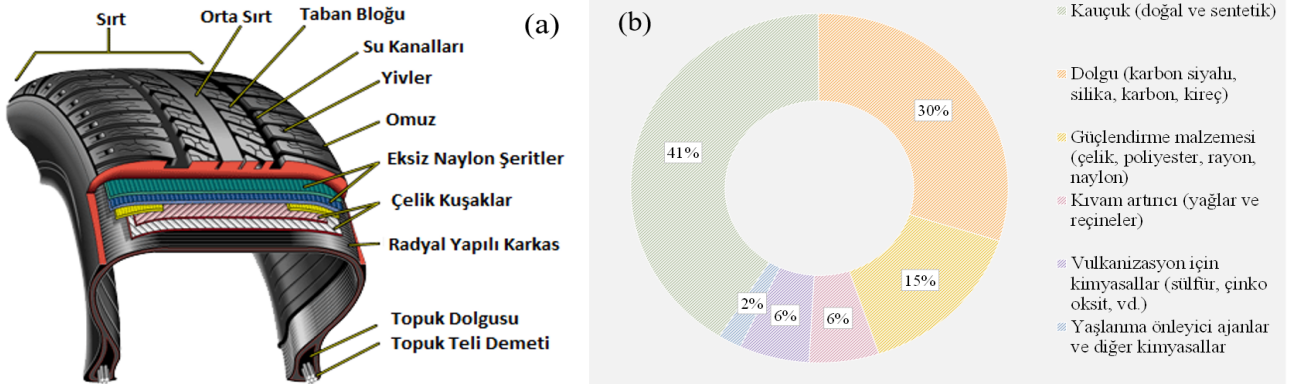
Tablo 3. Lastik üretiminde kullanılan malzemeler (Emiroğlu, 2006)

Table 3. Materials used in tire production (Emiroğlu, 2006)

Malzemeler	
1. Sentetik kauçuk	7. Kumaş: Polyester, Naylon
2. Doğal kauçuk	8. Pigmentler: Çinko oksit, Titanyum dioksit
3. Sülfür ve sülfür bileşikleri	9. Petrol mumları
4. Fenolik reçine	10. Yağ asitleri
5. Yağ: Aromatik, Naptenik, Parafinik	11. Atık malzemeler
6. Karbon siyahı	12. Çelik teller

İstanbul Sanayi Odası'nın Kauçuk Ürünleri İmalatı Sanayi raporuna göre Türkiye'de 2016 yılında 29 milyon adet üzerinde dış lastik üretimi yapılmış ve yaklaşık 21 milyon adet de ithal edilmiştir. Üretilen dış lastiklerin 18 milyon adete yakını ihraç edilmiş ve kalan da iç piyasada satılmıştır. Türkiye'de üretimi yapılan dış lastiklerin yaklaşık 20.84 milyon adeti otomobil lastikleri iken, yaklaşık 5.91 milyon adeti otobüs ve kamyon, 301 bin adeti bisiklet ve motosiklet ve 2.34 milyon

adeti de sanayi ve tarım araçları için üretilen lastiklerdir (İSO, 2018). Öte yandan Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı (PAGEV)'in 2017 yılı Türkiye Kauçuk Sektör İzleme Raporuna göre ise 2017 yılında 30 milyon adet dış lastik üretilmiş olup bunun yaklaşık 21.16 adet ise ihraç edilmiştir. Yine PAGEV'in raporuna göre 2017 yılında 20.83 milyon adet dış lastik ithal edilmiş böylece iç pazarda yaklaşık 29.68 milyon adet dış lastik satılmıştır (PAGEV, 2018).



Şekil 1. Binek lastiklerinin (a) kesitinin şematik gösterimi (Sullivan Tire, 2015) ve (b) üretiminde kullanılan materyallerin dağılımı (Continental, 2023)

Figure 1. Schematic representation of (a) section of passenger tires (Sullivan Tire, 2015) and (b) the distribution of the materials used in its manufacturing (Continental, 2023)

2.2. Atık lastiklerin depolanması ve çevresel etkileri

2.2. Storage and environmental effects of waste tires

Bir binek araç lastiğinin ağırlığı lastik genişliği, profil yüksekliği ve iniş çapına bağlı olarak yaklaşık 5 ile 20 kg arasında değişirken, kamyon/kamyonet ve otobüs lastiğinin ağırlığı ise 15 ile 100 kg arasında değişmektedir. Kullanılmış lastiklerin stok sahalarında tutulması, diğer yöntemlerin uygulanamayacağı durumlarda önerilmektedir. Günümüzde bazı ülkelerde ömrünü tamamlamış lastiklerin sahada depolanması yasaktır. AB ülkelerinde atıl durumdaki lastiklerin olduğu gibi stoklanmasına 2003 yılına kadar izin verilmekteydi. Ancak 2003 yılından sonra parçalarına ayrılması ve elenmesi işlemi yapıldıktan sonra depolanmasına müsaade edilmiştir. Ülkemizde ise 2006 yılından sonra kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin depolanması yasaklanmıştır. Bu durumu müteakip, son yıllarda atık lastiklerin geri dönüşümüyle ilgili çalışmaların sayısı günden güne artmıştır.

Katı atık kategorisinde yer alan atıl durumdaki lastikler, mevcut durumlarında tehlikeli atık olarak değerlendirilmeyebilir ancak çevreye ve canlıların sağlığına önemli mertebelerde zararlı etkilere sahip olma potansiyeli, hurda lastiklerin tehlikeli atık madde olarak ele alınması gerektiğini gösterir. Bu bağlamda, atıl durumdaki lastiklerin çevreye ve canlı yaşamına en önemli zararlı etkisi, lastik stoklarının olası yanma ve/veya yakılma durumunda ortaya çıkacaktır. Bu durumda toksik gazlar, ağır metaller ve madeni yağlar havaya, suya ve toprağa karışabilir. Her ne kadar atık lastiklerin, stok sahalarında depolanması yatırım-işletme maliyetini minimum seviyede tutarak yönetimde

kolaylık sağlıyor olsa da her zaman için potansiyel bir tehlike arz etmektedir.

Lastikler, daha önce de ifade edildiği üzere sadece kauçuktan değil nihai şeklini ve kullanım özelliklerini sağlayabilen diye çelik kayış ve tekstil kaplamaları da içermektedir. Karmaşık bir kompozit yapıya sahip olan geleneksel lastiğin geri dönüşümü, bileşenlerin ayrılmasının gerekliliğinden ötürü ciddi ve önemli bir problem teşkil etmektedir (Pehlken & Muller, 2009). Bunun yanı sıra, kullanım ömrünü arttırmak ve zorlu şartlara dayanıklı hale getirmek adına çok farklı kimyasal bileşimler ve çapraz bağlı kauçuk yapılarının oluşturulması lastikleri biyobozunmaya, fotokimyasal bozulmaya, kimyasal reaktiflere ve yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dirençli hale getirmiştir. Bu durum da atık lastiklerin geri dönüşümünü önemli bir ekonomik, teknolojik ve ekolojik zorluğa dönüştürmüştür (Sienkiewicz vd., 2012).

3. Beton için lastik agregası

3. Rubber aggregate for concrete

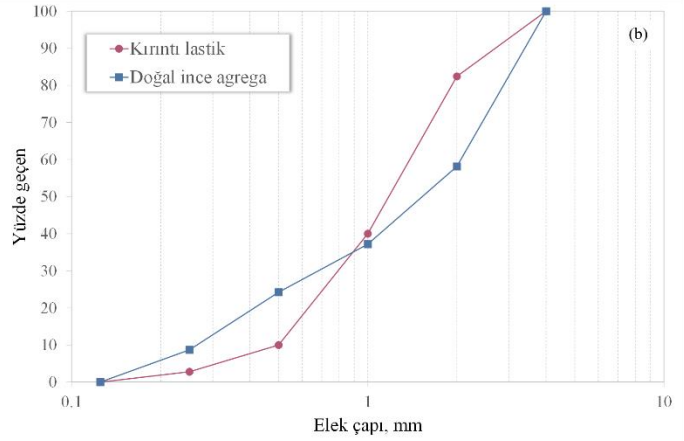
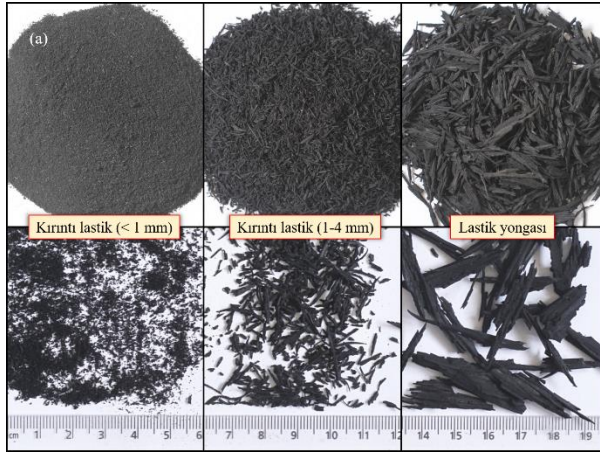
3.1. Lastik agregasının genel özellikleri

3.1. General properties of tire aggregate

Kullanım ömrünü tamamlamış lastikler, farklı kesme-öğütme işlemleri kullanılarak beton içerisinde iri veya ince agrega yerine kullanılmak üzere boyutsal açıdan uygun duruma getirilmelidir. Kullanım ömrünü çeşitli nedenlerden ötürü tamamlamış lastikler bütün şeklinde hurda lastik olarak tanımlanırken bunlar kesme makineleriyle kesildiği takdirde yırtık lastik olarak adlandırılır. Lastiklerin öğütülmesinden elde edilen parçacıklar ise boyutsal olarak lastik yongası veya kırıntı lastik olarak adlandırılıp sınıflandırılabilir. Lastik yongaları genelde boyutu 4 mm'den büyük

taneciklerden oluşurken kırıntı lastiği 4 mm'den küçük patiküllerden oluşur. Bu yüzden, genel olarak beton üretiminde lastik yongası iri agrega yerine ikame edilirken kırıntı lastik ise ince agrega yerine kullanılmaktadır.

