

e- ISSN:2458-7575

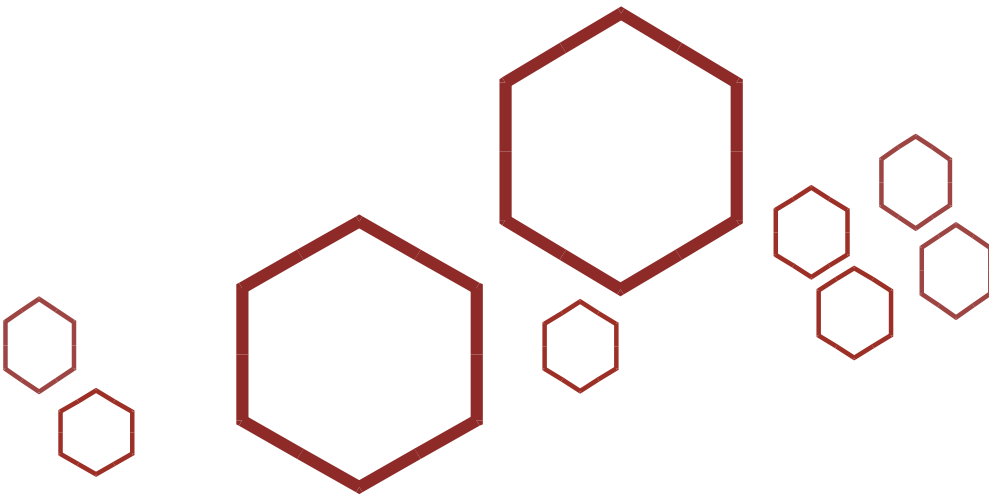
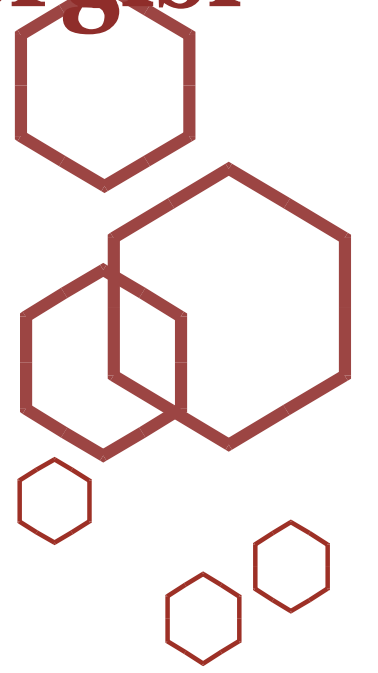
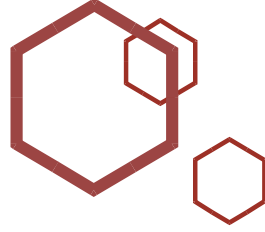


Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

Bilecik Şeyh Edebali University

Journal of Science



Sahibi / Publisher

Prof. Dr. Şükrü BEYDEMİR (Rektör / Rector)

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Murat ALANYALIOĞLU (Enstitü Müdürü / Institute Director)

Editörler / Editors

Doç. Dr. Adem SARIHAN

Doç. Dr. Serpil MENTEŞE

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Arş. Gör. Damla KILIÇ ERİKGENOĞLU

Arş. Gör. Ezgi GÜLER

Arş. Gör. Kadriye Nurdanay ÖZTÜRK

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Office Director

Bahar ALCAN

Yazım ve Dil Editörü / Spelling and Language Editor

Öğr. Gör. Dr. Ayça BAKINER ÇEKİN

Editör Kurulu / Editorial Board

Doç. Dr. Adem SARIHAN (adem.sarihan@bilecik.edu.tr)
Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Arş. Gör. Damla KILIÇ ERİKGENOĞLU (damla.kilic@bilecik.edu.tr)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Arş. Gör. Ezgi GÜLER (ezgi.guler@bilecik.edu.tr)
Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Arş. Gör. Kadriye Nurdanay ÖZTÜRK (kadriye.ozturk@bilecik.edu.tr)
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi



Sahibi / Publisher

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi adına Rektör Prof. Dr. Şükrü BEYDEMİR
Prof. Dr. Şükrü BEYDEMİR (Rector) on behalf of Bilecik Seyh Edebali University

BAŞ EDITÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Prof. Dr. Murat ALANYALIOĞLU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 11230 Bilecik, Türkiye
Bilecik Seyh Edebali University, School of Graduate Studies, 11230 Bilecik, Turkey

Telefon/Phone: +90228 2141130 **Faks /Fax:** +90228 2141132

E-posta/E-mail: murat.alanyalioglu@bilecik.edu.tr

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Office Director

Bahar ALCAN

İletişim Bilgileri / Contact Informations

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 11230 Bilecik, Türkiye
Bilecik Seyh Edebali University, School of Graduate Studies, 11230 Bilecik, Turkey

Hakemli bir dergi olan Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi yılda iki kez yayımlanır ve yayımlanan tüm eserlerin yayım hakkı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'ne aittir.

A refereed journal "Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science" is published twice a year and Bilecik Seyh Edebali University holds the copyright of all published material that appear in this journal.

Dergimiz, ULAKBİM Tr Dizin, EBSCO ve Eurasian Scientific Journal Index tarafından taranmaktadır.

Our journal is indexed by ULAKBİM Tr Dizin, EBSCO and Eurasian Scientific Journal Index.

İletişim Bilgileri/Contact Information: Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 11230 Bilecik/Türkiye / Bilecik Seyh Edebali University, School of Graduate Studies, 11230 Bilecik/Turkey. web: <http://dergipark.org.tr/pub/bsufbd>

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Prof. Dr. Abdilkadir Ceylan Çöken / Akdeniz Üniversitesi / Fen Fakültesi / Matematik Bölümü / Geometri Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Ahmet Tuncan / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Geoteknik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Aydın Ünay / Aydın Adnan Menderes Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Tarla Bitkileri Bölümü / Endüstri Bitkileri Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Bahar Bilgin Sökmen / Giresun Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Biyokimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Cem Topkaya / Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Cemal Çifci / Afyon Kocatepe Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Kimya Mühendisliği Bölümü / Temel İş ve Termodinamik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Duran Karakaş / Sivas Cumhuriyet Üniversitesi / Fen Fakültesi / Kimya Bölümü / Anorganik Kimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Emel Bayol / Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Fizikokimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan / Erciyes Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi/Endüstri Mühendisliği Bölümü / Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Faik Nejat Ekmekci / Ankara Üniversitesi / Fen Fakültesi / Matematik Bölümü / Geometri Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Gamze Barım / Adıyaman Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Fizikokimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Gülgün Kılıçgil / Ankara Üniversitesi / Eczacılık Fakültesi / Eczacılık Meslek Bilimleri Bölümü / Farmasötik Kimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hasan Küçükbay / İnönü Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Organik Kimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hüseyin Temiz / Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Malzemesi Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hüsnü Gerengi / Düzce Üniversitesi / Kaynaşlı Meslek Yüksekokulu / Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü / Polimer Teknolojisi Pr./
- Prof. Dr. İbrahim Soğukpınar / Gebze Teknik Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Donanımı Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. İlknur Akgün Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Tarla Bitkileri Bölümü / Tahıllar ve Yemeklik Baklagiller Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. İrfan Çoruh / Atatürk Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bitki Koruma Bölümü / Bitki Koruma Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. İsmail Demir / Afyon Kocatepe Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Necdet Dağdelen / Aydın Adnan Menderes Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Biyosistem Mühendisliği Bölümü / Arazi ve Su Kaynakları Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Özlem Terzi / Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Rahmiye Aydın / Bursa Uludağ Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Anorganik Kimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Ramazan Erenler / Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Kimya Bölümü / Organik Kimya Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Salih Yazıcıoğlu / Gazi Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Semra Birgün / Doğuş Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Pr. /
- Prof. Dr. Sevgi Özdemir Kart / Pamukkale Üniversitesi / Fen Fakültesi / Fizik Bölümü / Katı Fizik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Turan Karabörk / Aksaray Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Ülkü Sultan Keskin / Konya Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Ümit İncekara / Atatürk Üniversitesi / Fen Fakültesi / Biyoloji Bölümü / Zooloji Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Ünal Kurt / Amasya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik Makineleri Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Yusuf Uçar / Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü / Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ali Akpek / Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Fakültesi / Biyomedikal Mühendisliği Bölümü / Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ali Kalyon / Yalova Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı /
- Doç. Dr. Barış Erdil / Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı/

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Doç. Dr. Burak Işıkdag / Eskişehir Teknik Üniversitesi / Porsuk Meslek Yüksekokulu / İnşaat Bölümü / Yapı Denetimi Pr./
- Doç. Dr. Cem Akgüner / Ted Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Mühendislik Programları Pr. /
- Doç. Dr. Didem Erten Bilgiç / Kocaeli Üniversitesi / Mimarlık ve Tasarım Fakültesi / İç Mimarlık Bölümü / İç Mimarlık Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ebru Şebnem Yılmaz / Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Biyoloji Bölümü / Genel Biyoloji Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Eda Güneş / Necmettin Erbakan Üniversitesi / Turizm Fakültesi / Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü / Gastronomi ve Mutfak Sanatları Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Edip Avşar / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Meslek Yüksekokulu / Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü / Çevre Koruma ve Kontrol Pr./
- Doç. Dr. Elif Erzan Topçu / Bursa Uludağ Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Emine Güven / Düzce Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Biyomedikal Mühendisliği Bölümü / Biyoenformatik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ercan Köse / Tarsus Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Kontrol ve Kumanda Sistemleri Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Erdoğan Aydın / İstanbul Medeniyet Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Haberleşme Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Erol Terzi / Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Fen Fakültesi / İstatistik Bölümü / Uygulamalı İstatistik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Eyüp Atmaca / Sivas Cumhuriyet Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Çevre Mühendisliği Bölümü / Çevre Bilimleri Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Fatih Us / Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Mimarlık Fakültesi / Mimarlık Bölümü / Mimarlık Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Fehmi Bardak / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Fizik Bölümü /Atom ve Molekül Fiziği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Fırat Evirgen / Balıkesir Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Matematikğin Temelleri ve Matematikçilik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Gözde Koca / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi / İşletme Bölümü / Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Gülder Kemalbay / Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / İstatistik Bölümü / İstatistik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Hakan Öztürk / Afyon Kocatepe Üniversitesi / Afyon Meslek Yüksekokulu / Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü / Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Teknolojisi Pr./
- Doç. Dr. Hasan Hasırcı / Gazi Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. İmren Kutlu / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Tarla Bitkileri Bölümü / Tahıllar ve Yemelik Baklagiller Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. İsmail Bezirganoğlu / Erzurum Teknik Üniversitesi / Fen Fakültesi / Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü / Biyoteknoloji Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Koray Kaçan / Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi / Ortaca Meslek Yüksekokulu / Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü / Bahçe Tarımı Pr./
- Doç. Dr. Kökten Ulaş Birant / Dokuz Eylül Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Yazılımı Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Kubilay Karacif / Hitit Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Malzeme Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Mehmet Ali Hınıs / Aksaray Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Mehmet Ali Ilgın Manisa Celâl Bayar Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Mehmet Canbaz/ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Mühendislik-Mimarlık Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Yapı Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Mehmet Uğur Toprak / Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Muhammed Serdar Çavuş / Kastamonu Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi / Biyomedikal Mühendisliği Bölümü / Biyomekanik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Murat Mayda / Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı/

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Doç. Dr. Murat Özdal / Atatürk Üniversitesi / Fen Fakültesi / Biyoloji Bölümü / Genel Biyoloji Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Musa Çıbuk / Bitlis Eren Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Yazılım Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Mustafa İnci / İskenderun Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Mekatronik Mühendisliği Bölümü / Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Nehir Tokgöz / Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Orhan Kaplan Gazi Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ömer Suat Taşkın / İstanbul Üniversitesi / Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü / Kimyasal Oşinografi Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Pelin Telkoparan Akıllılar / Yüksek İhtisas Üniversitesi / Tıp Fakültesi / Temel Tıp Bilimleri Bölümü / Tıbbi Biyoloji Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Seçkin Akın / Necmettin Erbakan Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Malzeme Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Sedat Altındaş / Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi / Mimarlık Fakültesi / Mimarlık Bölümü / Yapı Bilgisi Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Sedat Sert / Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Selahattin Çelik / Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Serap Şahin Bölükbaşı / Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi / Eczacılık Fakültesi / Temel Eczacılık Bilimleri Bölümü / Biyokimya Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Serpil Uğraş / Düzce Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Biyoloji Bölümü / Moleküler Biyoloji Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Seydi Battal Gazi Karakoç / Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Şaban Hakan Atapek / Kocaeli Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Malzeme Bilimi Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Şaban Ünal / Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Enerji Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Şenol Bayraktar / Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Şeyma Tülüce Demiray / Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Matematik Bölümü / Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Tarık Gedik / Düzce Üniversitesi / Orman Fakültesi / Orman Endüstrisi Mühendisliği Bölümü / Orman Endüstrisi Makineleri ve İşletme Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Tolga Aktürk / Ordu Üniversitesi / Eğitim Fakültesi / Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü / Matematik Eğitimi Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ümmükülüm Özel Akdemir / Giresun Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Hidrolik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ünal Dömekeli / Trakya Üniversitesi / Fen Fakültesi / Fizik Bölümü / Genel Fizik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Volkan Sevinç / Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi / Fen Fakültesi / İstatistik Bölümü / Uygulamalı İstatistik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Zuhul Şimşek / Bursa Uludağ Üniversitesi / Mimarlık Fakültesi / Mimarlık Bölümü / Yapı Bilgisi Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Abdül Kadir Görür / Çankaya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Yazılım Mühendisliği Bölümü / Yazılım Mühendisliği Pr.
- Dr. Öğr. Üyesi Ali Arı/İnönü Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/Bilgisayar Donanımı Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Ali İşeri / İstanbul Rumeli Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Pr. /
- Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Yavuz / Necmettin Erbakan Üniversitesi / Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi / Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü / Matematik Eğitimi Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Bahadır Ok / Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Geoteknik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Bekir Güney / Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi / Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu / Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü / Otomotiv Teknolojisi Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Bircan Haspulat Taymaz / Konya Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Kimya Mühendisliği Bölümü / Temel İş ve Termodinamik Anabilim Dalı/