Şekil 2a'de çalışmalarda kullanılan tipik lastik yongası ve farklı boyutlarda kırıntı lastiğine ait fotoğraflar sunulmaktadır. Ayrıca çalışmalarda kullanılan lastik agregasını, doğal agreganın sahip olduğu elek analizine uydurmak agrega gradasyonunda kararlılığı sağlamak açısından önem arz etmektedir. Ancak Şekil 2a'de gösterildiği üzere özellikle lastik yongasının tanecikleri yassı şekilli olduğu için bu tip lastik agregasında, doğal iri agreganın gradasyonuna benzer bir gradasyon elde etmek pek de mümkün



Şekil 2. (a) farklı boyutlardaki kırıntı lastik ve lastik yongasına ait fotoğraf görüntüleri ve (b) kırıntı lastik ve doğal ince agregaya ait gradasyon eğrileri (Güneyisi vd., 2016)

Figure 2. (a) photographic images of crumb rubber in different sizes and tire chips and (b) gradation curves of crumb rubber and natural fine aggregate (Güneyisi et al., 2016)

3.2. Betonun işlenebilirliğine etkisi

3.2. Its effect on the workability of concrete

Beton karışımının sahip olduğu ıslaklıktan betonun taşınabilirliği, pompalanabilirliği, yerleştirilebilirliği, segregasyonu, sıkıştırılabilirliği ve yüzeyinin perdahlanabilirliğine kadar tüm özellikler betonun işlenebilme özelliğini tanımlamakta kullanılır. Bundan dolayıdır ki betonun işlenebilirliği tek bir deney yöntemi ile tespit edilememektedir. Ancak literatürde yer alan çalışmalar tüm bu özelliklerin birbiriyle belirli oranlarda ve şartlarda ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, taze betonun işlenebilme özelliklerini ölçmede kullanılan bazı deneysel yöntemlerle diğer işlenebilme özellikleri hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir. Çökme (slump) deneyi, bütün bu yöntemler arasında hem en yaygın kullanılanı hem de en pratik olanıdır. Ayrıca aynı çökme değerine sahip betonların

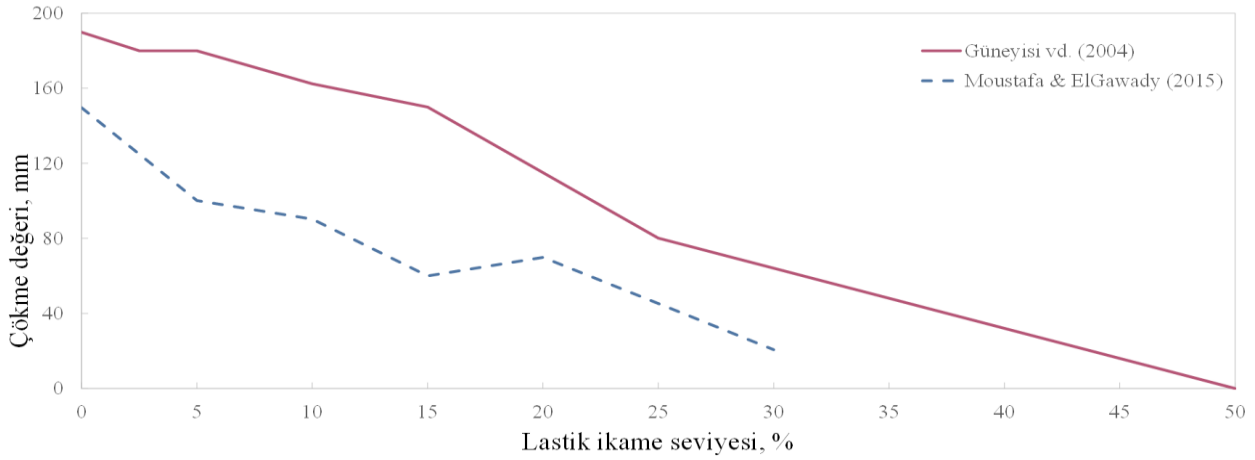
olmamaktadır. Nispeten daha yuvarlak şekilli partiküllerden oluşan kırıntı lastikte ise doğal ince agreganın gradasyonuna yakın bir gradasyon elde etmek daha olasıdır. Şekil 2b'de Güneyisi vd. (2016)'nın çalışmalarında kullandığı kırıntı lastik ve ince doğal agreganın gradasyon eğrileri sunulmaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda, genelde özgül ağırlığı 0.5 ile 1.4 arasında olan lastik agregaları kullanılmaktadır (Gesoglu vd., 2015; Güneyisi vd., 2016; Mhaya vd., 2020; Thakur vd., 2020; Al-Osta vd., 2022). Kullanılan bu lastik agregalarının su emme kapasitesi ise sifıra oldukça yakın olduğu için sıfır kabul edilmektedir. Bu agregalar hacimsel stabiliteyi sağlayabilmek için agrega ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmaktadır.

benzer ölçüde işlenebilirlik gösterdiği ve aynı amaçla kullanılabilecekleri kabul edildiği için bu deney yöntemi literatürde de, üretilen yeni tip betonların işlenebilirliği hakkında bilgi vermek için tercih edilmektedir. Bu bağlamda, lastik agrega kullanılarak üretilmiş betonların işlenebilirliğinin tespiti için yapılan çökme deneyi, lastik agrega ikamesinin betonun kıvamında azalmalara neden olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 3'te bazı araştırmacıların çalışmalarından elde edilen lastik agregası ikame seviyesine karşılık çökme değerindeki değişim gösterilmektedir (Güneyisi vd., 2004; Moustafa & ElGawady, 2015). Şekilde verilen değerler incelendiğinde lastik agregasının ikame seviyesinin artışı çökme değerinde dolayısıyla betonun işlenebilirliğinde sistematik azalmalara neden olmaktadır. Jocar vd. (2019), beton üretiminde %5, %10 ve %15 seviyelerinde kırıntı lastiği ikame etmişler ve bu seviyelerde bile çökme

değerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Alwesabi vd. (2020) ise %20 lastik agregası kullanımıyla çökme değerinde %25 azalma tespit etmişlerdir.

Bunun başlıca sebebi lastik agregası taneciklerinin betonun akışımı engelleyecek bir yapıda olması olabilir.

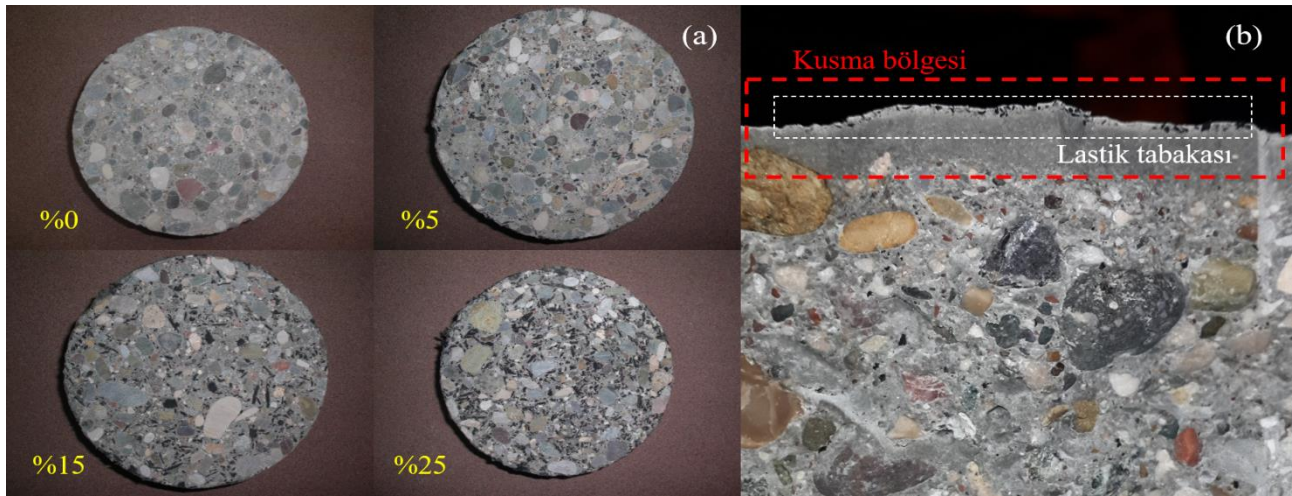


Şekil 3. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık çökme değerindeki değişim (Güneyisi vd., 2004; Moustafa & ElGawady, 2015)

Figure 3. Slump values versus tire aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Moustafa & ElGawady, 2015)

Ayrıca betondaki akma olayı homojenlik ve kohezyon ile yakından ilişkilidir, lastik agregası taneciklerinin sahip olduğu yüzey özellikleri çimento hamuruyla arasında kohesif bir yapının oluşmasına engel olduğu için betonun kıvamında bir azalış oluşmaktadır. Elde edilen veriler çerçevesinde belirli lastik agregası seviyelerden sonra betonun kıvamındaki ciddi düşüş ve buna bağlı yüksek vibrasyon süresi gereksinimi doğurduğu söylenebilir. Sahip olduğu düşük özgül ağırlıktan ötürü de uzun süreli vibrasyon uygulaması lastik taneciklerinin yukarı yönde hareketine sebep olarak betonun homojenliğini

bozmaktadır. Bu durumu çözmek adına bazı araştırmacılar bir çökme değeri belirleyerek o değeri elde etmek adına akışkanlaştırıcı miktarını değiştirmişlerdir (Güneyisi vd., 2014; Gesoğlu vd., 2015; Güneyisi vd., 2016). Şekil 4a'de iyi bir tasarıma sahip %5, %15 ve %25 agregası ikame seviyesine sahip betonlara ait kesit görüntüleri mevcuttur. Şekil 4b'de ise tasarımı iyi yapılmamış ve buna bağlı uzun süre vibrasyona maruz kalmış bir betonun üst bölgesindeki lastik agregası birikimi ve kumaya ait fotoğraf görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 4. (a) %0, %5, %15 ve %25 agregası ikame seviyesine sahip betonlara ait kesit görüntüleri ve (b) tasarımı iyi yapılmamış ve buna bağlı uzun süre vibrasyona maruz kalmış bir betonun kesit görüntüsü

Figure 4. (a) cross-sectional images of concretes with 0%, 5%, 15% and 25% aggregate replacement levels and (b) cross-sectional view of a concrete that was not well designed and exposed to vibration for a long time

3.3. Betonun birim ağırlığına etkisi

3.3. Its effect on the unit weight of concrete

Beton üretiminde doğal agrega yerine kullanılan lastik agregalar, doğal kaynakların tüketimini azaltması sağlamaktadır ayrıca sahip olduğu düşük özgül ağırlık sayesinde de betonun birim ağırlığını azaltmaktadır. [Thakur vd. \(2020\)](#) kırıntı lastiğini %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere 4 farklı ikame seviyesinde doğal ince agrega yerine kullanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre lastik agregası ikame seviyesindeki artışla birlikte betonun birim ağırlığında sistematik bir azalma olmuştur ve %20 lastik agregası kullanımında birim ağırlıkta yaklaşık %12'lik bir azalma gözlenmiştir. [Alwesabi vd. \(2020\)](#) da lastik agregasının betonun birim ağırlığını azalttığı sonucuna ulaşmış olup, çalışmalarında %20 lastik agregası ikamesinin yaklaşık %5'lik bir birim ağırlığı azalışına yol açtığını belirlemişler. [Thomas ve Gupta \(2015\)](#) ise benzer ikame seviyesindeki düşüşün %10 mertebelerinde olduğunu bildirmişlerdir. [Mustafa ve ElGawady \(2015\)](#) ise %30 lastik agregası ikamesinde %30'luk bir birim ağırlık azalması raporlamışlardır. Öte taraftan, [Uygunoğlu ve Topçu \(2010\)](#) atık lastik agregalarının, farklı su/çimento oranlarında üretilmiş kendiliğinden yerleşen harçların birim ağırlığına etkisini incelemiş olup, %50 kırıntı kauçuk ikamesi ile 1800-1900 kg/m³ seviyesinde olan kendiliğinden yerleşen harçların birim ağırlığının 1300-1600 kg/m³ seviyelerine düştüğünü rapor etmişlerdir.

3.4. Betonun reolojik davranışına etkisi

3.4. Its effect on the rheological behavior of concrete

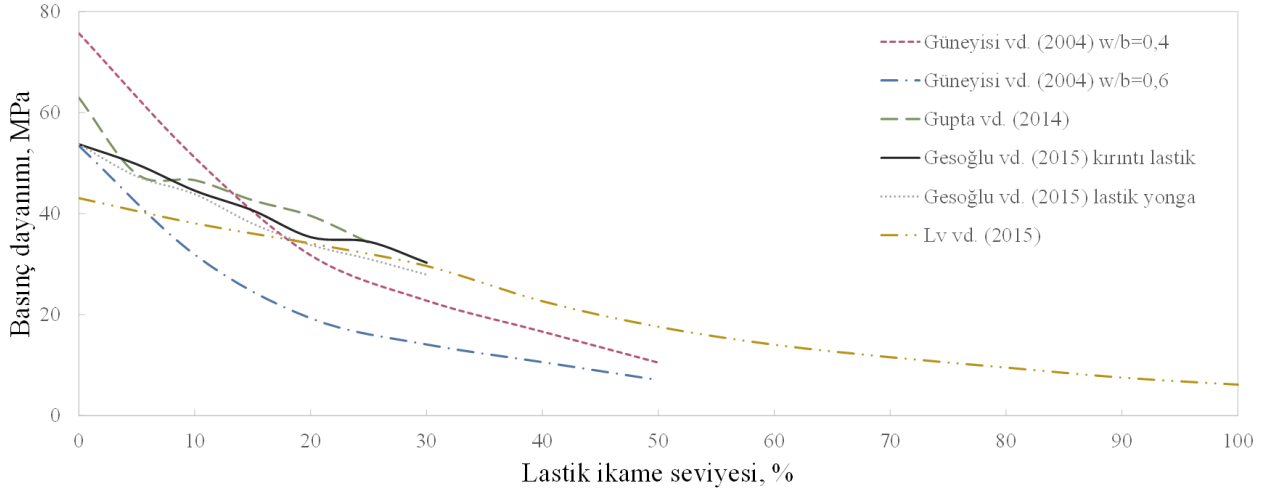
Reoloji üzerine çalışma yapan araştırmacılar tarafından reolojik davranış nezdinde incelenmesi en zor malzemelerden biri olarak tanımlanan taze beton, akışkanlığı hıza bağlı artan (tikotropik) bir malzemedir ([Tattersall & Banfill, 1983](#); [Güneyisi vd., 2016](#)). Betonun, reolojik davranışının tanımlanması onun işlenebilirliği hakkında daha fazla bilgi sağlayacağı için beton üretiminde kullanılan ilave malzemelerin reolojik davranış üzerindeki etkisi de araştırılması gereken önemli bir konudur. Bu bağlamda lastik atığının betonun reolojik davranışı üzerine etkisini konu alan çalışmalar kısıtlı olmakla beraber en kapsamlı çalışmalardan birini [Güneyisi vd. \(2016\)](#) lastik agregası ikameli kendiliğinden yerleşen betonun reolojik davranışını inceleyerek yapmıştır. Söz konusu çalışmada özel bir beton çeşidi olan kendiliğinden yerleşen betonun reolojik davranışını tanımlamak için Herschel-Bulkley ve

modifiye Bingham modelleri kullanılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonun kayma katılma davranışı sergilediği ve lastik agregasının kullanımıyla ve ikame seviyesinin arttırılmasıyla beraber daha az akışkan kıvamda bir beton elde edildiği rapor edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Herschel-Bulkley modelinde “n” katsayısı, modifiye Bingham modelinde ise “c/μ” katsayısı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Söz konusu katsayılardan “n”nin 1’den büyük olması ve “c/μ”nün de 0’dan büyük olması akışkanın kayma incelenmesi davranışı gösterdiği manasına gelmektedir. Çalışmadaki katsayılara bakıldığında “n” katsayısının 1.1 ile 1.6 arasında, “c/μ” katsayısının da 0.2 ile 1.8 arasında değiştiği görülmektedir. Kırıntı kauçuk ikameli betonların daha düşük katsayıları sahip olduğu kauçuk yongası kullanılarak üretilen betonların ise daha yüksek katsayıları sahip olduğu da çalışmada belirtilen bir diğer noktadır. Lastik ikamesiyle daha az akışkan kıvamda bir çimento esaslı kompozit elde edildiği yönünde benzer bir bulguya, [Thakare vd. \(2020\)](#) tarafından yapılan ve lastik atığı takviyeli kendiliğinden yerleşen harçların incelendiği çalışmada da ulaşılmıştır.

3.5. Betonun dayanım ve elastisite modülüne etkisi

3.5. Its effect on the strength and modulus of elasticity of concrete

Üretilen lastik takviyeli betonların, kolon, kiriş, döşeme gibi taşıyıcı elemanların üretiminde kullanılabilmesi için basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde tespit edilmiş olması gerekmektedir. Özellikle geleneksel betonda olduğu gibi basınç dayanımı betonun birçok mekanik ve durabilite özelliği hakkında bilgi vereceği için basınç dayanımının iyi bir şekilde tespit edilip değerlendirilmiş olması gerekir. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda, lastik agregasının beton üretiminde doğal agrega yerine kullanımının, betonun basınç dayanımını olumsuz bir şekilde etkilediği genel olarak bildirilen bir bulgudur. Bu olumsuz etkinin sayısal olarak ifade edilebilmesi açısından ikame seviyesine göre basınç dayanımındaki değişim Şekil 5’te sunulmaktadır. [Gesöglü vd. \(2015\)](#) ince ve iri lastik agregasının basınç dayanımı üzerine etkisini araştırmış olup %30 ikame seviyesine kadar değişimini incelemişler ve sonuç olarak iri lastik agregasının ince olandan daha fazla basınç dayanımını düşürdüğünü birlikte kullanımının ise ayrı ayrı kullanımından daha fazla olumsuz etkilediğini rapor etmişlerdir.