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Dr. Öğr. Üyesi Burak Dökmetaş / Kafkas Üniversitesi / Mühendislik-Mimarlık Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik Makinaları Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Burakhan Çubukçu / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Donanımı Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Elif Çiçek / Hacettepe Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Ulaştırma Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Erdal Coşkun / İstanbul Kültür Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / İnşaat Mühendisliği Pr. /
- Dr. Öğr. Üyesi Etem Köse / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi / Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu / Elektronik ve Otomasyon Bölümü / Mekatronik Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Fatih Çolak / Uşak Üniversitesi / Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu / Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü / Kaynak Teknolojisi Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Fatma Doğan Güzel / Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Biyomedikal Mühendisliği Bölümü / Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Fatma Selen Madenoğlu / Abdullah Gül Üniversitesi / Yönetim Bilimleri Fakültesi / İşletme Bölümü / Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Ferit Can Yazdıç / Munzur Üniversitesi / Pertek Sakine Genç Meslek Yüksekokulu / Veterinerlik Bölümü / Laborant ve Veteriner Sağlık Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Gökhan Özer / Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Pr. /
- Dr. Öğr. Üyesi Gür Emre Güraksın / Afyon Kocatepe Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Hayrullah Akyıldız / Dicle Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Geoteknik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Emre Engin / Avrasya Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi / İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü / İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Pr. /
- Dr. Öğr. Üyesi İpek Melahat Yurttagüler / İstanbul Üniversitesi / İktisat Fakültesi / İktisat Bölümü / İktisat Teorisi Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Kutluğ Savaşır / Dokuz Eylül Üniversitesi / Mimarlık Fakültesi / Mimarlık Bölümü / Yapı Bilgisi Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Hayrullah Akyıldız / Dicle Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Geoteknik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Melike Karaman / Atatürk Üniversitesi / Fen Fakültesi / Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü / Genetik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Miray Budak / İstanbul Medipol Üniversitesi / Sağlık Bilimleri Fakültesi / Ergoterapi Bölümü / Ergoterapi Pr. /
- Dr. Öğr. Üyesi Muhittin Bilgili Gazi Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Muhittin Turan / Bayburt Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mekanik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon Selçuk / Yıldız Teknik Üniversitesi / İnşaat Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü
- Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Coşar / Hitit Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Müge Özçevik / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi / Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi / Yazılım Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Yazılımı Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Neslihan Yıldız / İstanbul Gedik Üniversitesi / Mimarlık ve Tasarım Fakültesi / İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü / İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Pr. /
- Dr. Öğr. Üyesi Nur Atakul / Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi / Mimarlık Fakültesi / Mimarlık Bölümü / Yapı Bilgisi Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Nurcan Erbil / Ardahan Üniversitesi / Sağlık Bilimleri Fakültesi / Hemşirelik Bölümü / Hemşirelik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Düğenci Erciyes Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Yapı Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Daş / Milli Savunma Üniversitesi / Hava Astsubay Meslek Yüksekokulu / Havacılık Bilimleri Bölümü / Uçak Teknolojisi Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Özgür Dündar / Necmettin Erbakan Üniversitesi / Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi / Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü / Havacılık ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Pelin Yıldırım Taşet / İzmir Bakırçay Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
- Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Gürbüz / Iğdır Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bitki Koruma Bölümü / Fitopatoloji Anabilim Dalı/

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Dr. Öğr. Üyesi Samet Tonyalı / Gümüşhane Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Yazılım Mühendisliği Bölümü / Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Sedef Acar / Nişantaşı Üniversitesi / Sanat ve Tasarım Fakültesi / Endüstriyel Tasarım Bölümü / Endüstriyel Tasarım Pr. /
- Dr. Öğr. Üyesi Sena Kır / Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü / Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Senai Yalçınkaya / Marmara Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Tasarım ve İmalat Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Serel Akyol / Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Yapay Zeka Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Soner Şeker / Uşak Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mekanik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Uzun / Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Şenay Mihçin / İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü / Makine Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Tuba Turgut Işık / Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi / Siyasal Bilgiler Fakültesi / İktisat Bölümü / İktisat Teorisi Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Tuğçe Karaduman / Aksaray Üniversitesi / Fen-Edebiyat Fakültesi / Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü / Biyoteknoloji ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Vesile Hatun Akansel / Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü / Yapı Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Yasin Emre Kitiş / Akdeniz Üniversitesi / Ziraat Fakültesi / Bitki Koruma Bölümü / Fitopatoloji Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Yenal Arslan / Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi / Yazılım Mühendisliği Bölümü / Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Zafer Albayrak / Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Aydoğan / Atatürk Üniversitesi / Narman Meslek Yüksekokulu / Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü / Tıbbi Dokümantasyon ve Sekreterlik Pr./
- Dr. Fatih Orhan / Sağlık Bilimleri Üniversitesi / Gülhane Sağlık Meslek Yüksekokulu / Yönetim ve Organizasyon Bölümü / Sağlık Kurumları İşletmeciliği Pr. /
- Dr. Kadir Cihan Tekin / Dokuz Eylül Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Üretim Metalurjisi Anabilim Dalı/
- Dr. Yusuf Alptekin Türkkan / Bursa Uludağ Üniversitesi / Orhangazi Meslek Yüksekokulu / Elektronik ve Otomasyon Bölümü/Elektronik Teknolojisi Pr./

İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Metin Sınıflandırma için Öznitelik Ağırlıklandırma Metotlarının Lokal Öznitelik Seçim Metotları Üzerindeki Rolü <i>Bekir Parlak</i>	672-682
<i>Rumex acetosella</i> L. (Kuzukulağı)'nın <i>In vitro</i> Antiradikal, Antimikrobiyal, Antikanser ve Fitokimyasal Özellikleri <i>Fatma Keser, Mustafa Karatepe, Serhat Keser, Suat Tekin, İsmail Türkoğlu, Ömer Kaygılı, Ersin Demir, Ökkeş Yılmaz, Süleyman Sandal, Sevda Kırbağ</i>	683-692
Türkiye Kısa Dönem Elektrik Yük Talep Tahmininde Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması <i>Kübra Kaysal, Emre Akarşlan, Fatih Onur Hocaoğlu</i>	693-702
Farklı Bekletme Süreli Derin Kriyojenik İşlemin Sementasyon Çeliğinin Korozyon Davranışına Etkisinin Araştırılması <i>Furkan Güney, Menderes Kam, Hüsnü Gerengi, Ertuğrul Kaya, Mesut Yıldız</i>	703-712
The Effect of Nisin and Chloramphenicol Combination on <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538 Biofilm Structure <i>Umut Çağrı Koçak, Elif Arslan, Şeymanur Çobanoğlu, Kürşad Coşkun, Ayşenur Yazıcı, Serkan Örtücü</i>	713-720
Canal Surfaces Through a Null Quaternionic Spine Curve <i>Gül Tuğ</i>	721-729
Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR Yöntemleriyle Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçimi <i>Bahar Arslan, Özgür Eski</i>	730-751
Solution of Workforce Planning Problem of a Holding Enterprises with the Markov Chains Method <i>Medine Nur Türkoğlu Elitaş, Muhammed Kır</i>	752-760
Hastanelerde Yangınla Mücadelede Acil Durum Yönetimine İlişkin Kritik Başarı Faktörlerinin Belirlenmesi <i>Samet Tosun, İbrahim Yılmaz</i>	761-770
Atık Porselen Karonun (APK) Kil Zeminlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi <i>Semiha Poyraz, Nazile Ural</i>	771-782
Benzimidazol-Tiyadiazol Türevlerinin Sentezi, Karakterizasyonu, Antioksidan ve Antikanser Çalışmaları <i>Hayrani Eren Bostancı, Ulviye Acar Çevik</i>	783-790
CW724R Pirinç Malzemenin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörlerin Deneysel Optimizasyonu <i>Damla Çakmak, Birol Akyüz</i>	791-798
Görece Narin Betonarme Perde Duvarlarda Mevcut Beton Malzeme Modellerinin Etkilerinin İrdelenmesi <i>Emrah Kılıç, Muhammet Fethi Güllü</i>	799-818
Polimerik Membranlarda Zeolit Kullanımının Pervaporasyon Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi <i>Suat Kahya</i>	819-828
İkinci Ürün Silajlık Mısır Çeşitlerinde Ekonomik Analiz ve Sulama Suyu Kullanım Etkinliğinin Belirlenmesi <i>Murat Karaer, Yusuf Murat Kardeş, Erdem Gülümser, Hüseyin Teyfik Gültaş, Hanife Mut</i>	829-836

Kutu Kesitli Birleşimlerde Ek Levhası Şeklinin Moment Taşıma Kapasitesine Etkisi <i>Mustafa Sivri</i>	837-846
Momentler Metodu ile Parametre Tahmini Üzerine <i>Yunus Bulut, Ahmet Demiralp</i>	847-854
Ni Nano Telinin Deformasyon Davranışına İkiz Sınır Aralığının Etkisi: Moleküler Dinamik Çalışması <i>Sefa Kazanç</i>	855-865
Design, Synthesis, and Biological Evaluation of Curcumin-β-sitosterol Conjugate a Potential Candidate for Breast Cancer Therapy <i>Sevinç İlkar Erdağı</i>	866-880
Ulusal Demiryolu Mirasının Korunması: Konya Tarihi Gar Kompleksi Model Önerisi <i>Emine Yavuz Pakih, Esin Sarıman Özen</i>	881-900
Tank Akışkan Seviye Sisteminin Kontrolü İçin Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı ve İleri Besleme + PI Kontrolcü Karşılaştırılması <i>Sadrettin Gölcügezli, Ahmet Dumlu</i>	901-917
Tuğla, Kiremit ve Mermer Atığı Tozları ile Üretilen Jeopolimer Harçların Özellikleri <i>Mehmet Uğur Toprak, Ahmet Ferdi Şenol, Nazım Çağatay Demiral, Cenk Karakurt</i>	918-930
Traveling Wave Solutions of the Oskolkov Equation Arising in Incompressible Viscoelastic Kelvin–Voigt Fluid <i>Hülya Durur</i>	931-938
%3,5 NaCl Ortamında C95200 ve C95300 Alüminyum Bronzlarının Korozyon Davranışları <i>Meriç Metin, Mehmet Ünal, Halil Ahmet Gören</i>	939-966
Toz Metalürjisi Yöntemi ile Üretilen 316L Östenitik Paslanmaz Çeliğin Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi <i>Muhammed Elitaş, Mehmet Akif Erden</i>	947-952
SQAM Kullanan Bina-içi Enerji Hattı İletişim Sistemleri Üzerine Bir Analiz <i>Ömer Faruk Akdemir, Mehmet Bilim</i>	953-960
Sentetik Polimerlerin Flokülasyonda Verimliliğini Etkileyen Faktörler <i>Noyan Akray, Tayfun Şengül</i>	961-971
Tonoz Tipi Çelik Izgara Kabuk Sistemlerde Modüler Değişimlerin Yapı Davranışına Etkisi <i>İlyas Devran Çelik, Taha Koç</i>	972-989
Rüzgâr Hızlarında Uzun Hafıza: Amasra Bölgesi için Bir Zaman Serisi Analizi <i>Serpil Türkyılmaz</i>	990-1005
Process Mining Methodology for Digital Processes under Smart Campus Concept <i>Onur Doğan, Esra Cengiz Tirpan</i>	1006-1018
Aktif Tabakaya Ag Nanopartikül Katkısının Organik Güneş Hücrelerinin Fotovoltaik Verimine Etkisi <i>Semih Yurtdaş, Muhittin Ünal, Cem Tozlu</i>	1019-1025
The Efficacy Investigation for Some Markers Detecting Yellow Rust Resistance Genes in Bread Wheat Varieties <i>Gülçin Akgören Palabıyık, İsmail Poyraz</i>	1026-1034

Insecticidal Activity of Prodigiosin Pigment on <i>Tenebrio molitor</i> (Coleoptera: Tenebrionidae) <i>Ardahan Eski, Tayyibe Özdemir</i>	1035-1040
Ses Emisyonu Yarık Boyutlarının Hafif Agregalı Kâgir Blokların Ses Yutum Özelliklerine Etkisi <i>Lütfullah Gündüz, Şevket Onur Kalkan</i>	1041-1055
Evidence Based Design in Healthcare Facilities <i>Eda Selçuk</i>	1056-1076
Tedarikçi Seçiminde Dematel ve Aksiyomatik Tasarım Tekniği Uygulaması <i>Şule Emmi, Ezgi Güler, Selen Avcı, Zerrin Aladağ</i>	1077-1093
İki Buharlaştırıcı Kritik Nokta Üstü CO₂ Soğutma Çevriminde İç Isı Değiştiricisi Kullanımının Gaz Soğutucusu ve Buharlaştırıcıların Boyutlarına Etkisi <i>Mehmet Tahir Erdiñç, Muhammet Nasıf Kuru</i>	1094-1109
2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik Asitin Korozyona Karşı İnhibisyon Etkisinin İncelenmesi <i>Mehmet Erman Mert</i>	1110-1121