Şekil 5. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık basınç dayanımındaki değişim (Güneyisi vd., 2004; Gupta vd., 2014; Gesoğlu vd., 2015; Lv vd., 2015)

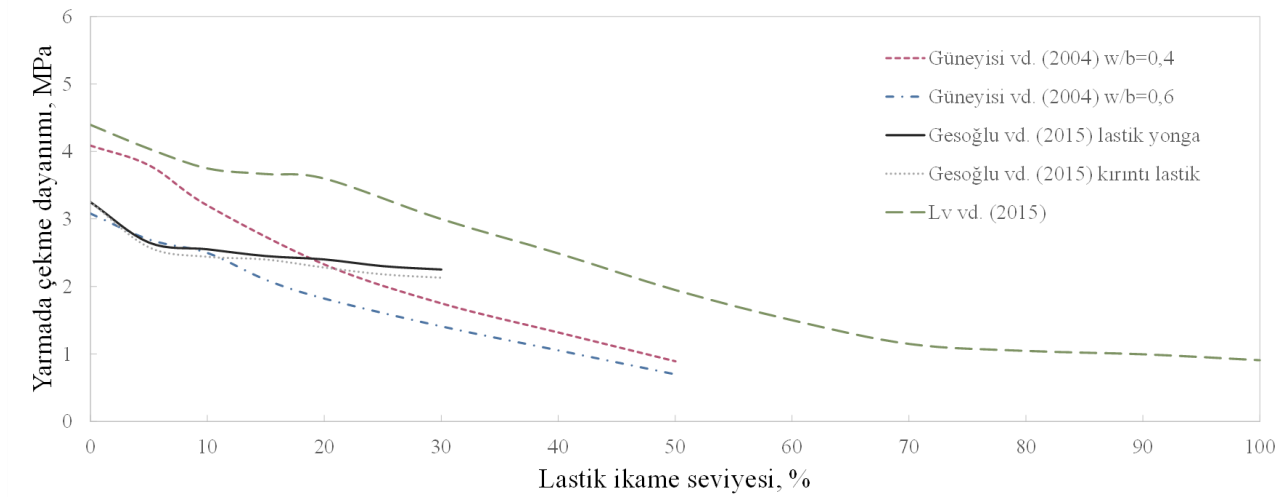
Figure 5. Variation in compressive strength with respect to tire aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Gupta et al., 2014; Gesoğlu et al., 2015; Lv et al., 2015)

Lastik agregası ikame seviyesinin ve su-bağlayıcı oranının basınç dayanımı üzerine etkisini inceleyen Güneyisi vd. (2004) ise lastik agregası miktarını arttırmanın, basınç dayanımını sistematik bir şekilde azalttığını ve %50 ikame seviyesinde her iki su-bağlayıcı oranı için (0.4 ve 0.6) basınç dayanımında %80'den fazla düşüşe neden olduğunu bildirmişler. Gupta vd. (2014) ve Lv vd. (2015) de atık lastik miktarını arttırmanın basınç dayanımında düzenli bir düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir. Bu durumun başlıca sebeplerinden biri çimento hamuru ve lastik agregası arasındaki arayüz bölgesinin doğal agregayla arasında oluşandan daha büyük olmasıdır. Lastik partikülleri ile çimento hamuru arasındaki bağ, kauçuklaştırılmış betonun mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktördür (Karakurt, 2015). Ayrıca lastik agregasının yumuşak yapısı yük tesiri altındayken normal agregası ve sertleşmiş çimento hamuruna kıyasla daha fazla gerinme performansı sergileyecektir. Bu da lastik agregasının bulunduğu yerlerde yükün büyük bir kısmının çimento hamuru veya doğal agregalar tarafından taşınacağı, lastik agregasının yük taşımaya yüksek gerinme seviyelerinde katılacağı ancak bu gerinme seviyelerinde ise çimento hamurunun çoktan çatladığı ve betonun bütünlüğünün bozulduğu anlamına gelmektedir. Bundan ötürü lastik agregası kullanımı betonun basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bundan dolayı belirli ikame seviyelerinden sonra kullanımı yapısal amaçlı beton üretimine olanak vermemektedir. Sonuç olarak betonun basınç dayanımının, lastik agregası miktarı, boyutu ve şekli gibi birçok faktörden etkilendiği söylenebilir.

Basınç dayanımında olduğu gibi genel olarak betonun hem yarmada çekme hem de eğilmede çekme dayanımı lastik agregası ikamesi ile azalmaktadır. Şekil 6'da bazı çalışmalardan elde edilen lastik agregası ikame seviyesine karşılık yarmada çekme dayanımındaki değişim verilmektedir. Gesoğlu vd. (2015), kırıntı lastiğinin yarmada çekme dayanımını lastik yongasına oranla daha fazla düşürdüğü sonucuna ulaşmışlar. Ancak iki çeşit lastik agregasında da ikame seviyesi arttıkça yarmada çekme dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Güneyisi vd. (2004) de su-bağlayıcı oranı gözetmeksizin lastik agregasının ikame seviyesinin arttırılmasıyla yarmada çekme dayanımında azalma olduğunu bildirmişlerdir. %50 lastik agregası ikame seviyesinde, yarmada çekme dayanımında %75'ten fazla düşüş rapor edilmiştir. Oysa Lv vd. (2015) benzer bir düşüş oranını %100 ikame seviyesinde gözlemlemişler. Hesami vd. (2016) ise %5, %10 ve %15 lastik agregası ikame seviyelerinde yarmada çekme dayanımında sırasıyla %2, %6 ve %14 mertebelerinde düşüş olduğunu bildirmişler. Alwesabi vd. (2020) ise doğal agregası yerine %20 lastik agregası kullanımıyla yarmada çekme dayanımında yaklaşık %25'lik bir düşüş rapor etmişler. Betonun yarmada çekme dayanımındaki bu düşüşün nedeni lastik agregasının basınç dayanımındaki azalma nedenleriyle benzerdir. Yükleme esnasında çimento hamuru ve lastik agregası arasındaki arayüz yüklemenin artmasıyla büyür ve lastik agregası sahip olduğu yumuşak yapıdan ötürü bir boşlukmuş gibi davranır. Bu da o bölgede gerilme yoğunlaşmalarına neden olup kırılmaya yol açmaktadır. Basınç ve yarmada çekme dayanımındaki azalma eğilimi eğilmede

çekme dayanımında da gözlenmiştir. Ancak lastik agregasının betonun eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkisi ile ilgili elde edilen bulgular basınç ve yarmada çekme dayanımları kadar genelleştirilebilecek bulgular değildirler. Mesela, Zaleska vd. (2019), beton üretiminde %10, %20 ve %30 seviyelerinde lastik agregasını doğal agrega yerine kullanmışlar ve eğilmede çekme dayanımında sistematik bir azalış gözlemlemişler. %30 ikame seviyesindeki dayanımdaki azalmayı da %75 olarak rapor etmişler. Benzer şekilde, Su vd. (2015) de eğilmede çekme dayanımında

%12'lik bir azalışı %20 lastik agrega ikame seviyesinde rapor etmişler. Oysa, Jokar vd. (2019) %5 lastik agregası ikame seviyesinde eğilmede çekme dayanımında %25'lik bir artış gözlemlemişken bu seviyeden sonra kontrol numunesine göre bir azalış bildirmişler. Buna benzer bir bulguyu Emiroğlu vd. (2011) de rapor etmişler. Öte yandan, Mohamad ve Adamu (2018) %10, %20 ve %30'luk ikame seviyelerinde lastik agregası kullanımının eğilmede çekme dayanımını sırasıyla %39, %9 ve %3 mertebelerinde arttırdığını rapor etmişler.