Derleme Makaleleri / Review Articles

Düzenli Depolama Alanlarından Sızıntı Suyunun Mikrodalga Işınlama ile Arıtılmasına Genel Bakış <i>Ali Alhrishawi, Şükrü Aslan</i>	1122-1149
A Review on Machine Learning Techniques Used in VANET and FANET Networks <i>Sumeyra Muti, Eyüp Emre Ülkü</i>	1150-1165
Sürdürülebilir Beslenme Kapsamında Yenilebilir Böcekler <i>Selen Seyhan, Emine Nakilcioğlu</i>	1166-1178
Biyomalzeme Türleri ve Biyoyumlu Metalik Elementler <i>Esra Balci, Fethi Dağdelen</i>	1179-1195

Araştırma Makalesi - Research Article

Metin Sınıflandırma için Öznitelik Ağırlıklandırma Metotlarının Lokal Öznitelik Seçim Metotları Üzerindeki Rolü

The Role of Feature Weighting Methods on Local Feature Selection Methods for Text Classification

Bekir Parlak^{1*}

Geliş / Received: 10/09/2021

Revize / Revised: 11/05/2022

Kabul / Accepted: 15/08/2022

ÖZ

İnternet teknolojilerinin gelişimiyle birlikte metinsel verilerde ciddi bir artış yaşanmıştır. Bu metinsel verilerin anlamlı hale gelebilmesi için otomatik metin sınıflandırma yaklaşımları önemli hale gelmiştir. Otomatik metin sınıflandırma yaklaşımlarında öznitelik seçimi ve öznitelik ağırlıklandırma önemli bir yer tutar. Bu çalışmada, öznitelik ağırlıklandırma metotlarının lokal öznitelik seçim metotları üzerindeki etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada iki farklı ağırlıklandırma metodu, üç farklı lokal öznitelik seçim metodu, üç farklı kriter veri kümesi ve iki sınıflandırıcı kullanılmıştır. En yüksek Mikro-F1 ve Makro-F1 skoru, Reuters-21578 veri kümesi için 92.88 ve 65.55, 20Newsgroup veri kümesi için 99.02 ve 98.15, Enron1 veri kümesi için 97.19 ve 93.40'tır. Deneysel sonuçlar, OddsRatio (OR) öznitelik seçim metodu, Terim Frekansı (TF) öznitelik ağırlıklandırma ve Destek Vektör Makinesi (DVM) sınıflandırıcı kombinasyonu ile daha iyi sonucun elde edildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler- Metin Sınıflandırma, Öznitelik Seçimi, Öznitelik Ağırlıklandırma

ABSTRACT

With the development of internet technologies, there has been a significant increase in textual data. Automatic text classification approaches have become important in order for these textual data to become meaningful. Feature selection and feature weighting have an important place in automatic text classification approaches. In this study, the effect of feature weighting methods on local feature selection methods is examined in detail. Two different weighting methods, three different local feature selection methods, three different criteria datasets, and two classifiers were used in the study. The highest Micro-F1 and Macro-F1 scores were 92.88 and 65.55 for the Reuters-21578 dataset, 99.02 and 98.15 for the 20Newsgroup dataset, and 97.19 and 93.40 for the Enron1 dataset. Experimental results show that better results are obtained with the combination of Odds Ratio (OR) feature selection method, Term Frequency (TF) feature weighting and Support Vector Machine (SVM) classifier.

Keywords- Text Classification, Feature Selection, Feature Weighting

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: bekir.parlak@amasya.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8919-6481>)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Amasya Üniversitesi, Yeşilirmak Yerleşkesi, Amasya, Türkiye

I. GİRİŞ

İnternet erişiminin artmasıyla birlikte, metinsel veriler her alanda ciddi artış göstermiştir. Bu metinsel verilerin daha anlamlı hale gelebilmesi için bu verilerin organizasyonu da önemli hale gelmiştir. Metin sınıflandırma (MS) metinsel verilerin içeriklerine göre önceden tanımlanmış sınıflara atanmasında önemli bir rol oynar [1]. MS birkaç adımdan oluşmaktadır. Bunlar önışleme, öznitelik çıkartma, öznitelik seçimi, öznitelik ağırlıklandırma ve sınıflandırma işlemleridir. Önışleme adımları [2], metin dokümanlarını daha kompakt ve uygulanabilir hale getirmek için kullanılır. Önışleme adımında dizgelere ayırma, gereksiz kelimelerin atılması, küçük harf dönüşümü, kök bulma gibi teknikler uygulanmaktadır. Daha sonra önışlemeden geçirilen kelimeler öznitelik çıkartma aşamasında kelime-çantası tekniği ile sayısal hale dönüştürülür. Ancak küçük veri kümelerinde bile yüzbinlerce öznitelik bulunabilir. Bu özniteliklerin tamamını kullanmak hem performansı hem de işlem zamanını arttıracaktır. Bu yüzden kelime-çantasındaki bazı önemli özniteliklerin seçilmesi sınıflandırma performansı açısından oldukça önemlidir. Öznitelik seçiminin yanında bu seçilen özniteliklere atanan ağırlık değerleri de sınıflandırma performansını ciddi oranda etkilemektedir.

Öznitelik seçimi, kuşkusuz MS çalışmalarının en önemli aşamalarından bir tanesidir. Seçilen öznitelikler vektör uzay modelinde gösterilirken her dokümanda bulunduğu frekansa göre bir ağırlık atanır. Bu işlem öznitelik ağırlıklandırma olarak adlandırılır. Öznitelik ağırlıklandırma da öznitelik seçimine benzer şekilde sınıflandırma performansına etki etmektedir. Son aşama olarak sınıflandırma, ana bileşenlerden bir tanesidir. Bu aşamada, önceden tanımlanan dokümanlardan öğrenme fonksiyonu uygular ve sınıf etiketleri bilinmeyen dokümanları sınıflandırmak için kullanılır.

Metinsel verilerde öznitelik seçimi çoğunlukla, tüm özniteliklerin önemlerini tahmin eden bir ölçü ile değerlendirildiği ve ardından en yüksek puanlara sahip ilk N özniteliklerin seçildiği öznitelik sıralamalarına dayanır [3]. Öznitelik seçme yöntemleri lokal ve global olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Lokal politikada her sınıf farklı bir öznitelik kümesi ile temsil edilirken, global politikada öznitelik kümesi global olarak oluşturulur ve tüm sınıflar için aynıdır.

Yerel öznitelik seçim yöntemleri söz konusu olduğunda, birden fazla lokal skoru küresel bir skora dönüştürmek için bir küreselleştirme tekniği gerekir. Bu teknikler TOPLAM, AĞIRLIKLI TOPLAM, MAKSİMUM literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [3]. Öte yandan, global öznitelik seçim yöntemleri söz konusu olduğunda, skorlar doğrudan öznitelik sıralaması için kullanılabilir. Öznitelikler azalan düzende sıralanır ve ilk N öznitelikleri, öznitelik alt kümesine dahil edilir. N genellikle deneysel olarak belirlenmiş bir sayıdır. Metin sınıflandırması için global öznitelik seçim yöntemlerinin örnekleri DF (Document Frequency), IG (Information Gain), GI (Gini Index), DFS (Distinguishing Feature Selector) iken, yerel öznitelik seçim yöntemlerinin örnekleri ise MI (Mutual Information), OR (Odds Ratio), CHI2 (Chi-Square)'dir [4].

Eğitim dokümanlarında çok ciddi sayıda öznitelik açığa çıkmaktadır. Ayrıca bu özniteliklerden bazıları önemsiz olabilmektedir. Bundan dolayı, eğitim dokümanlarından çıkartılan özniteliklerden optimum sayıda öznitelik seçmek için öznitelik seçim algoritmaları çok önemlidir. Öznitelik ağırlıklandırma metotları, MS çalışmalarında bir takım avantajlar sağlamaktadır [1]. Her öznitelik bulunduğu dokümanlarda eşit sayıda bulunmamaktadır. Bu yüzden her öznitelige bulunduğu dokümanlara göre farklı ağırlık değerleri atanır.

Literatürde birçok lokal öznitelik seçim çalışmaları ile ilgili çalışmalar olsa da, metin sınıflandırması için öznitelik seçimi halen devam eden bir araştırma konusudur [5]. Ancak lokal öznitelik seçim yöntemleri üzerinde öznitelik ağırlıklandırma tekniklerinin etkisi konusunda literatürde çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, metin sınıflandırma alanında temel olarak kullanılan Terim Frekansı (TF) ve Terim Frekansı-Ters Doküman Frekansı (TF-IDF) tekniklerinin üç farklı lokal öznitelik seçim metotları üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca çalışmanın etkinliğini arttırmak için farklı öznitelik boyutları, farklı sınıflandırıcılar ve farklı başarı kriterleri ile farklı veri kümeleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara bakıldığında, TF tekniği rekabetçi bir performans göstermiştir.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Literatürde lokal ve global öznitelik seçim teknikleri ve terim ağırlıklandırma ile ilgili yapılan çalışmalar Bölüm 2'de kısaca açıklanmıştır. Bölüm 3, bu çalışmadaki deneysel aşamaları açıklamaktadır. Son olarak, Bölüm 4'te bazı açıklamalar sunulmuştur.

II. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Öznitelik seçimi ve ağırlıklandırma, çok sayıda öznitelik içeren veri kümelerinin yaygın olduğu sınıflandırma görevlerinde önemli bir adımdır. Metin sınıflandırmaya odaklanan çok sayıda öznitelik seçim ve ağırlıklandırma çalışması vardır [1-3]. Metin veri kümeleri binlerce öznitelik içerdiğinden, metin sınıflandırma performansını düşürmektedir. Bu nedenle literatürde önerilen birçok öznitelik seçim yöntemi ve öznitelik ağırlıklandırma çalışmaları mevcuttur [1,3-6].

Metin sınıflandırma çalışmalarında sınıflandırma aşamaları kadar öznitelik seçimi de önemli bir konudur. Literatürde araştırmacılar tarafından tasarlanan öznitelik seçim yöntemlerini değerlendiren birçok çalışma bulunmaktadır. Öznitelik seçim yöntemleri, öznitelikleri değerlendirmek için lokal ve global olmak üzere ikiye ayrılır. Lokal politikada, bir öznitelik sınıf bazında değerlendirilir, daha sonra toplam, ağırlıklı toplam ve maksimum olan globalleştirme teknikleri ile nihai skor hesaplanır [3]. Ancak, bir özniteliğin skoru, global politikada global olarak hesaplanır. Global yöntemlerde özniteliklere tek bir skor atanır. Bu alanda araştırmacılar tarafından öznitelik seçme yöntemlerini ve globalleştirme politikalarını değerlendirmeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır [1,2]. Ancak bu çalışmaların bulgularını genellemek oldukça zordur. Çünkü veri kümeleri, ön işleme, öznitelik ağırlıklandırma yöntemleri, globalleştirme politikası gibi deneysel ayarların çeşitliliği çok farklıdır.

Forman [7] lokal politikayı dikkate alarak öznitelik seçim yöntemleri hakkında kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Deneylerde dengeli ve dengesiz birçok veri kümesi kullanılmıştır. Ayrıca sınıflandırma algoritması olarak SVM kullanılmıştır. Debole ve Sebastiani [8], öznitelik seçim politikalarını değerlendirdi. Öznitelik seçim skorlarını kullanan yeni bir öznitelik ağırlıklandırma şemasına odaklansalar da, globalleştirme politikaları hakkında ayrıntılı bilgi vermezler. Özgür ve arkadaşları [9], sınıflandırma algoritması olarak SVM kullanarak lokal ve global teknikleri karşılaştıran bir çalışma yaptılar. Ayrıca lokal ve global teknikler sırasıyla sınıf tabanlı ve derlem tabanlı anahtar kelime seçimi olarak adlandırılır. Taşçı ve Güngör [10], metin sınıflandırmada güncel öznitelik seçme yöntemlerini kullanarak öznitelik seçim politikalarını karşılaştırdılar. Deneylerde farklı özelliklere sahip veri kümelerini kullanmışlardır. Politikaların değerlendirilmesinin yanı sıra yeni öznitelik seçim yöntemleri önerdiler. Uysal [4], metin sınıflandırma alanı için geliştirilmiş bir global öznitelik seçim şeması (IGFSS) önerdi. IGFSS, global ve tek taraflı lokal öznitelik seçim yöntemini birleştiren bir topluluk yöntemidir. Öznitelik alt kümesi, bu yöntemleri birleştirerek sınıfları neredeyse eşit olarak temsil eder. IGFSS, öznitelik seçim yöntemlerinin tekli performansından daha başarılıdır. Daha sonraki bir çalışmada, Uysal [11], metin sınıflandırma için filtre tabanlı lokal öznitelik seçme yöntemleri ile öznitelik dönüştürme ve sarmalayıcı tabanlı öznitelik seçme yöntemlerinin birleştirilmesiyle oluşturulan iki aşamalı öznitelik seçim yöntemlerini kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Öncelikle bazı lokal öznitelik seçim yöntemleri ve üç adet öznitelik alt küme oluşturma yöntemi kullanılmıştır. İkinci olarak, temel bileşen analizi (PCA), gizli anlamsal indeksleme (LSI) veya genetik algoritmalar kullanılmıştır. Micro-F1 ve Macro-F1 ölçüleri kullanılarak Reuters ve Ohsumed olmak üzere iki genel veri kümesi üzerinde lineer bir SVM sınıflandırıcı ile farklı ayarlar yapılmıştır. Parlak ve Uysal [3], farklı küreselleştirme tekniklerinin üç lokal öznitelik seçme yöntemi üzerindeki etkilerini dört kıyaslama veri kümesi kullanarak kapsamlı bir şekilde analiz ettiler. Deneylerde, DVM sınıflandırıcı DT sınıflandırıcıdan daha başarılıdır. DFSS (Discriminative Feature Selection) yöntemi çok sınıflı veri kümelerinde OR ve CHI2 yöntemlerinden daha iyi performans gösterirken, ikili sınıf veri kümelerinde CHI2 yöntemi OR ve DFSS yöntemlerinden daha başarılıdır. Kou ve arkadaşları [12], küçük örnek veri kümeleriyle öznitelik sıralamasını değerlendirmek için Çoklu-Kriter Karar Verme (MCDM) tabanlı yaklaşımları kullanır. MCDM yöntemlerinin performansı, on öznitelik seçim yöntemiyle gösterilmektedir. Deneysel sonuçları üç sınıflandırıcı, beş MCDM yöntemi ve on veri kümesi arasında karşılaştırırlar. Agnihotri ve arkadaşları [13], metin sınıflandırması için Değişken Global Öznitelik Seçim Şeması (VGFSS) adlı yeni bir öznitelik seçim şeması önerdi. Yöntem, kategorilerdeki öznitelik sayısına göre her kategoriden farklı sayıda öznitelik seçer. VGFSS yöntemi, genel veri kümelerinde diğer yedi güncel yöntemden daha başarılıdır. Daha sonraki bir çalışmada [14], metin sınıflandırma performansını iyileştirmek için yeni bir Yumuşak Oylama Tekniği (SVT) önerdiler. SVT yöntemi, beş genel veri kümesi üzerinde dört sınıflandırıcı kullanılarak test edilir. Deneysel çalışmalar, SVT yönteminin standart yöntemlere göre sınıflandırıcıların performansında önemli bir gelişme sağladığını göstermektedir. Parlak ve Uysal [15] öznitelik seçimi ve öznitelik ağırlığının tıbbi doküman sınıflandırması üzerindeki etkisi, MEDLINE dokümanlarını içeren iki veri kümesi kullanılarak analiz etmiştir. Gini indeksi(GI) ve ayırt edici özellik seçici(DFS) olmak üzere iki farklı öznitelik seçim yöntemi ile terim frekansı (TF) ve terim frekansı-ters doküman frekansı (TF-IDF) olmak üzere iki farklı terim ağırlıklandırma yönteminin performansları iki örüntü sınıflandırıcı kullanılarak analiz edilmiştir.

III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İki farklı öznitelik ağırlıklandırma metodu olan TF ve TF-IDF, iki sınıflandırıcı, iki performans metriği ve üç veri kümesi kullanarak test ettik. Bu veri kümeleri, öznitelik seçim metotları, öznitelik ağırlıklandırma metotları, sınıflandırma algoritmaları, performans ölçütleri ve performans analizleri alt bölümlerde açıklanmıştır.

A. Veri Kümeleri ve Önışleme

Bu çalışmada veri kümeleri olarak Reuters-21578, 20Newsgroup ve Enron1 kullanılmıştır. Bu veri kümeleri için sınıf etiketleri ve doküman sayıları Tablo 1-3' te ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Tüm veri kümeleri için Porterstemmer algoritması [16] kullanıldı. Gereksiz kelimeler listesine göre veri kümelerinde geçen gereksiz kelimeler çıkarıldı. Ayrıca, ön işleme adımı olarak küçük harfe dönüştürme ve alfabetik olmayan karakterlerin kaldırılması kullanılmıştır [2]. Çok sınıflı veri kümeleri için Reuters-21578, 20Newsgroup veri kümesini kullanırken, ikili sınıf veri kümeleri için Enron1 veri kümesini kullandık. Çok sınıflı veri kümeleri için ilk 10 ve en çok doküman içeren 10 sınıfı kullandık. Reuters-21578 dışındaki tüm veri kümeleri, adil değerlendirme için eğitim (%70) ve test (%30) bölümlerine ayrılmıştır. Reuters-21578 zaten eğitim ve test bölümlerine ayrılmış bir şekilde oluşturulmuştur.

Tablo 1. Reuters-21578 veri kümesi

No.	Sınıf etiketi	Doküman sayısı (eğitim)	Doküman sayısı (test)
1	earn	2877	1087
2	acq	1650	719
3	money-fx	538	179
4	grain	433	149
5	crude	389	189
6	trade	369	117
7	interest	347	131
8	ship	197	89
9	wheat	212	71
10	corn	181	56

Tablo 2. 20Newsgroup veri kümesi

No.	Sınıf etiketi	Doküman sayısı (eğitim)	Doküman sayısı (test)
1	alt.atheism	700	300
2	comp.graphics	700	300
3	comp.os.ms-windows.misc	700	300
4	comp.sys.ibm.pc.hardware	700	300
5	comp.sys.mac.hardware	700	300
6	comp.windows.x	700	300
7	misc.forsale	700	300
8	rec.autos	700	300
9	rec.motorcycles	700	300
10	rec.sport.baseball	700	300

Tablo 3. Enron1 veri kümesi

No.	Sınıf etiketi	Doküman sayısı (eğitim)	Doküman sayısı (test)
1	yasal	2570	1102
2	Yasal olmayan	1050	450

B. Öznitelik Seçim Metotları

Deneysel çalışmalarda öznitelik ağırlıklandırma tekniklerini değerlendirmek için üç farklı lokal öznitelik seçim yöntemi kullanıldı. Bu yöntemler alt bölümlerde açıklanmıştır. Ayrıca globalleştirme tekniği olarak MAXIMUM metodu kullanılmıştır.

Tablo 4. Öznitelik Seçim yöntemleri için ön gösterimler

Notasyon	Değer	Anlam
$a(TP)$	$df(t, C_j)$	C_j sınıfında t terimini içeren doküman sayısı
$b(FP)$	$df(t, \bar{C}_j)$	Diğer sınıflarda (\bar{C}_j) t terimini içeren doküman sayısı
$c(TN)$	$df(\bar{t}, C_j)$	C_j sınıfında t terimini içermeyen doküman sayısı
$d(FN)$	$df(\bar{t}, \bar{C}_j)$	Diğer sınıflarda (\bar{C}_j) t terimini içermeyen doküman sayısı
e	$tf(t, C_j)$	C_j sınıfında t teriminin frekansı
f	$tf(t, \bar{C}_j)$	Diğer sınıflarda (\bar{C}_j) t teriminin frekansı
N	$(a+b+c+d)$	Tüm sınıflardaki toplam doküman sayısı
M	$count(C_j)$	Toplam sınıf sayısı
$p(t)$	$(a+b)/N$	t teriminin olasılığı
$p(\bar{t})$	$(c+d)/N$	t teriminin bulunmama olasılığı
$p(C_j)$	$(a+c)/N$	C_j sınıfının olasılığı
$p(\bar{C}_j)$	$(b+d)/N$	C_j sınıfının olmaması olasılığı
$p(t, C_j)$	a/N	t teriminin C_j sınıfında olma olasılığı
$p(t, \bar{C}_j)$	b/N	t teriminin diğer sınıflarda (\bar{C}_j) olma olasılığı
$p(\bar{t}, C_j)$	c/N	t teriminin C_j sınıfında olmama olasılığı
$p(\bar{t}, \bar{C}_j)$	d/N	t teriminin diğer sınıflarda (\bar{C}_j) olmama olasılığı
$p(t C_j)$	$a/(a+c)$	C_j sınıfı varken t teriminin olma olasılığı
$p(\bar{t} C_j)$	$c/(a+c)$	C_j sınıfı varken t teriminin olmama olasılığı
$p(t \bar{C}_j)$	$b/(b+d)$	C_j sınıfı yokken (\bar{C}_j) t teriminin olma olasılığı
$p(\bar{t} \bar{C}_j)$	$d/(b+d)$	C_j sınıfı yokken (\bar{C}_j) t teriminin olmama olasılığı
$p(C_j t)$	$a/(a+b)$	t terimi varken C_j sınıfının olma olasılığı
$p(\bar{C}_j t)$	$b/(a+b)$	t terimi varken C_j sınıfının olmama olasılığı
$p(C_j \bar{t})$	$c/(c+d)$	t terimi yokken C_j sınıfının olma olasılığı
$p(\bar{C}_j \bar{t})$	$d/(c+d)$	t terimi yokken C_j sınıfının olmama olasılığı

1) *DFSS (Discriminative Feature Selection)*: DFSS, metin sınıflandırması için filtre tabanlı bir öznitelik seçim yöntemidir [17]. Yöntem, önemli öznitelikleri seçmek için bazı kriterler içerir. Bunlar, (i) terim frekansı daha yüksek olan özniteliklerin seçilmesi, (ii) daha yüksek doküman frekansına sahip özniteliklerin seçilmesi, (iii) tüm sınıflardaki dokümanların çoğunda geçen özniteliklerin göz ardı edilmesidir. Bu kriterler kullanılarak DFS skoru şu şekilde hesaplanır:

$$DFSS(t, c_j) = \frac{tf(t, c_j)/df(t, c_j)}{tf(t, \bar{c}_j)/df(t, \bar{c}_j)} \times P(t|c_j) \times P(c_j|t) \times |P(t|c_j) - P(t|\bar{c}_j)| \quad (1)$$

2) *OR (Odds Ratio)*: OR formülünden dolayı tek taraflı bir lokal öznitelik seçim yöntemidir. Yöntem hem pozitif hem de negatif öznitelikleri seçer. OR skoru aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$OR(t, c_j) = \log \frac{P(t|c_j)(1-P(t|\bar{c}_j))}{(1-P(t|c_j))P(t|\bar{c}_j)} \quad (2)$$

3) *CHI2 (Chi-Square)*: CHI2, metin sınıflandırması için etkili bir öznitelik seçme yöntemidir. CHI2 yöntemi, t özniteliği ile C sınıfı arasındaki bağımsızlık farkını hesaplar. Olaylar olan A ve B , aşağıdaki durumlarda bağımsız kabul edilir:

$$p(XY) = p(X)p(Y) \quad (3)$$

Öznitelik seçme sürecinde, bu iki olay sırasıyla belirli bir özniteliğin ve sınıfın oluşumuna karşılık gelir. CHI2 puanı şu şekilde hesaplanır:

$$CHI2(t_i, c_j) = \frac{N*(TP*TN-FP*FN)^2}{(TP+FN)*(TP+FP)*(FN+TN)*(FP+TN)} \quad (4)$$

C. Öznitelik Ağırlıklandırma Metotları

Bu çalışmada öznitelik ağırlıklandırma metodu olarak TF(Terim Frekansı) ve TF-IDF(Terim Frekansı-Ters Doküman Frekansı) kullanılmıştır. Bu iki metot metin sınıflandırma çalışmalarında yoğun olarak kullanılan metotlardır. Ayrıca hem basit olması hem de metin sınıflandırma alanında başarılı performans göstermeleri sebebiyle bu iki temel metot tercih edilmiştir.

Metin veri kümesinde K dokümanları, k ise tek bir dokümanı temsil ettiğini düşünürsek, $f_{k,d}$ ya da TF “d” dokümanında “k” teriminin geçme sayısıdır. t_k k terimini karşılık gelir ve metin dokümanlarında k_i defa geçer.

$$TF(k, d) = f_{k,d} \{d \text{ dokümanında } k \text{ teriminin geçme sayısı, } k \text{ terimi } d \text{ dokümanında varsa} \} \quad (5)$$

TF-IDF tekniği, bir özniteliğin ağırlığını belirlemek için hem TF hem de IDF değerini kullanır. TF-IDF öznitelik ağırlıklandırma tekniği, metin sınıflandırma alanında yaygın olarak kullanılmaktadır ve diğer terim ağırlıklandırma teknikleri bu tekniğin türevleridir. Sezgisel olarak, TF-IDF tekniği, özniteliğin ilgili metin dokümanı için ne kadar önemli olduğunu belirler. Ters doküman frekansı formülü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$IDF(t_k) = \log \frac{K}{k_i} \quad (6)$$

TF-IDF formülü, metin dokümanındaki bir özniteliğin önemini değerlendirmek için kullanılır. TF-IDF skoru aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$TF-IDF(k,d) = TF(k,d) * IDF(t_k) = f_{k,d} * \log \frac{K}{k_i} \quad (7)$$

D. Sınıflandırma Algoritmaları

Bu çalışmada, Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Karar Ağacı (KA) olmak üzere iki sınıflandırıcı kullandık. Bu sınıflandırıcıların temel amaçları aşağıda açıklanmıştır:

DVM [18], metin sınıflandırma alanındaki en önemli sınıflandırıcılardan biridir. Ayrıca DVM, çekirdek tipine göre lineer ve lineer olmayan versiyonlar olabilir. Bu çalışmada, metin sınıflandırma alanında yaygın olarak kullanılan DVM'nin doğrusal versiyonu kullanıldı. Bir karar yüzeyi, DVM sınıflandırıcısı tarafından belirlenir. Herhangi bir veri noktasından maksimum derecede uzaktadır. İki sınıflı sınıflandırmayı çoklu sınıflandırmaya modifiye etmek için bütüne karşı bir ve bire karşı bir olan iki yaygın yaklaşımdan biri tercih edilebilir.