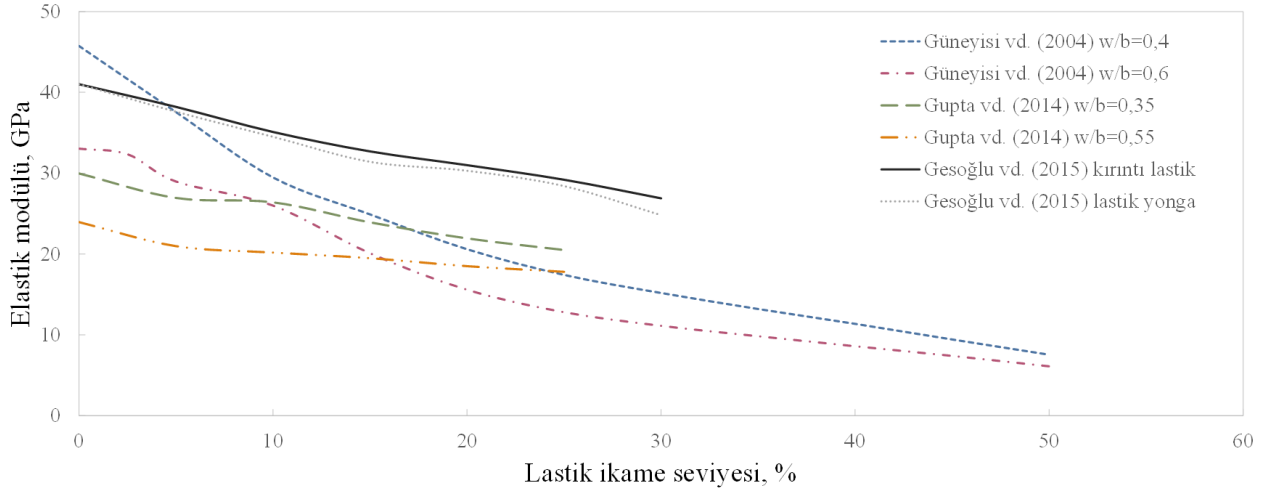


Şekil 6. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık yarmada çekme dayanımındaki değişim (Güneyisi vd., 2004; Gesoğlu vd., 2015; Lv vd., 2015)

Figure 6. Variation in splitting tensile strength with respect to tire aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Gesoğlu et al., 2015; Lv et al., 2015)

Literatürde yer alan çalışmalar, beton üretiminde lastik agregası kullanımının, betonun elastik modülünü düşürdüğünü bildirmektedir. Bu durumun asıl sebeplerinden biri lastik taneciklerinin düşük elastik modüle sahip olması ve sünek bir malzeme olmasından ötürü yüksek miktarda enerji emip dağıtabilmesidir, ayrıca lastik agregası miktarının artmasıyla beraber betonun içinde hapsedilen hava miktarının artması da bu durumun sebeplerinden olabilir (Assaggaf vd., 2021). Yapılan çalışmaların bazılarında elde edilen veriler ışığında lastik agregası ikame seviyesine bağlı elastik modülündeki değişim Şekil 7'de sunulmaktadır. Görüleceği üzere lastik ikame seviyesindeki artış betonun elastik modülünde de sistematik bir azalmaya sebep olmaktadır. Ancak bu durum olumsuz gibi algılanıyor olsa da kabul edilebilir seviyelerde olması şartıyla betona

süneklik ve esneklik de kazandırmaktadır (Topçu & Avcular, 1997). Gesoğlu vd. (2015), yaptıkları çalışmada lastik yongasının yani iri agrega yerine kullanılanın kırıntı lastikten yani ince agrega yerine kullanılanından daha fazla elastik modülü düşürdüğünü bildirmişler. Öte yandan, Güneyisi vd. (2004) ve Gupta vd. (2014) su-bağlayıcı oranı gözetmeksizin lastik agrega ikame seviyesinin artırılması betonun elastik modülünü ciddi oranlarda düşürdüğü sonucuna varmışlar. Yang vd. (2019) ise kendiliğinden yerleşen betonun elastik modülünde, %10, %20 ve %30 lastik agrega ikame seviyelerinde sırasıyla %14, %26 ve %40'lık bir azalış rapor etmişler. Jokar vd. (2019) ise bu mertebelerde azalışları normal betonda sırasıyla %5, %10 ve %15'lik lastik agrega ikame seviyelerinde gözlemlemişlerdir.



Şekil 7. Lastik agregası ikame seviyesine karşılık elastik modülündeki değişim (Güneyisi vd., 2004; Gupta vd., 2014; Gesoğlu vd., 2015)

Figure 7. Variation in elastic modulus with respect to rubber aggregate substitution level (Güneyisi et al., 2004; Gupta et al., 2014; Gesoğlu et al., 2015)

3.6. Betonun kırılma parametrelerine etkisi

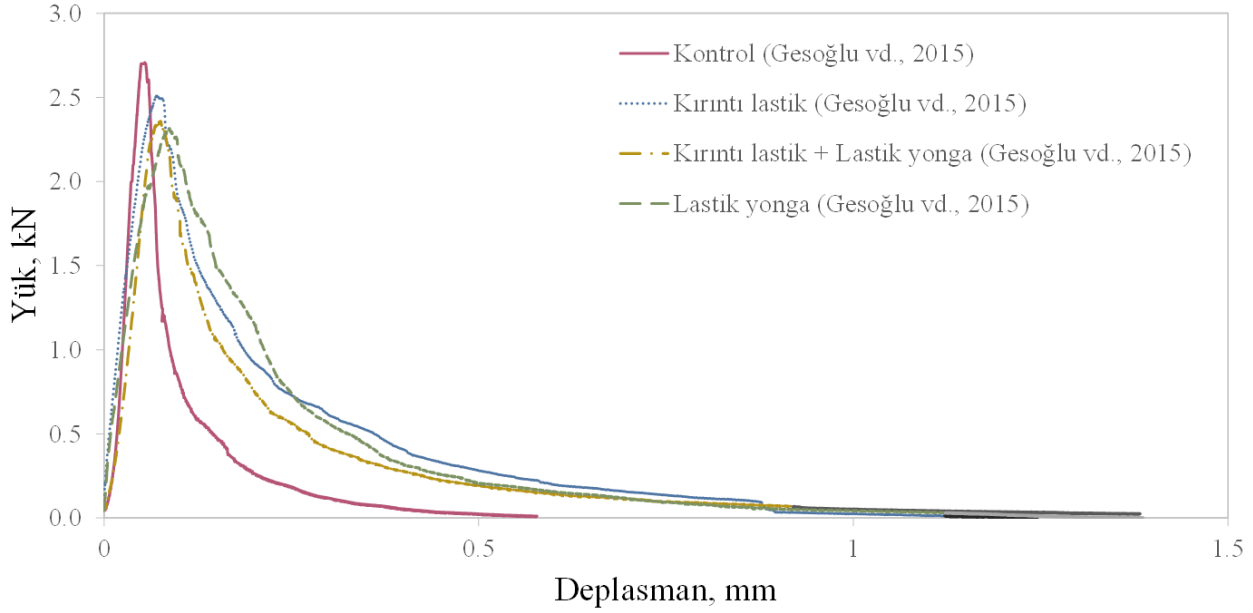
3.6. Its effect on the fracture parameters of concrete

Modern kırılma mekaniğince yarı kırılğan (quasi-brittle) olarak tanımlanan betonun enerji yutma kapasitesi ve buna bağlı kırılma mekaniği parametrelerinin tespit edilmesi son yıllarda araştırmacıların ilgi odağı olmuştur (Gesoğlu vd., 2015). Özellikle lif takviyeli betonların sergilemiş oldukları üstün enerji yutma performansı akıllara lastik agrega taneciklerinin de benzer bir etkiyi yaratıp yaratmayacağı sorusunu getirmiştir. Bu bağlamda en kapsamlı çalışmalardan birini Gesoğlu vd. (2015) gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, kırıntı lastiğin ve lastik yongasının hem ayrı ayrı hem de birlikte kullanımının 6 farklı ikame seviyesindeki etkisini incelemişler. Çalışmada, lastik agregası kullanımının betonun kırılma enerjisini %5, %10 ve %15 ikame seviyelerinde sistematik bir şekilde arttırdığını ancak %15'den sonra ise bu ikame seviyesine göre azaltmaya başladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum her üç tip kullanımda da benzer bir eğilim göstermekle beraber en iyi performans kırıntı lastik kullanımında elde edilmiştir. Yine bu çalışmada sunulan yük-deplasman grafiklerine bakıldığında (Şekil 8'de %5'lik ikame eğrileri sunulmaktadır), betonun çatlama noktası olarak adlandırılan tepe noktasında lastik agregasıyla beraber bir düşüş oluşmuştur. Bu düşüşe rağmen kırılma enerjisindeki artışın sebebi; yalın beton 0.5 mm'lik deplasman seviyelerine kadar dayanabiliyorken, lastik ikameli betonlar ise 1 mm'den fazla deplasman performansı göstererek ve çatlama

noktasından sonra yük-deplasman eğrisinde daha yumuşak bir iniş sergileyip daha yüksek enerji emme performansı göstermiş olması olabilir. Ancak Karunarathna vd. (2021), Gesoğlu vd. (2015)'nin çalıştığı lastik agregası tipinde ve boyutunda agregalarla yaptıkları çalışmada lastik yongası olarak adlandırılacak agreganın kullanımında daha yüksek kırılma enerjisi elde etmişlerdir. Gesoğlu vd. (2014), yaptıkları bir başka çalışmada geçirimli beton olarak bilinen özel bir betonun üretiminde ince kırıntı lastik ve kırıntı lastik olarak adlandırdıkları iki farklı boyutta kırıntı lastik ve lastik yongası kullanmışlar. Bu çalışmada geçirimli betonun kırılma enerjisi ile ilgili bulgularda ise kırıntı lastik ve lastik yongasının %10 seviyesine kadar kırılma enerjisini arttırdığını bu seviyeden sonra görece düşüşlerin yaşandığını ancak bu iki lastik agregasının birlikte kullanımıyla %20 ikame seviyesine kadar düzenli bir artış olduğu görülmektedir. Oysa ince kırıntı lastiği diye adlandırdıkları agrega çeşidinde ise sistematik bir düşüşün olduğu bildirilmiştir. Kırılma enerjisi gibi betonun kırılma parametrelerinden biri olarak ele alınabilecek özelliği enerji absorbe etme kapasitesi olarak da tanımlanan betonun tokluğudur (toughness). Bu bağlamda lastik agregasının beton üretiminde kullanımının bu özelliğini nasıl etkilediği araştırmacıların ilgi noktası olmuştur. Mohammed ve Adamu (2018), %10 lastik agrega içeren betonların, lastik agrega içermeyen kontrol karışımına göre daha yüksek bir enerji emme kapasitesine sahip olduğunu bildirmişler, öte yandan, %20 ve %30 ikame seviyelerinde ise %10 seviyesine oranla enerji emme kapasitesinde düşüş