KA'lar, uygun bir sınıf tespit edilene kadar sınıfların sırasıyla reddedildiği çok aşamalı karar sistemleridir [19]. Bu amaca ulaşmak için, öznitelikler ilgili sınıflara göre farklı bölgelere ayrılır. İkili sınıflandırma ağacı, en yaygın kullanılan KA türüdür.

E. Performans Ölçütleri

Bu çalışmada öznitelik ağırlıklandırma tekniklerinin lokal öznitelik seçim yöntemleri üzerindeki performansını değerlendirmek için önemli bir başarı ölçütü olan Micro-F1 ve Macro-F1 skorları kullanılmıştır. F-skoru hem kesinlik hem de duyarlılık dikkate alınarak hesaplanır. Makro ortalama, F-skoru her sınıf için ayrı ayrı hesaplanır ve ardından tüm sınıfların ortalaması hesaplanır. Macro-F1 skorunun hesaplanması aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$Macro - F1 = \frac{\sum_{j=1}^M F_j}{M}, F_j = \frac{2 \cdot p_j \cdot r_j}{p_j + r_j} \quad (8)$$

Bu formülde, p_j and r_j , sırasıyla j sınıfının kesinlik ve duyarlılık skorlarına karşılık gelir.

Mikro ortalama F-skoru ise sınıf bilgisi dikkate alınmadan hesaplanmaktadır. Bu nedenle, tüm sınıflandırma kararları tüm dokümanlarda dikkate alınır. Dengesiz veri kümelerini değerlendirirken, mikro

ortalamayı hesaplarken büyük sınıflar küçük sınıflara hükmedebilir. Micro-F1 skorunun hesaplanması aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$Micro - F1 = \frac{2 \cdot p \cdot r}{p+r} \quad (9)$$

Bu formülde p ve r , tüm sınıflar için kesinlik ve duyarlılık değerlerine karşılık gelir. Micro-F1 skoru, daha fazla doküman içeren büyük sınıfların baskın olması nedeniyle tüm durumlar için adil bir değerlendirme sağlayabilir. Bu nedenle, deneylerde Micro-F1 skorunun yanında Macro-F1 ölçütü kullanılmıştır.

F. Performans Analizi

Bu bölümde, üç lokal öznitelik seçim yöntemi, farklı karakteristiklere sahip üç veri kümesi ve iki adet başarılı sınıflandırıcı kullanılarak kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Ayrıca iki farklı öznitelik ağırlıklandırma tekniklerini iyi bilinen lokal öznitelik seçim teknikleri üzerindeki performanslarını karşılaştırdık. Öznitelik seçimi aşamasında lokal öznitelik seçim yöntemlerine örnek olan DFSS, OR ve CHI2 öznitelik seçim yöntemleri kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada SVM ve DT olmak üzere iki farklı başarılı sınıflandırıcı kullanılmıştır. Globalleştirme tekniği olarak MAXIMUM tekniği kullanılmıştır. Tüm veri kümeleri için Porterstemmer algoritması [20] kullanıldı. Gereksiz kelimeler, belirlenen gereksiz kelime listesine göre kaldırıldı ve öznitelik ağırlıklandırma aşaması için TF ve TF-IDF [21] kullanıldı. Ayrıca, ön işleme adımı olarak küçük harf dönüşümü ve alfabetik olmayan karakterlerin kaldırılması kullanıldı [2]. Öznitelik ağırlıklandırma tekniklerinin performansını iki farklı sınıflandırıcı üzerinde değerlendirmek için Micro-F1 skoru ve Macro-F1 skoru kullanılmıştır.

Üç lokal öznitelik seçim yöntemi ile seçilen farklı öznitelik boyutları SVM ve DT sınıflandırıcıları ile beslenmiştir. Öznitelik alt kümeleri, 50, 100, 300, 500, 1000 ve 3000 olmak üzere farklı boyutlarda oluşturulmuştur. 16867, 50419 ve 31238 sırasıyla Reuters-21578, 20Newsgroup ve Enron1 [22] veri kümeleri için toplam öznitelik sayısıdır. Micro-F1 ve Macro-F1 [23] skorlarının sonuçları, Reuters-21578 veri kümesi için Tablo 5-10'da gösterilmektedir. Tablolarda öznitelik seçim metoduna göre en yüksek skor kalın şekilde, tablo bazında en yüksek skor hem kalın hem de altı çizili iken, veri kümesi bazında en yüksek skor hem kalın, hem altı çizili, hem de gölgelendirme yapılarak gösterilmiştir.

Tablo 5. DVM ile Reuters-21578 veri kümesinden elde edilen Micro-F1 ve Macro-F1 skorları (%)

Dimension	Mikro-F1 skorları (%)						Makro-F1 skorları (%)					
	DFSS		OR		CHI2		DFSS		OR		CHI2	
	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF
50	90.75	90.36	83.37	83.44	91.66	91.54	58.79	58.23	38.86	39.50	61.36	61.39
100	91.75	91.58	85.76	85.83	92.14	91.85	61.02	61.35	45.64	46.06	61.81	61.79
300	92.46	91.79	87.67	87.46	92.41	91.96	63.04	62.92	50.78	50.87	62.86	63.61
500	92.53	92.39	88.28	88.03	92.46	92.35	64.40	65.55	52.71	52.19	63.70	64.16
1000	92.75	92.52	89.61	89.14	92.72	92.31	63.65	64.36	57.29	58.32	63.31	63.26
3000	92.88	92.54	92.45	91.68	92.84	92.56	64.87	63.45	64.41	64.04	64.47	64.16

Tablo 6. KA ile Reuters-21578 veri kümesinden elde edilen Micro-F1 ve Macro-F1 skorları (%)

Dimension	Mikro-F1 skorları (%)						Makro-F1 skorları (%)					
	DFSS		OR		CHI2		DFSS		OR		CHI2	
	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF
50	89.91	89.71	83.58	83.29	90.28	89.76	58.37	57.14	37.85	36.72	58.32	57.05
100	90.58	90.28	85.47	85.26	90.58	90.47	59.26	60.05	44.80	44.33	59.06	58.62
300	90.66	89.69	87.53	87.03	90.21	90.15	59.00	57.92	50.75	50.02	57.93	57.75
500	90.28	89.36	87.96	87.53	90.96	89.95	58.28	57.23	52.44	51.31	59.65	58.21
1000	90.79	90.30	88.85	88.79	90.45	89.58	59.00	58.47	55.56	55.44	58.22	57.44
3000	90.49	89.89	90.68	90.34	90.17	89.45	58.77	58.23	59.49	58.52	58.30	57.48

Reuters-21578 veri kümesi için DFSS öznitelik seçim yöntemi, TF ve TF-IDF öznitelik ağırlıklandırma metodu, 3000 ve 500 öznitelik kullanan DVM sınıflandırıcı kombinasyonundan elde edilen en yüksek Mikro-F1 ve Makro-F1 skoru sırasıyla 92.88, 65.55'dir. DVM sınıflandırıcı çoğu durumda KA'na göre daha başarılıdır. Ayrıca DVM sınıflandırıcıda en yüksek skorlar daha çok yüksek boyutlarda elde edilirken, KA sınıflandırıcıda daha çok düşük boyutlarda elde edilmiştir.

Tablo 7. DVM ile 20Newsgroup veri kümesinden elde edilen Micro-F1 ve Macro-F1 skorları (%)

Dimension	Micro-F1 skorları (%)						Makro-F1 skorları (%)					
	DFSS		OR		CHI2		DFSS		OR		CHI2	
	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF
50	97.75	98.03	98.61	98.56	98.27	98.41	96.03	96.11	97.54	97.17	96.93	96.84
100	98.21	98.32	98.67	98.53	98.46	98.58	96.82	96.67	97.64	97.09	97.26	97.19
300	98.52	98.56	98.74	98.58	98.13	98.31	97.36	97.18	97.76	97.18	96.70	96.67
500	98.21	98.32	98.69	98.60	97.90	98.24	96.83	96.70	97.67	97.22	96.30	96.54
1000	98.31	98.06	98.53	98.49	98.15	98.17	97.01	96.19	97.41	97.02	96.74	96.40
3000	98.29	97.94	98.29	97.92	98.17	97.79	96.97	95.96	96.96	95.93	96.77	95.64

Tablo 8. KA ile 20Newsgroup veri kümesinden elde edilen Micro-F1 ve Macro-F1 skorları (%)

Dimension	Mikro-F1skorları (%)						Makro-F1skorları (%)					
	DFSS		OR		CHI2		DFSS		OR		CHI2	
	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF
50	98.70	98.77	98.13	98.75	98.88	98.89	97.63	97.56	98.10	97.54	98.00	97.80
100	98.93	98.97	98.86	98.87	98.95	98.99	98.10	97.97	97.96	97.76	98.14	98.00
300	98.88	98.99	98.91	98.97	98.84	98.91	97.99	98.00	98.05	97.98	97.92	97.82
500	98.78	98.87	98.89	98.87	98.88	98.94	97.82	97.75	98.03	97.77	97.99	97.89
1000	98.86	98.97	98.93	99.02	98.86	98.94	97.96	97.97	98.09	98.06	97.95	97.89
3000	98.80	98.99	98.97	98.94	98.78	98.97	97.87	98.00	98.15	97.91	97.83	97.96

20Newsgroup veri kümesi için OR öznitelik seçim yöntemi, TF-IDF ve TF öznitelik ağırlıklandırma metodu, 1000 ve 3000 öznitelik kullanan KA sınıflandırıcı kombinasyonundan elde edilen en yüksek Mikro-F1 ve Makro-F1skoru sırasıyla 99.02, 98.15'tir. KA sınıflandırıcı çoğu durumda DVM'e göre daha başarılıdır. Ayrıca DVM sınıflandırıcıda en yüksek skorlar daha çok düşük boyutlarda elde edilirken, KA sınıflandırıcıda daha çok yüksek boyutlarda elde edilmiştir.

Tablo 9. DVM ile Enron1 veri kümesinden elde edilen Micro-F1 ve Macro-F1 skorları (%)

Dimension	Mikro-F1 skorları (%)						Makro-F1 skorları (%)					
	DFSS		OR		CHI2		DFSS		OR		CHI2	
	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF
50	92.56	92.56	91.05	91.09	94.67	94.10	84.20	84.15	82.20	82.30	88.35	87.25
100	93.81	93.77	92.82	93.55	95.45	95.45	86.60	86.50	85.10	86.30	89.95	89.95
300	95.45	95.31	95.14	95.49	95.66	95.56	89.80	89.45	89.15	89.90	90.35	90.05
500	95.49	95.10	95.42	95.38	95.73	95.77	89.70	88.80	89.55	89.50	90.35	90.40
1000	95.66	94.57	96.08	96.08	96.84	96.36	90.05	87.70	91.00	91.00	92.65	91.45
3000	95.49	94.60	97.19	96.08	96.29	95.80	89.65	87.75	93.40	90.95	91.35	90.20

Tablo 10. KA ile Enron1 veri kümesinden elde edilen Micro-F1 ve Macro-F1 skorları (%)

Dimension	Mikro-F1 skorları (%)						Makro-F1 skorları (%)					
	DFSS		OR		CHI2		DFSS		OR		CHI2	
	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF	TF	TF-IDF
50	91.85	91.85	89.97	89.89	94.42	94.42	83.25	83.25	80.00	80.35	87.80	87.80
100	91.96	91.96	92.74	92.52	95.24	95.25	83.05	83.05	84.95	84.50	89.55	89.55
300	92.78	92.78	93.55	94.35	94.31	94.31	84.60	84.60	86.35	87.85	87.65	87.65
500	91.92	91.92	93.30	92.93	92.96	92.97	82.75	82.75	85.80	84.90	84.69	84.70
1000	91.81	91.81	93.15	93.26	93.26	93.26	82.65	82.65	85.05	85.25	85.50	85.50
3000	92.07	92.07	94.24	93.44	94.17	93.44	83.00	82.90	87.10	85.35	87.10	85.85

Enron1 veri kümesi için OR öznitelik seçim yöntemi, TF öznitelik ağırlıklandırma metodu, 3000 öznitelik kullanan DVM sınıflandırıcı kombinasyonundan elde edilen en yüksek Mikro-F1 ve Makro-F1 skoru sırasıyla 97.19, 93.40'tır. KA sınıflandırıcı çoğu durumda DVM'e göre daha başarılıdır. Ayrıca DVM sınıflandırıcıda en yüksek skorlar daha çok düşük boyutlarda elde edilirken, KA sınıflandırıcıda daha çok yüksek boyutlarda elde edilmiştir.