gözlemlenmişler. Oysa [Jokar vd. \(2019\)](#), betonun enerji emme kapasitesindeki artışı %5'lik lastik agrega ikame seviyesinde rapor etmiş ve bu seviyeden sonra kontrol karışımına oranla %10-20'lik düşüş gözlemlenmişler. Öte yandan, [Su vd. \(2015\)](#), %20 lastik agregası ikame seviyesinde enerji emme kapasitesinde %12'lik bir azalış

bildirmişken, [Alwesabi vd. \(2020\)](#) aynı ikame seviyesinde %35'lik bir düşüş rapor etmişlerdir. [Khaloo vd. \(2008\)](#), %12.5, %25, %37.5 ve %50 ikame seviyelerinde düzenli artış bildirmişken [Medina vd. \(2017\)](#), %20, %40, %60, %80 ve %100 lastik agregası ikame seviyelerinde sistematik bir azalış rapor etmişler.



Şekil 8. Lastik agregası tipine göre betonun yük-deplasman eğrisi ([Gesoglu vd., 2015](#))

Figure 8. Load-displacement curve of concrete per rubber aggregate type ([Gesoglu et al., 2015](#))

3.7. Betonun aşınma direncine etkisi

3.7. Its effect on the wear resistance of concrete

Betonun yüzey karakteristiğinin belirlendiği aşınma direnci testi, özellikle betonun yaya trafiğinin yoğun olduğu, ağır yük taşımacılığının bulunduğu ve diğer aşındırıcı malzemelere maruz kaldığı durumlarda bilinmesi gereken bir mekanik özelliktir. Sıklıkla sürtünmeden, kaymadan, çarpmadan ve silmeden kaynaklı malzeme aşınması, kopması ve dökülmesi betonun aşınmaya karşı direnci ile ilişkilidir. Bundan ötürü üretilecek özel beton çeşitlerinin aşınma direncinin belirlenmesi de önem arz etmektedir. Genel olarak literatürde yer alan çalışmalarda lastik ikamesinin betonun aşınma direncini iyileştirdiği yönünde bir sonuç bildirilmiştir ([Kang vd., 2012](#); [Gesoglu vd., 2014](#); [Medina vd., 2017](#); [Mohammed & Adamu, 2018](#)). Bu durumun başlıca sebeplerinden biri lastik taneciklerinin sahip olduğu yumuşak dokudan ötürü sürtünme, kayma, çarpma ve silme gibi etkilere karşı aşınma direncine sahip olması olabilir. Oysa [Abdelmonem vd. \(2019\)](#), betonun aşınma direncinde, %10, %20 ve %30 lastik agrega ikame seviyelerinde %47'ye kadarlık düşüş bildirmişler. Benzer şekilde [Bisht ve Ramana \(2017\)](#), beton üretiminde %5 mertebelerinde lastik

agrega kullanımının, betonun aşınma direncini %18 mertebelerinde azalttığını rapor etmişler. Bu tarz bulgular elde eden araştırmacılar ise bu durumu çimento hamuru ve lastik agregası arasındaki düşük adezyon ile ilişkilendirmişlerdir.

3.8. Atık lastik ikameli betonların endüstriyel uygulamaları

3.8. Industrial applications of waste rubber substituted concretes

Hafif olup iyi bir ses emme kapasitesine ve uygun termal özelliklere sahip olması atık lastikleri hem hafif hem de ses ve termal özellikler nezdinde iyi bir performansa sahip yapı elemanı üretimi noktasında alternatif bir malzeme konumuna taşımaktadır. Bu bağlamda, SmartWall (akıllı duvar) olarak adlandırılan tipik betondan farklı olarak üretiminde doğal agreganın yanı sıra atık lastik agregası da kullanılan prefabrik beton duvar panel sistemler, atık lastiğin beton teknolojisinde kullanıldığı endüstriyel uygulama örnekleri arasında yer almaktadır. Bu duvar sistemler, yaklaşık 10 cm kalınlığında açılı çıkıntılı bir yüzeye sahip panellerden oluşmaktadır. Bu çıkıntılı ve açılı yüzeyler sayesinde yatay ses yansımaları azaltılarak daha iyi gürültü azaltma performansı

elde edilir. Ayrıca panellerin betonunun üretiminde renk pigmentleri kullanılarak çeşitli renklerde panellerin üretilmesi de mümkündür (Topçu & Unverdi, 2018). Öte taraftan, geleneksel betona nazaran sahip olduğu düşük mekanik özelliklerden ötürü atık lastik içeren betonlar, yapısal amaçlı olmayan uygulamalarda kullanım olanağı bulmaktadır. Bunlar arasında, en başta mukavemet beklentisi düşük olan özelliklerle temel altı, tevsiye ve dolgu yerlerinde kullanılan grobeton gelmektedir. Ayrıca kaldırımlarda kilit taşı olarak ve kaymaz rampa üretiminde yine atık lastik takviyeli betonlar kullanılmaktadır. Bu betonların bir diğer endüstriyel uygulama örneği iste kara ulaşımında özellikle araç trafiğini ayırmak için kullanılan beton bariyerlerdir (Tomosawa vd., 2005). Ayrıca atık lastik agregası kullanılarak üretilen betonların enerji dağıtma özelliğinden ötürü kurşun geçirmez beton levhaların verimini arttırmak amacıyla bu panellerin üretiminde en dış katman olarak da kullanılabilir (Sukontasukkul vd., 2013).

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Yukarıda derlenen bilgiler ışığında beton üretiminde lastik agregasının kullanımının betonun hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini etkilediği sonucuna varılabilir. Lastik agregasının hem boyutunun, şeklinin ve yüzey özelliklerinin hem de ikame oranının taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkilediği görülmektedir. Ancak lastik agregasının, bu özellikleri ne derecede etkilediği ile ilgili kesin bir bilgi vermek mümkün değildir. Bununla beraber literatürde yer alan bulgular neticesinde yine de bazı genellemeler yapılabilir. En temel seviyede yapılacak genelleme betonun işlenebilirliği ile ilgilidir; lastik agregasının kullanımıyla betonun işlenebilirliğinde azalma olduğu bütün çalışmalarda belirtilen bir etkidir. Ayrıca yine çalışmalarda basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı ile ilgili genel bir azalma eğilimi belirtilmişken, eğilmede çekme dayanımıyla ilgili kesin bir etkiden bahsedilememektedir. Yine betonun elastisite modülünün ve birim ağırlığının lastik agregası ikamesiyle beraber azaldığı ile ilgili de genel bir bulgudan bahsetmek mümkündür. Betonun kırılma enerjisi veya enerji emme kapasitesi ile ilgili de bulgular birbirleriyle örtüşmemektedir. Lastik agregası ikamesi ile bu özelliklerde sürekli bir azalıştan bahsedilebileceği gibi sürekli bir artış hatta belirli bir seviyeye kadar artış ve sonrasında da azalıştan da bahsedilebilir. Son olarak bu çalışma kapsamında lastik agregasının beton üretiminde kullanımının betonun aşınma direncini nasıl etkilediği ile ilgili de literatürdeki çalışmalar

derlenmiş olup eğilmede çekme ve kırılma parametrelerinde olduğu gibi genel bir kanıya varılamamıştır.

Tüm bunların ışığında şu sonuca varılabilir, her ne kadar literatürde zaman zaman birbiriyle tamamen örtüşmeyen bulgular söz konusu olsa da yüksek oranlarda lastik agregası ikamesinin, hem taze hem de sertleşmiş betonun bütün özelliklerini kötüleştirdiği sonucu mevcuttur. Bu yüzden bu tip bir agreganın beton üretiminde kullanımı kullanılacak lastik agregasının karakteristiği ile yakından ilişkili olduğu için kullanımdan önce detaylı bir deneysel çalışma yapılması ve bu deney sonuçlarına göre bir değerlendirme yapılması daha sağlıklı ve doğru olacaktır. Bununla birlikte lastik agregalı betonun yüksek mekanik özellik gereksinimi duyulmayan işlerde kullanılmasının bu atığın geri dönüşümünde görece olarak en güvenli ve etkili yöntem olduğu söylenebilir.