Genel olarak, TF ağırlıklandırma metodu TF-IDF metoduna göre daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca, OR öznitelik seçim metodu ise DFSS ve OR metodlarına kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca öznitelik boyutu arttıkça sınıflandırma performansı genel olarak artmıştır. Bazı durumlarda küçük boyutlar en yüksek performansı göstermiştir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yaygın olarak bilinen iki farklı öznitelik ağırlıklandırma metodlarının iyi bilinen iki sınıflandırıcı, üç farklı lokal öznitelik seçim yöntemi kullanılarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analiz, metin sınıflandırma alanında yaygın olarak kullanılan üç farklı veri kümesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, ön işleme adımları olarak gereksiz kelimeleri kaldırma ve kök bulma metodu uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, DVM sınıflandırıcısının Reuters-21578 ve Enron1 veri kümesinde en yüksek performansı gösterirken, KA sınıflandırıcısı ise 20Newsgroup veri kümesinde en yüksek performansı göstermiştir. Buradan DVM sınıflandırıcısının dengesiz veri kümelerinde başarılı performans gösterirken, KA sınıflandırıcısının ise dengeli veri kümesinde daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, TF ağırlıklandırma metodu genel olarak lokal öznitelik seçim metodları üzerinde TF-IDF ağırlıklandırma metoduna göre daha yüksek performans sergilemiştir. Bunun sebebi ise Ters Doküman Frekansı (IDF)'nin lokal öznitelik seçim metodlarının performansına katkı sağlamadığı görülmektedir. IDF skoru bütün dokümanlar üzerinden hesaplanırken, lokal metodlar sadece ilgili sınıf için skor üretmektedir. Bu sebepten ötürü TF metodu daha başarılı performans sergilediği gözlenmiştir. Gelecekteki bir çalışma olarak, iyi bilinen bu ağırlıklandırma metodlarını global öznitelik seçim metodları üzerine uygulamak ve performans analizi yapmak olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Sebastiani, F. (2002). Machine learning in automated text categorization. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 34(1), 1-47.
- [2] Uysal, A. K., & Gunal, S. (2014). The impact of preprocessing on text classification. *Information Processing & Management*, 50(1), 104-112.
- [3] Parlak, B., & Uysal, A. K. (2020). The effects of globalisation techniques on feature selection for text classification. *Journal of Information Science*, 0165551520930897.
- [4] Uysal, A. K. (2016). An improved global feature selection scheme for text classification. *Expert Systems with Applications*, 43, 82-92.

- [5] Parlak, B., & Uysal, A. K. (2021). A novel filter feature selection method for text classification: Extensive Feature Selector. *Journal of Information Science*, 0165551521991037.
- [6] Rehman, A., Javed, K., Babri, H. A., & Asim, M. N. (2018). Selection of the most relevant terms based on a max-min ratio metric for text classification. *Expert Systems with Applications*, 114, 78-96.
- [7] Forman, G. (2003). An extensive empirical study of feature selection metrics for text classification. *J. Mach. Learn. Res.*, 3(Mar), 1289-1305.
- [8] Debole, F., & Sebastiani, F. (2004). Supervised term weighting for automated text categorization. *In Text mining and its applications*, 81-97.
- [9] Özgür, A., Özgür, L., & Güngör, T. (2005). Text categorization with class-based and corpus-based keyword selection. *In International Symposium on Computer and Information Sciences*, 606-615.
- [10] Taşcı, Ş., & Güngör, T. (2013). Comparison of text feature selection policies and using an adaptive framework. *Expert Systems with Applications*, 40(12), 4871-4886.
- [11] Uysal, A. K. (2018). On two-stage feature selection methods for text classification. *IEEE Access*, 6, 43233-43251.
- [12] Kou, G., Yang, P., Peng, Y., Xiao, F., Chen, Y., & Alsaadi, F. E. (2020). Evaluation of feature selection methods for text classification with small datasets using multiple criteria decision-making methods. *Applied Soft Computing*, 86, 105836.
- [13] Agnihotri, D., Verma, K., & Tripathi, P. (2017). Variable global feature selection scheme for automatic classification of text documents. *Expert Systems with Applications*, 81, 268-281.
- [14] Agnihotri, D., Verma, K., Tripathi, P., & Singh, B. K. (2019). Soft voting technique to improve the performance of global filter based feature selection in text corpus. *Applied Intelligence*, 49(4), 1597-1619.
- [15] Parlak, B., & Uysal, A. K. (2018). On feature weighting and selection for medical document classification. *In Developments and advances in intelligent systems and applications*, 269-282.
- [16] Porter, M. F. (1980). An algorithm for suffix stripping. *Program*.
- [17] Zong, W., Wu, F., Chu, L. K., & Sculli, D. (2015). A discriminative and semantic feature selection method for text categorization. *International Journal of Production Economics*, 165, 215-222.
- [18] Joachims, T. (1998, April). Text categorization with support vector machines: Learning with many relevant features. *In European conference on machine learning*, 137-142.
- [19] Theodoridis, S., Pikrakis, A., Koutroumbas, K., & Cavouras, D. (2010). *Introduction to pattern recognition: a matlab approach*. Academic Press.
- [20] Rehman, A., Javed, K., Babri, H. A., & Saeed, M. (2015). Relative discrimination criterion—A novel feature ranking method for text data. *Expert Systems with Applications*, 42(7), 3670-3681.
- [21] Schütze, H., Manning, C. D., & Raghavan, P. (2008). *Introduction to information retrieval*, 39, 234-265. Cambridge: Cambridge University Press.
- [22] Parlak, B. (2022). Class- index corpus- index measure: A novel feature selection method for imbalanced text data. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34(21), e7140.
- [23] Parlak, B., & Uysal, A. K. (2020). On classification of abstracts obtained from medical journals. *Journal of Information Science*, 46(5), 648-663.

Araştırma Makalesi - Research Article

***Rumex acetosella* L. (Kuzukulağı)'nın *In vitro* Antiradikal, Antimikrobiyal, Antikanser ve Fitokimyasal Özellikleri**

***In vitro* Antiradical, Antimicrobial, Anticancer, and Phytochemical Properties of *Rumex acetosella* L. (Sorrel)**

Fatma Keser^{1*}, Mustafa Karatepe², Serhat Keser³, Suat Tekin⁴, İsmail Türkoğlu⁵,
Ömer Kaygılı⁶, Ersin Demir⁷, Ökkeş Yılmaz⁸, Süleyman Sandal⁹, Sevda Kırbağ¹⁰

Geliş / Received: 13/09/2021

Revize / Revised: 30/09/2022

Kabul / Accepted: 30/09/2022

ÖZET

Polygonaceae familyasında yer alan *R. acetosella*, çok yıllık otsu bir bitkidir ve Türkiye’de halk arasında sebze olarak tüketilmektedir. Bu çalışmada *R. acetosella* toprak üst kısımlarının etanol, su ve metanol ekstraktlarının antimikrobiyal (*Escherichia coli*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Listeria monocytogenes*, *Klebsiella pneumoniae*, *Staphylococcus aureus* bakterileri ve *Candida albicans* maya-mantarına karşı), antiradikal (DPPH, ABTS ve OH radikallerine karşı), antikanser (insan prostat kanseri (PC-3), insan kolon kanseri (HCT-116), insan yumurtalık kanseri (A2780) ve insan göğüs kanseri (MCF-7) hücre serilerine karşı) ve fitokimyasal özellikleri (yağda çözünen vitaminler, yağ asitleri, flavonoidler, fitosteroller, fenolik asitler, toplam fenolik bileşik, toplam flavonoid ve toplam proantosiyaniidinler) incelenmiştir. Sonuçlarımıza göre *R. acetosella* ekstraktlarının ABTS, DPPH ve OH radikali yok etme testlerinde BHT’den daha yüksek aktiviteye sahip oldukları belirlenmiştir. Ayrıca bu bitkinin yüksek antimikrobiyal aktiviteye ve fitokimyasal içeriğe sahip olduğu, PC-3 insan prostat kanseri hücrelerine karşı etkili antikanser aktivite gösterdiği anlaşılmıştır. Aynı zamanda sunulan çalışma, *R. acetosella* ekstraktlarının *in vitro* antikanser aktivitesi ile ilgili ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler- *R. acetosella*, Kuzukulağı, Antiradikal, Fitokimyasal, Antikanser

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: fatma_arslan85@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6870-0546>)

²İletişim: mkaratepe@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6358-5913>)

³İletişim: serhatkeser@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-9678-1053>)

⁴İletişim: tekinsuat@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2757-1802>)

⁵İletişim: isturkoglu@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7454-7605>)

⁶İletişim: okaygili@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2321-1455>)

⁷İletişim: ersincaan.dmr@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-7676-5953>)

⁸İletişim: oyilmaz@fiat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8276-4498>)

⁹İletişim: suleyman.sandal@inonu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8916-3329>)

¹⁰İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹¹İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹²İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹³İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹⁴İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹⁵İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹⁶İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹⁷İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹⁸İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

¹⁹İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

²⁰İletişim: skirbag@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4337-8236>)

ABSTRACT

R. acetosella is a perennial herbaceous plant in the Polygonaceae family and is consumed as a vegetable among the people in Turkey. In this study, antimicrobial (*Escherichia coli*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Listeria monocytogenes*, *Klebsiella pneumoniae*, *Staphylococcus aureus* bacteria and *Candida albicans* yeast-fungi), antiradical (against to DPPH, ABTS and OH radicals), anticancer (against to human prostate cancer (PC-3), human colon cancer (HCT-116), human ovarian cancer (A2780) and human breast cancer (MCF-7) cell lines) and phytochemical properties (lipid-soluble vitamins, fatty acids, flavonoids, phenolic acids, phytosterols, total phenolic compounds, total flavonoid, and total proanthocyanidins) of ethanol, water and methanol extracts of *R. acetosella* aerial parts were investigated. According to our results, it was determined that *R. acetosella* extracts have higher activity than the BHT in scavenging tests of ABTS, DPPH and OH radicals. It has also been understood that this plant has high antimicrobial activity and phytochemical content and effective anticancer activities against to PC-3 human prostate cancer cell lines. Also the presented study is the first study on the *in vitro* anticancer activity of *R. acetosella* extracts.

Keywords- *R. acetosella*, *Sorrel*, *Antiradical*, *Phytochemical*, *Anticancer*

I. GİRİŞ

Bitkilerdeki karotenler, C ve A vitaminleri, flavonoidler, tokoferoller ve fenolik bileşikler gibi antioksidan özellik gösteren maddeler bazı hastalıklara karşı koruyuculuk sağlayabilmektedir [1]. Gıdalarla birlikte alınan askorbik asit, β -karoten ve α -tokoferol gibi eksojen antioksidanlar ile katalaz, glutatyon peroksidaz, süperoksit dismutaz enzimleri gibi endojen antioksidanlar canlı organizmaları oksidatif hasarlardan korumaktadırlar [2,3]. Bunlara ek olarak, antioksidan maddelerin aynı zamanda antibakteriyel, antiülserojenik, antikanserijen, antimikrobiyal, antitümör, antialerjik, antiviral, antimutajenik, antimetastaz aktivite gibi fizyolojik etkilere de sahip oldukları yapılan birçok çalışmayla ispatlanmıştır [4].

Bitkiler enfeksiyon gibi durumlar karşısında antibiyotik etkiye de sahip olan biyolojik olarak aktif maddeler üretebilmektedirler. Dünya Sağlık Örgütü veri ve tahminlerine göre gelişmemiş veya az gelişmiş ülkelerdeki nüfusun yarısından fazlası halen bitki ve bitkisel türevli ilaçları kullanmakta ve dünyada kırsal kesimde yaşayan nüfusun yaklaşık 4/5'lik kısmının birincil sağlık bakımı için halen şifalı bitkilere başvurduğu tahmin edilmektedir. Buna bağlı olarak son yıllarda antibiyotik amaçlarla, bu özelliğe sahip bitkilerin kullanımında bir artış yaşanmaktadır [5].

Modern dünyada kansere bağlı ölümler, ölüm sayısının 1/5'inden daha çoğunu oluşturmaktadır. Kanserle sebep olan başlıca etmenler ise çeşitli kimyasallar, viral enfeksiyonlar, beslenme alışkanlıkları, tütün kullanımı, radyasyon ve çevre faktörleri şeklinde sıralanmaktadır [6]. Kanser tedavisi için kemoterapi, cerrahi müdahale ve radyoterapi gibi önemli ve etkili tedavi yöntemlerine ek olarak halk tıbbında kullanılan bitki ve bitkilerden elde edilen doğal ürünlerle tedavi gibi alternatif yollar da uygulanmaktadır [7].

Polygonaceae familyasının Türkiye'de 67 türü bulunmakta ve bunların 25'i *Rumex* cinsine aittir. *Rumex acetosella* L. (kuzukulağı) bitkisi de bu familya içinde yer almaktadır. Mayıs-Eylül ayları arasında çiçek açan *R. acetosella*, çok yıllık otsu bir bitkidir ve halk arasında sebze olarak tüketilmektedir. Bu bitki ayrıca ateş düşürücü ve idrar söktürücü etkilerine sahip olup, müshil etkisi sebebiyle halk arasında kabızlığa karşı da kullanılmaktadır. Bitkinin kök ve yapraklarının yanık tedavisinde, kanı temizlemede ve iltihapların iyileştirilmesinde de kullanıldığı belirtilmektedir [8-10]. *R. acetosella* ile ilgili literatürler incelendiğinde bu bitkinin antiradikal özellikleri [11-15] ve antimikrobiyal özelliklerinin [16] belirlendiği gözlenmiştir.