Yazar katkısı

Author contribution

Süleyman İPEK – Araştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma - orijinal taslak, Yazma - inceleme ve düzenleme. **Kasım MERMERDAŞ** – Proje yönetimi, Denetim, Doğrulama, Yazma - orijinal taslak. **Alparslan ULUSOY** - Araştırma, Kaynaklar, Yazma - orijinal taslak. **Yusuf İŞIKER** – Araştırma, Denetim, Yazma - orijinal taslak.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

References

Abdelmonem, A., El-Feky, M.S., Nasr, E.A.R., & Kohail, M. (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227, 116660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.041>

- Achilleos, C., Hadjimitsis, D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P.O., & Kallis, S. (2011). Proportioning of steel fibre reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact on environment and cost. *Sustainability*, 3, 965-983. <https://doi.org/10.3390/su3070965>
- Al-Osta, M.A., Al-Tamimi, A.S., Al-Tarbi, S.M., Al-Amoudi, O.S.B., Al-Awsh, W.A., & Saleh, T.A. (2022). Development of sustainable concrete using recycled high-density polyethylene and crumb tires: Mechanical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*, 45, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103399>
- Alwesabi, E.A.H., Bakar, B.H.A., Alshaikh, I.M.H., & Md Akil, H. (2020). Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre. *Construction and Building Materials*, 233, 117194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117194>
- Assaggaf, R.A., Ali, M.R., Al-Dulaijan, S.U., & Maslehuddin, M. (2021). Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber – A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1753-1798. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.019>
- Bisht, K. & Ramana, P.V. (2017). Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 811-817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131>
- Continental: Tyre basics passenger car tyres. (2021, 20 October). <https://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/606132/d2e4d4663a7c79ca81011ab47715e911/download-tire-basics-data.pdf>
- Dondi, G., Tataranni, P., Pettinari, M., Sangiorgi, C., Simone, A., & Vignali, V. (2014). Crumb Rubber in cold recycled bituminous mixes: comparison between traditional crumb rubber and cryogenic crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 68, 370-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.093>
- EAPA: Asphalt in figures 2017. (2021, 20 October). <https://eapa.org/eapa-asphalt-in-figures-2017/>
- Emiroğlu, M. (2006). *Atık taşı lastiğin beton içerisinde kullanımı ve betonun karakteristiklerine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Emiroğlu, M., Aydın, M., & Yıldız, S. (2011). Lastik Agregalı Betonların Yük Altındaki Gerilme Davranışlarının İncelenmesi. *International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey.
- Epps, J.A. & Johnson, D. (2021, 20 October). The advancement of asphalt pavements over the last 50 years. *The Magazine of the Asphalt Institute*. <http://asphaltmagazine.com/the-advancement-of-asphalt-pavements-over-the-last-50-years/>
- ERTMA - European Tyre & Rubber Manufacturers' Association: Tyres. (2021, 20 October). <http://www.etrma.org/tyres>
- Gesoğlu, G., Güneyisi, E., Hansu, O., İpek, S., & Asaad, D.S. (2015). Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 1113-1121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.030>
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>
- Güneyisi, E. (2010). Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash. *Materials and Structures*, 43, 1037-1048. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9564-1>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Mermerdaş, K., & İpek, S. (2014). Experimental investigation on durability performance of rubberized concrete. *Advances in Concrete Construction*, 2(3), 193-207. <http://dx.doi.org/10.12989/acc.2014.2.3.193>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Naji, N., & İpek, S. (2016). Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the Herschel-Bulkley and modified Bingham models. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 9-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.003>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., & Özturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2309-2317. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.005>
- Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R.K. (2014). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, 562-574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>

- Hesami, S., Hikouei, I.S., & Emadi, S.A.A. (2016). Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Cleaner Production*, 133, 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.079>
- Hilburg, J. (2021, 20 October). *Concrete production produces eight percent of the world's carbon dioxide emissions*. The Architects' Newspaper. <https://www.archpaper.com/2019/01/concrete-production-eight-percent-co2-emissions>
- Holka, H. & Jarzyna, T. (2017). Recycling of car tires by means of waterjet technologies. *AIP Conference Proceedings*, 1822, 020008. <https://doi.org/10.1063/1.4977682>.
- İpek, S., Diri, A., & Mermerdaş, K. (2020). Recycling the low-density polyethylene pellets in the pervious concrete production. *Journal of Materials Cycle and Waste Management*, 23, 272-287. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01127-x>.
- İpek, S. & Mermerdaş, K. (2020). Studying the impact of crumb rubber on the setting time of self-compacting mortar. *9th International Conference on Engineering & Natural Sciences*, Ankara, Turkey (pp. 210-222).
- İpek, S. & Mermerdaş, K. (2022). Atık lastik agregasının geopolimer harcın taze özellikleri üzerine etkisi. *16th MAS International European Conference on Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Mardin, Turkey (pp. 500-510).
- ISO – İstanbul Sanayi Odası. (2018). *Kauçuk ürünleri imalat sanayi: Küresel rekabette İstanbul Sanayi Odası meslek komiteleri sektör stratejileri projesi*. https://www.iso.org.tr/sites/1/upload/files/kaucuk_sanayi_raporu_web_v2-8712.pdf
- Jokar, F., Khorram, M., Karimi, G., & Hataf, N. (2019). Experimental investigation of mechanical properties of crumbed rubberconcrete containing natural zeolite. *Construction and Building Materials*, 208, 651-658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.063>
- Kang, J., Zhang, B., & Li, G. (2012). The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 27, 1144-1148. <https://doi.org/10.1007/s11595-012-0619-8>
- Karakurt, C. (2015). Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17, 422-433. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0263-9>
- Karger-Kocsis, J., Meszaros, L., & Barany, T. (2013). Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *Journal of Materials Science*, 48(1), 1-38. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6564-2>
- Karunarathna, S., Linforth, S., Kashani, A., Liu, X., & Ngo, T. (2021). Effect of recycled rubber aggregate size on fracture and other mechanical properties of structural concrete. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128230>
- Khaloo, A.R., Dehestani, M., & Rahmatatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12), 2472-2482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>
- Lv, J., Zhou, T., Du, Q., & Wu, H. (2015). Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 91, 145-149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.038>
- Martinez, J.D., Puy, N., Murillo, R., Garcia, T., Navarro, M.V., & Mastral, A.M. (2013). Waste tyre pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 179-213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>
- Mastral, A.M., Murillo, R., Calle'n, M.S., Garcia, T., & Snape, C.E. (2000). Influence of process variables on oils from tyre pyrolysis and hydrolysis in a swept fixed bed reactor. *Energy Fuel*, 14, 739-744. <https://doi.org/10.1021/ef990183e>
- Medina, N.F., Medina, D.F., Hernandez-Olivares, F., & Navacerrada, M.A. (2017). Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. *Construction and Building Materials*, 144, 563-573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>
- Mhaya, A.M., Huseien, G.F., Abidin, A.R.Z., & Ismail, M. (2020). Long-term mechanical and durable properties of waste tires rubber crumbs replaced GBFS modified concretes. *Construction and Building Materials*, 256, 119505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119505>
- Mohammed, B.S. & Adamu, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 159, 234-251.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098>
- Moustafa, A. & ElGawady, M.A. (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber, *Construction and Building Materials*, 93, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>
- PAGEV. (2018). *Türkiye kauçuk sektör izleme raporu – 2017*. <https://pagev.org/upload/files/Hammadde%20Yeni%20Tebli%C4%9F%20Bilg.%203/Kau%C3%A7uk%20Sekt%C3%B6r%20C4%B0zleme%20Raporu%202017.pdf>
- Pehlken, A. & Muller, D.H. (2009). Using information of the separation process of recycling scrap tires for process modeling. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.008>
- Shu, X. & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 67, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
- Shulman, V.L. (2004). *Tyre recycling, Rapra review reports*, 15(7). http://dl.mozh.org/up/Tyre_Recycling.pdf
- Siddika, A., Al Mamun, Md A., Alyousef, R., Amran, Y.H.M., Aslani, F., & Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 711-731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>
- Sienkiewicz, M, Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, 32, 1742-1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>
- Singh, S., Nimmo, W., Gibbs, B.M., and Williams, P.T. (2009). Waste tyre rubber as a secondary fuel for power plants. *Fuel*, 88, 2473-2480. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.026>
- Su, H., Yang, J., Ling, T.C., Ghataora, G.S., & Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.022>
- Sukontasukkul, P., Jamnam, S., Premanoch, P., Sappakittipakorn, M., and Banthia, N. (2013). Use of high content crumb rubber from wasted tire in bulletproof concrete panels. *1st International Conference in Concrete Sustainability*, Tokyo, Japan.
- Sullivan Tire: Anatomy of a tire. (2021, 20 October). <https://www.sullivantire.com/learn/tire-classroom/anatomy-of-a-tire>
- Tattersall, G.H. & Banfill, P.F.G. (1983). *The Rheology of Fresh Concrete*. London: Pitman.
- Thakare, A.A., Siddique, S., Sarode, S.N., Deewan, R., Gupta, V., Gupta, S., & Chaudhary, S. (2020). A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 262, 120745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745>
- Thakur, A., Senthil, K., Sharma, R., & Singh, A.P. (2020). Employment of crumb rubber tyre in concrete masonry bricks. *Materials Today: Proceedings*, 32(4), 553-559. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.106>
- THBB: *Dünyada sektör*. (2021, 20 October). <https://www.thbb.org/sector/dunyada-sektor/>
- Thomas, B.S. & Gupta, R.C. (2015). Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 102, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>
- Tomosawa, F., Noguchi, T., & Tamura, M. (2005). The way concrete recycling should be. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(1), 3-16. <https://doi.org/10.3151/jact.3.3>
- Topçu, İ.B. & Avcular, N. (1997). Analysis of rubberized concrete as a composite material. *Cement and Concrete Research*, 27(8), 1135-1139. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00115-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00115-4)
- Topçu, İ.B. & Unverdi, A. (2018). Scrap tires/crumb rubber. In R. Siddique, & P. Cachim (Eds), *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering (ss. 51-77). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00002-X>
- Uygunoğlu, T. & Topçu, İ.B. (2010). The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1141-1150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027>
- WBCSD: *Managing end-of-life tires*. (2021, 19 October).