Sunulan çalışmanın amacı *Rumex acetosella* toprak üstü kısımlarının su, etanol ve metanol ekstraktlarının antiradikal (ABTS⁺, DPPH[•], OH[•]), antimikrobiyal (*Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Listeria monocytogenes*, *Klebsiella pneumoniae*, *Proteus vulgaris*, *Staphylococcus aureus* bakterileri ve *Candida albicans* mantarı), antikanser (insan prostat kanseri (PC-3), insan yumurtalık kanseri (A2780), insan göğüs kanseri (MCF-7) ve insan kolon kanseri (HCT-116)) ve fitokimyasal içeriklerinin (toplam fenolik, toplam flavonoid, toplam proantosyanidin, flavonoidler, fenolik asitler, fitosteroller, yağda çözünen vitaminler ve yağ asitleri) incelenmesidir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Bitki Örnekleri ve Ekstraksiyon

Rumex acetosella (Kuzukulağı) örnekleri, 25.05.2015 tarihinde, Elazığ-Sivrice arası, Gözeli Ovası, Şirinyazı Köyü çevresi, tarla kenarı, 1550 metre rakımdan toplandı. Numunelerin bir örneği Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü Herbaryumu'nda saklandı. Toplanan örnekler laboratuvar ortamında, oda sıcaklığında ve gölgede kurutuldu. Ekstraksiyondan önce kurutulmuş bitki kısımları (10 g) blendırda öğütülüp ekstraksiyon için hazırlandı. Öğütülerek toz haline getirilmiş bitki örnekleri ağzı kapaklı 1 L'lik erlenlerde örneklerin 20 katı kadar çözücü ile (200 mL; su, etanol ve metanol) manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Ekstraksiyon çözeltisi renksiz hale gelinceye kadar değiştirilerek karıştırılmaya devam edildi. Ekstraktlar süzgeç kağıdı ile süzülüp, çözücülerini uzaklaştırıldı. Son olarak elde edilen ekstraktlar ve standartlar analizlere uygun şekilde µg/mL konsantrasyonunda çözümlenerek kullanıldı.

B. Radikal Yok Etme Aktivitelerinin Belirlenmesi

DPPH serbest radikal giderme, Brand-Williams ve ark. [17] metoduna göre bazı modifikasyonlarla yapıldı. DPPH* radikalinin 1 mM'lık çözeltisi hazırlandı. Deney tüplerine 500 µg/mL ekstrakt aktarıldı ve toplam hacim 3 mL olacak şekilde saf etanol ile tamamlandı. Daha sonra numune tüpüne stok DPPH* çözeltisinden 1 mL ilave edildi. 30 dk oda sıcaklığında ve karanlıkta inkübe edildi. İnkübasyondan sonra etanoldan oluşan köre karşı 517 nm de absorbansları ölçüldü. Kontrol olarak, 3 mL etanol ve 1 mL DPPH* çözeltisi kullanıldı.

ABTS*radikalini yok etme aktivitesi Re ve ark. [18] metoduna göre bazı modifikasyonlarla gerçekleştirildi. Bunun için 2.45 mM K₂S₂O₈ ve 7 mM ABTS çözeltileri 1:1 oranında karıştırılarak oda sıcaklığında ve karanlıkta 16 saat inkübasyona bırakıldı. Hazırlanan bu ABTS radikal çözeltisinin 734 nm'de absorbansı alınarak 1.660±0.02 absorbansına ulaşılan kadar etil alkolle seyreltildi. Bu absorbans kontrol absorbansı olarak kullanıldı. Daha sonra bu radikal çözeltisinden deney tüplerine 4 mL bırakıldı ve bu tüplerin üzerine 500 µg/mL bitki ekstraktından eklenerek oda sıcaklığında ve karanlıkta 2 saat inkübasyona bırakıldı. Bu sürenin sonunda örneklerin absorbansı 734 nm'de PBS (Fosfat Tamponu, pH=7.4)'den oluşan köre karşı kaydedildi.

Hidroksil (OH) radikalini yok etme aktivitesi Halliwell ve ark. [19] metoduna göre belirlendi. Reaksiyon karışımı 500 µg/mL bitki ekstraktı, 500 µL 3.6 mM deoksiriboz, 200 µL 100 µM FeCl₃, 200 µL 104 mM EDTA, 100 µL 1 mM H₂O₂ ve 100 µL 1 mM askorbik asit çözeltisinden oluşturuldu ve vortekste iyice karıştırıldı. 37 °C'deki etüvde 1 saat bekletilen tüplerin üzerine 1 mL %2.8 TCA ve 1 mL %1.0 TBA eklendikten sonra sıcak su banyosunda 50 °C'de 30 dk bekletilen örnekler bütanol fazına alınarak 532 nm dalga boyunda UV'de absorbansları kaydedildi.

Bütün testler üç kez tekrarlandı ve ortalama değerler hesaplandı. Radikal yok etme testlerinde bitki ekstraktlarıyla aynı konsantrasyonda hazırlanan BHT kullanıldı. Her bir örneğin radikal yok etme aktivite yüzdeleri aşağıdaki eşitlikle belirlendi:

$$\% = [(A_0 - A_1)/A_0] \times 100 \quad (1)$$

A₀: kontrol absorbansı; A₁: örnek absorbansı.

C. Fitokimyasal İçeriklerin Belirlenmesi

Toplam fenolik bileşik miktarı Slinkard ve Singleton [20] metoduna göre saptandı. Gallik asit standart olarak kullanıldı. 1 mL bitki ekstraktı deney tüpüne alınarak üzerine 0.5 mL Folin-Ciocalteu reaktifi eklendi ve 3 dk sonra 3 mL %2'lik Na₂CO₃ çözeltisi eklenen örnekler sürekli karıştırılarak 2 saat bekletildi. Bu sürenin sonunda 760 nm dalga boyunda numunelerin absorbansları kaydedildi. Kaydedilen absorbanslar daha önceden hazırlanan gallik asit standart grafiğinden elde edilen denklemde yerine konularak, her bir bitki ekstresinin ihtiva ettiği toplam fenolik bileşik miktarı gallik asit eşdeğeri (mg gallik asit/ g ekstrakt) olarak hesaplandı.

Toplam flavonoid içeriği Kim ve ark. [21] metoduna göre belirlendi. Kateşin standart olarak kullanıldı. Bu metotta 0.5 mL bitki ekstraktı saf suyla 4 mL'ye tamamlandı. Sonra örneklerin üzerine 0.3 mL %5'lik NaNO₂ çözeltisinden ve 0.3 mL %10'luk AlCl₃ çözeltisinden ilave edilip oda sıcaklığında 5 dk bekletildi. Bu sürenin sonunda karışıma 2 mL 1 M NaOH eklenip vortekste iyice karıştırıldı. Reaksiyon sonunda oluşan pembe renkli örneklerin absorbansı 510 nm'de UV.'de kaydedildi. Ekstraktların ihtiva ettiği total flavonoid miktarı

önceden hazırlanmış kateşin standart grafiği üzerinden elde edilen denklemde yerine konarak µg kateşin / g ekstrakt olarak hesaplandı.

Proantosiyanidin içeriğinin belirlenmesi Amaeze ve ark. [22] metoduna göre gerçekleştirildi. Kateşin standart olarak kullanıldı. Bunun için 0.5 mL ekstrakt üzerine 1.5 mL %4'lük vanilin-metanol çözeltisi ve 0.75 mL derişik HCl çözeltisi eklendi. Reaksiyon karışımı iyice karıştırılıp oda sıcaklığında 15 dk bekletildi. Bu sürenin sonunda 500 nm dalga boyunda numunelerin absorbansları kaydedildi. Kaydedilen absorbanslar daha önceden hazırlanan catechin standart grafiğinden elde edilen denklemde yerine konularak, her bir bitki ekstresinin ihtiva ettiği toplam proantosiyanidin miktarı catechin eşdeğeri (mg kateşin / g ekstrakt) olarak hesaplandı.

Flavonoit ve fenolik asit içerikleri Zu ve ark. [23] metoduna göre saptandı. Bitkilerin metanol fazında homojenizasyonu ile elde edilen ekstraktlarının ihtiva ettiği flavonoit ve fenolik asitlerin analizi HPLC cihazı ile ters faz kolon kullanılarak gerçekleştirildi. Bu analizde mobil faz olarak %1 asetik asit içeren metanol/su/asetonitril (46/46/8) karışımı kullanıldı. Bu faz 0.45 µm çapında membran filtresiyle filtre edildi ve kullanmadan önce ultrasonik olarak deaerate edildi. Akış oranı ve enjeksiyon hacmi sırasıyla 1.05 mL/dk ve 10 µL belirlendi. Bütün kromatografik analizler 25 °C'de gerçekleştirildi. Kromatografik piklerin analizi alıkonma süreleri ve UV spektrumlarının referans standartlarla karşılaştırılmasıyla gerçekleştirildi. Myrisetin, morin, kuersetin, kaempferol, naringin, naringenin, resveratrol, vanilik asit, gallik asit, kafeik asit, ferulik asit ve rosmarinik asit *R. acetosella* toprak üstü kısımlarında tespit edildi.

R. acetosella toprak üstü kısımlarında bulunan serbest yağ asitleri GC cihazıyla Christie [24] metoduna göre belirlendi. Bitki örneklerinden lipitlerin ekstraksiyonu 3:2 (v/v) hekzan-izopropanol karışımı ile yapıldı. Bunun için: 1 g bitki kısmı 3:2 (v/v) oranında 5 mL hekzan-izopropanol karışımı içinde 30 sn süreyle homojenize edildi. Homojenizasyon kabı 2 mL parçalama çözeltisi ile yıkandı ve santrifüj tüplerine alındı. Daha sonra 4500 rpm'de 10 dk süreyle santrifüj edilen bitki örneklerinden üst supernatant kısım alınarak ağız kapaklı deney tüplerine konuldu. Metil esteri hazırlamak için hekzan/izopropanol fazı içindeki lipit ekstraktı 30 mL'lik sızdırma yapmayan deney tüplerine alındı. Üzerine %2'lik metanolik sülfürik asitten 5 mL ilave edildi, vorteks ile iyice karışmaları sağlandı. Bu karışım 50 °C'lik etüvde 15 saat süre ile metilleşmeye bırakıldı. Tüpler etüvden çıkarılarak oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve 5 mL %5'lik NaCl ilave edilerek iyice karıştırıldı. Tüpler içinde oluşan yağ asidi metil esterleri 5 mL hekzan ile ekstrakte edildi ve hekzan fazı pipetle alınarak, 5 mL %2'lik KHCO₃ ile muamele edildi ve fazların ayrılması için 4 saat bekletildi. Daha sonra metil esterlerini içeren karışımın, 45 °C de ve azot akımı altında çözücüsü uçuruldu, 1 mL hekzan ile çözülerek 2 mL'lik ağız kapaklı otosampler vialleri içine alınarak gaz kromatografisinde analiz edildi. Lipit ekstraktı içindeki yağ asitleri metil esterlerine dönüştürüldükten sonra SHIMADZU GC 17 Ver. 3 gaz kromatografisi ile analiz edildi. Bu analiz için 25 m uzunluğunda, 0.25 m iç çapında ve PERMABOND 25 mikron film kalınlığına sahip Machery-Nagel (Germany) kapiller kolon kullanıldı. Analiz sırasında kolon sıcaklığı 120-220 °C, enjeksiyon sıcaklığı 240 °C ve dedektör sıcaklığı 280 C olarak tutuldu. Kolon sıcaklık programı 120 C'den 220 C'ye kadar ayarlandı. Sıcaklık artışı 200 °C'ye kadar 5 °C/dk ve 200 °C'den 220 °C'ye kadar 4 C/dk olarak belirlendi. 220 °C'de 8 dakika tutuldu ve toplam süre 35 dakika olarak belirlendi. Taşıyıcı gaz olarak azot gazı kullanıldı. Analiz sırasında örnekler için yağ asidi metil esterlerinin analizinden önce, standart yağ asidi metil esterlerine ait karışımlar enjekte edilerek, her bir yağ asidinin alıkonma süreleri belirlendi. Bu işlemden sonra gerekli programlama yapılarak örnekler için yağ asidi metil esterleri karışımlarının analizi yapıldı. Sonuçlar toplam yağ asitleri içinde her bir yağ asidi için % miktar olarak belirlendi. Hesaplamalar GC Solution 2.3 programı kullanılarak yapıldı.