<http://docs.wbcsd.org/2008/08/EndOfLifeTires-FullReport.pdf>

Yang, G., Chen, X., Guo, S., & Xuan, W. (2019). Dynamic mechanical performance of self-compacting concrete containing crumb rubber under high strain rates. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 3669-3681. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0024-3>

Zaleska, M., Pavlikova, M., Citek, D., & Pavlik, Z. (2019). Mechanical and thermal properties of light-weight concrete with incorporated waste tire rubber as coarse aggregate. *AIP Conference Proceedings*, 2170, 020026. <https://doi.org/10.1063/1.5132745>

YAZAR REHBERİ

1. KAPSAM ve GENEL BİLGİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (GUFBD), Gümüşhane Üniversitesi'nin yayın organıdır. Dergi kapsamında bütün Fen, Teknoloji, Mühendislik, Tarım ve Mimarlık Alanlarında daha önce başka yerlerde yayınlanmamış, özgün, araştırma makaleleri, derlemeler ve editöre mektuplar yayınlanır (Anket çalışmaları dergimizin konu kapsamına uygun değildir).

Dergi bilimsel ve hakemli bir dergi olup, Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında olmak üzere yılda dört kez çevrimiçi ortamda yayımlanır.

Derginin amacı araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin bilimsel yayına dönüştürülmesi, ulusal ve uluslararası indekslere girerek evrensel bilime katkı sağlamaktır.

2. YAYIN DİLİ ve ANLATIM

Dergide yayınlanacak tüm yazılar için yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir. Anahtar kelimeler alfabetik sıralamaya uygun olarak verilir. İngilizce anahtar kelimeler (Keywords) ise yine bu sıralama dikkate alınarak yazılır.

Makale içerisinde yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmalara yönelik (Deneysel çalışmalar, analizler vb) anlatımlarda üçüncü şahıs kullanılmaya özen gösterilmelidir.

3. ELEKTRONİK ORTAMDA BAŞVURU

Dergi ile ilgili tüm yazışmalarda DergiPark tarafından sağlanan arayüz kullanılmalıdır. Dergi yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış makaleler, basılı kopyaya gerek olmaksızın, Ulakbim Dergipark üzerinden <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumusfenbil/> adresi kullanılarak gönderilmelidir. Dergiye makale göndermek isteyen yazarların yazım kuralları ile birlikte "Gönderi Kontrol Listesi"ndeki her maddeyi de kontrol etmeleri gerekmektedir. Makaledeki bilgilerin doğruluğunun sorumluluğu yazar(lar)a aittir.

Yayınlanacak makalelerde, araştırma ve yayın etiğine uygunluk esastır. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" doldurulup bütün yazarlar tarafından imzalanmalıdır. Yayın ile ilgili işlemler bu formun tesliminden sonra başlar. Bu formun farklı kopyaları başka şehirlerde yaşayan yazar(lar) tarafından ayrı ayrı imzalanıp gönderilebilir. Dergi ana sayfasında yer alan "Etik İlkeler ve Yayın Politikası" yazarlar tarafından önemle dikkate alınmalıdır.

Hayvanların veya zararlı maddelerin kullanıldığı araştırmalarda "Etik Kurul İzin Belgesi"nin makaleye eklenmesi gerekir. İnsanların denek olarak kullanıldığı araştırma sonuçlarını içeren makalelerde yazar(lar), "insan denemeleri üzerinde yetkili kurul" etik standartlarına ve gözden geçirilmiş Helsinki bildirgesi 1983'e uygunluğunu belgelemeleri gerekir.

4. DEĞERLENDİRME SÜRECİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'ne iletilen yazılar öncelikle dergi baş editörünün yönlendireceği alan editörü tarafından konu başlığı ve anahtar kelimelere dayanılarak biçimsel açıdan değerlendirilir. Ön kontrol aşamasında öncelikle intihal tespit yazılımları kullanılarak benzerlik raporları oluşturulur. Aday yayının benzerlik raporu toplamda %20 den az olmalı ve tek bir kaynaktan ise %4 oranından fazla olmamalıdır. Daha sonra incelenecek yayının dergi formatına uygun olup olmadığına karar verilir. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" olmayan veya eksik olan aday yayınlar ile benzerlik oranı sınırlarını aşan aday yayınlar ön incelemeye alınmaz. Ön inceleme aşamasını geçen yazılar dergi baş editörü tarafından inceleme sürecinin gerçekleştirilmesi için ilgili alan editörüne yönlendirilir.

Alan editörü bilimsel içerik bakımından değerlendirilmek üzere aday yayını, konusuna uygun olarak en az üç hakeme yönlendirir. Hakem seçiminde öncelikle konu ile ilgili dergi yayın danışma kurulu üyelerinden ya da alanında uzman başka bir bilim insanından yararlanılır. Hakemler değerlendirmeleri sonucunda, uygun, düzeltilerek yayınlanabilir, düzeltildikten sonra tekrar görmek isterim, istediğim düzeltmelerin kontrolünü derginin uzman bilimsel ekibi tarafından yapılması uygundur veya yayınlanamaz şeklinde kararları verebilirler.

Düzeltilme istenen yazılarla ilgili olarak yazar gerekli düzeltmeleri yapar. Ayrıca katılmadığı hususlarla ilgili olarak gerekçeli yazısını dergiye gönderir.

Hakem kurulu tarafından farklı türde değerlendirilen yazılar için alan editörü kendi görüşünü de ekleyerek değerlendirmenin sonuçlandırılması için baş editöre iletir. Değerlendirmede son karar baş editöre aittir. Baş editör gerekli görürse yeni bir hakem tayin eder veya yazı ile ilgili kararını sonuçlandırır.

Tüm değerlendirmeler sonucunda kabul ya da red kararı gerekçeleri ile birlikte DergiPark üzerinden yazışmadan sorumlu yazara iletir.

Değerlendirme sonucu kabul kararı verilecek makaleler yazım ve dil editörüne yönlendirilerek ilgili makalenin yazım ve dil yönünden incelemesi ile dergi yazım kuralları açısından uygunluğu sağlanır. Kabul edilen makaleler dergi sekreteryası tarafından esasa bağlı kalınarak yayına uygun formata dönüştürülür.

Dergide yayımlanan makaleler başka hiç bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Kısmen veya tamamen yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden hiçbir yerde kullanılamaz. Dergiye gönderilen makalelerin içerikleri özgün, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Değerlendirmeye sunulacak çalışmaların bir başka dergiye gönderilmediği veya basılmadığı ön yazı ile belirtilmelidir.

Makale basım için kabul edilmezse “Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu” nun yasal bir önemi kalmaz ve hükümsüz olarak kabul edilir. Bu formun imzalanması ile yazarlar, makalenin “Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi” dergisi ve web sayfasında yayınlamasına ilaveten makalenin tamamı veya bir kısmının yasal olarak çoğaltılması ve dağıtılması hakkını Gümüşhane Üniversitesi’ne devrederek, kendi haklarından feragat etmektedirler.

5. MAKALE TÜRLERİ

Dergide yayınlanan farklı yayın formatları ile ilgili bilgiler ve yazı türlerine göre yazarların dikkat etmeleri gereken hususlar şu şekildedir:

5.1 Araştırma Makaleleri: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Amaç, Gereç ve Yöntem, Bulgular, Tartışma ve Sonuçlar, gerekli ise Etik konular, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Makale konunun uzmanları tarafından tekrarlanabilecek şekilde yeterli bilgiyi içermelidir. Bu tür makalelerde ana metin 3500-4000 kelime arası olmalı, kaynak sayısı 40’ı aşmamalıdır.

5.2 Derlemeler: Yazar(lar)ın uzmanlık alanında yapılmış eski araştırmaların derlenip eleştirel bir şekilde yorumlanıp ortaya yeni bir görüş ileri süren çalışmaları kapsmalıdır. Bu tür makale öneren yazar(lar)ın en az 10 SCI-Expanded makalesi bulunmalı ve bunların en az 5 tanesi derleme yaptığı alanda olmalıdır. Derlemeler, Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Ana Bölümler, Alt Bölümler, Sonuç, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Ana metin en fazla 5000 kelime olup kaynak sayısında bir kısıtlama yoktur. Bu tür çalışmalar literatürle ilgili geniş bir tartışma ortaya koymalı ve kaynak sayısı en az 40 olmalıdır.

5.3 Editöre Mektup: Dergide yayınlanmış makaleler hakkında veya ilgili diğer konularda soru sormak, görüş bildirmek isteyenlerin yazıları bu türde değerlendirilir. Bu tür yazılarda kapsam ve etik kavramlar göz önünde bulundurulur. Ana metin en fazla 1000 kelime olup kaynak sayısı 10’u geçmemelidir.

6. MAKALENİN HAZIRLANMASI

Dergiye değerlendirilmek üzere yayın gönderecek yazarların GUFBD makale şablonu dosyasını dikkate alarak yayınlarını hazırlamaları ve gerekli olan diğer belgelerle birlikte sisteme yüklemeleri gerekmektedir.