R. acetosella toprak üstü kısımlarından ekstrakte edilen yağda çözünen vitamin ve fitosterol içerikleri Sánchez-Machado ve ark. [25] ile Lopez-Cervantes ve ark. [26] metotlarına göre HPLC cihazıyla belirlendi. Bitki örneklerinin 10 mL 3/2 hekzan/izopropanol karışımında parçalanıp santrifüj edilmesiyle elde edilen supernatanttan 5 mL 25 mL'lik vida kapaklı tüpler içine alınarak üzerine %5'lik KOH çözeltisi ilave edildi. Vortekslenildikten sonra 85 °C'de 30 dk bekletilen örnekler daha sonra oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve üzerine 5 mL saf su ilave edilerek karıştırıldı. Sabunlaşmayan lipofilik moleküller 2 x 5 mL hekzan ile ekstrakte edildi. Hekzan fazı azot akımı ile uçuruldu. 1 mL (60/40, v/v) asetonitril/metanol karışımında çözümlenerek otosampler viallerine alınan örnekler HPLC'de analiz edildi. Analiz Shimadzu HPLC cihazı ile yapıldı. Cihazda pompa olarak LC-10 ADVP, UV-visible dedektör olarak SPD-10AVP, kolon fırını olarak CTO-10ASVP, otosampler olarak SIL-10ADVP, degasser ünitesi olarak DGU-14A ve Class VP yazılım (Shimadzu, Kyoto Japan) kullanıldı. Mobil faz olarak asetonitril/metanol (60/40, v/v) karışımı kullanıldı. Mobil faz akış hızı 1 mL olarak belirlendi. Analiz için UV dedektör kullanıldı. Kolon olarak da Süpelcosil LC 18 (15 cm x 4.6 mm, 5 µm; Sigma, USA) kolonu kullanıldı. Dedeksiyon dalga boyları retinol için 320 nm, tokoferoller ve D vitamini için

215 nm, K vitamini için 265 nm, fitosteroller için 202 nm belirlendi Analiz sonuçları µg/g olarak ifade edildi. Retinol, δ-tocopherol, α-tocopherol, vitamin K, vitamin D, ergosterol ve stigmasterol *R. acetosella* toprak üstü kısımlarında saptandı.

D. Antimikrobiyal Özelliklerin Belirlenmesi

Escherichia coli ATCC 25922, *Bacillus megaterium* DSM 32, *Bacillus subtilis* IMG 22, *Proteus vulgaris* FMC 1, *Pseudomonas aeruginosa* DSM 50071, *Listeria monocytogenes* SCOTTA, *Klebsiella pneumoniae* FMC 5, *Staphylococcus aureus* COWAN 1 bakterileri ve *Candida albicans* FMC 17 maya-mantarı test mikroorganizmaları olarak kullanıldı. Antimikrobiyal aktivite testi, Collins ve Lyne [27] metoduna göre disk difüzyon metoduna ile belirlendi. Bitki ekstraktları mikro şırınga ile 6 mm çapındaki steril boş antibiyotik disklerle emdirildi. Bakteri suşları; Nutrient Buyyon'da aşılansak 35 ± 1 °C de 24 saat, maya suşları Malt Ekstrakt Buyyon'da, 25 ± 1 °C de 48 saat süre ile inkübe edildi. Antibiyogram için erleninde steril edilen ve 45-50 °C'ye kadar soğutulan Müller Hinton Agar, yukarıda belirtildiği şekilde hazırlanan bakteri ve mayaların buyyondaki kültürü ile %1 oranında aşılansak (10⁶ bakteri/mL, 10⁴ maya/mL) iyice çalkalandıktan sonra 9 cm çapındaki steril petri kutularına konularak ve besiyerinin homojen bir şekilde dağılması sağlandı. Katılaşılan besi ortamına ekstrakt emdirilmiş olan diskler hafifçe bastırılarak yerleştirildi. Bu şekilde hazırlanan petri kutuları 4 °C'de 1.5±2 saat bekletildikten sonra bakteri aşılansak plaklar 37 ± 0.1 °C'de 24 saat, maya aşılansak plaklar ise 25 ± 0.1 °C'de 3 gün süre ile inkübe edildi. Streptomisin sülfat (10 mg/disk) bakteriler için ve nystatin (30 mg/disk) ise maya-mantarı için standart antibiyotikler olarak kullanıldı.

E. Antikanser Özelliklerin Belirlenmesi

1) *Hücre Kültürü*: İnsan prostat kanseri (PC-3), insan kolon kanseri (HCT-116), insan yumurtalık kanseri (A2780) ve insan göğüs kanseri (MCF-7) hücre serileri Amerikan Tipi Kültür Koleksiyonunda (ATCC) alındı ve bu çalışmada kullanıldı. Çalışmamızda besiyeri olarak RPMI-1640 medium (Sigma, ABD) kullanıldı. İçerisine %10 FBS (Sigma, ABD), %1 pencilin streptomycin (Gibco, Almanya) ve %1 non essential amino acids (Lonza) eklendi. Hücreler konfluent olana kadar haftada en az iki defa laminar hava akımlı kabin (Biyolojik emniyet kabini; Nüve LN120) içerisinde steril şartlarda besiyeri değiştirildi. Konfluent olan hücrelerin pasajları yapıldı.

Hücreler konfluent olduğunda hücreleri flask yüzeyinden kaldırmak için tripsin (Sigma) kullanıldı. Flask ortamından medium uzaklaştırıldıktan sonra her 25 cm²'lik flask için 2 mL tripsin eklendi. Tripsin hücre kültür ortamında uzun süre kaldığında hücrelere zarar vermeye başlar. Sıcaklık arttıkça daha etkili çalıştığı için 2-3 dakika inkübatörde bekletildi. Böylece hücrelerin daha çabuk yüzeyden kaldırılması sağlanmış oldu. Hücrelerin üzerine eklenen tripsin etkisini azaltmak için medium ile seyreltildi. Sonrasında hücrelerin canlılık oranı bir hemositometrede %0.4 tryphan blue kullanılarak belirlendi. Canlılık oranının %90'ın üzerinde olduğu belirlendi ve deneylere başlandı. Hücreler falcon tüpüne (Citotes, Çin) alınarak 1800 rpm'de 3 dk santrifüj edilip hücrelerin dibe çökmesi sağlandı. Üst kısımda bulunan süpernatant atıldı. Hazırlanan hücrelerin sayımı yapılarak her kuyucuğunda 15x10³ hücre olacak şekilde 96 well platelere ekimleri yapıldı. Flasklar ve well plate'ler %5 CO₂'li inkübatörde (Panasonic, Japonya), 37 °C'de ve %95 nemli ortamda inkübasyona bırakıldı. Ekimden 24 saat sonra hücreler mikroskop altında incelenerek flask ve well plate tabanına hücrelerin tekrardan yapışıp/yapışmadıkları kontrol edildi.

2) *MTT Testi*: *R. acetosella* toprak üstü kısımlarının etanol, su ve metanol ekstraktları, farklı kanser hücre serilerine (PC-3, HCT-116, A2780 ve MCF-7) karşı antikanser özellikleri açısından incelendi. Hücrelerin yaşayabilirliği, %0.4 tripan mavisi kullanılarak belirlendi. *R. acetosella* ekstraktlarının % hücre canlılığının etkileri 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolyum bromür (MTT) testi ile değerlendirildi [28,29].

F. İstatistiksel Analizler

İstatistiksel analizler için SPSS Statistics 22.0 yazılım programı kullanıldı. Antiradikal analiz sonuçları varyans analizi (ANOVA) ve Duncan'ın çoklu aralık testi (DMRT) ile değerlendirildi. Antikanser aktivite testleri için Kolmogorov Smirnov testi kullanılarak normal dağılım elde edildi (p<0.05). Ekstraktların % hücre canlılığı kullanılarak IC₅₀ değerleri hesaplandı.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Antiradikal Özellikler

Sunulan çalışmada *R. acetosella* su, etanol ve metanol ekstraktlarının antiradikal özelliklerine bakıldığında, ekstraktların ABTS⁺ (%96.68, %97.68, %97.13, sırasıyla) ve DPPH radikallerini (%96.11, %95.34, %96.97, sırasıyla) standart antioksidan BHT'den (%93.24, %95.21, sırasıyla) çok daha yüksek oranda yok ettikleri saptanmıştır (Tablo 1). OH[•] radikali giderme testinde ise *R. acetosella* etanol ve metanol ekstraktları (%84.63, %87.16, sırasıyla) BHT'den (%75.77) daha yüksek aktivite göstermiştir. *R. acetosella* ile ilgili antiradikal çalışmalar incelendiğinde; Özen [12] ile Isbilir ve Sagirolu [15] yaptıkları çalışmalarda *R. acetosella* etanol ekstraktının sırasıyla %75 ve %79.68 oranında DPPH[•] radikali giderdiğini belirlemişlerdir. Bu iki çalışmanın sonuçları bizim çalışma sonuçlarımızdan (%95.34) daha düşük olduğu görülmektedir. Pereira ve ark. [13] ve Samancioglu ve ark. [30] *R. acetosella* ekstraktının yüksek oranda DPPH[•] radikali yok ettiğini; Sarikurkcu ve ark. [31] ise *R. acetosella* etanol ekstraktlarının yüksek oranda DPPH, ABTS ve NO radikalleri yok ettiğini saptamışlardır.

Tablo 1. *R. acetosella* ekstraktlarının ABTS⁺, OH[•], DPPH[•] radikalleri yok etme aktiviteleri, toplam flavonoit, toplam proantosiyanidin, toplam fenolik bileşik değerleri

Örnekler	ABTS ⁺ Yok Etme (%)	OH [•] Yok Etme (%)	DPPH [•] Yok Etme (%)	Toplam Flavonoit (µg CE/g)	Toplam Proantosiyanidin (µg CE/g)	Toplam Fenolik (mg GAE/g)
<i>R. acetosella</i> Su	96.68±0.23 ^b	66.23±1.14 ^d	96.11±0.26 ^a	5305.94±2.34	1558.56±2.41	118.89±0.94
<i>R. acetosella</i> Etanol	97.68±0.17 ^b	84.63±0.79 ^c	95.34±0.37 ^a	5575.91±1.99	4473.00±2.67	135.52±0.62
<i>R. acetosella</i> Metanol	97.13±0.20 ^b	87.16±0.35 ^b	96.97±0.24 ^a	6518.24±2.01	4483.16±2.93	136.94±0.67
BHT	93.24±0.20 ^a	75.77±0.12 ^a	95.21±0.33 ^a	-	-	-

Aynı sütündeki farklı harfler istatistiksel olarak farkı göstermektedir (p<0.001). Antiradikal aktivite sonuçları 500 µg/mL ekstrakt konsantrasyonu için hesaplanmıştır. Toplam flavonoit ve toplam proantosiyanidin sonuçları µg kateşin/g ekstrakt, toplam fenolik bileşik sonucu ise mg gallik asit/g ekstrakt şeklinde ifade edilmiştir.

B. Fitokimyasal Kompozisyon

R. acetosella bitkisinin total flavonoit, total proantosiyanidin ve total fenolik bileşik içerikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre *R. acetosella*'nın su, etanol ve metanol ekstraktlarının toplam fenolik bileşik miktarları sırasıyla, 118.89 mg GAE/g ekstrakt, 135.52 mg GAE/g ekstrakt ve 136.94 mg GAE/g ekstrakt şeklinde, toplam flavonoit miktarları sırasıyla, 5305.94 µg CE/g ekstrakt, 5575.91 µg CE/g ekstrakt ve 6518.24 µg CE/g ekstrakt şeklinde, toplam proantosiyanidin miktarları sırasıyla, 1558.56 µg CE/g ekstrakt, 4473.00 µg CE/g ekstrakt ve 4483.16 µg CE/g ekstrakt şeklinde belirlenmiştir. *R. acetosella* ile ilgili literatürler incelendiğinde, Özen [12] *R. acetosella* etanol ekstraktının 76.60 mg Pirokatekol E/g toplam fenolik bileşik, 51.60 mg Kuersetin E/g toplam flavonoit içerdiğini, Pereira ve ark. [13] ise aynı bitkinin 141.58 mg GAE/g toplam fenolik, 67.91 mg Kateşin E/g toplam flavonoit ihtiva ettiğini saptamışlardır. Bir diğer çalışmada Wegiera ve ark. [16] *R. acetosella*'nın 78.36 mg GAE/g, Isbilir ve Sagirolu [15] *R. acetosella* etanol ekstraktının 69.21 mg GAE/g, Ahmed ve ark. [14] aynı bitkinin metanol ve su ekstraktlarının sırasıyla, 108.88 µg GAE/mg, 94.07 µg GAE/mg, ve son olarak Samancioglu ve ark. [30] ise bu bitkinin 73.66 mg GAE/100 toplam fenolik bileşik içerdiğini tayin etmişlerdir. Sarikurkcu ve ark. [31] *R. acetosella* etanol ekstraktlarının 34.14 mg GAE/g toplam fenolik, 70.48 mg RE/g toplam flavonoit, 3.34 mg CE/g toplam flavanol içerdiğini belirlemişlerdir. Bütün bu çalışma sonuçları ve bizim çalışma sonuçlarımıza bakıldığı zaman *R. acetosella*'nın toplam fenolik ve toplam flavonoit içeriği bakımından oldukça zengin olduğu açıkça görülmektedir.

R. acetosella bitkisinin flavonoit ve fenolik asit içerikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Buna göre *R. acetosella* bitkisinin flavonoit içeriği olarak rutin (54.15 µg/g), myrisetin (37.00 µg/g), morin (3.50 µg/g), kuersetin (0.05 µg/g), kaempferol (0.20 µg/g), katesin (23.40 µg/g), naringin (37.20 µg/g), naringenin (0.05 µg/g) ve resveratrol (2.85 µg/g) ihtiva ettiği, fenolik asit içeriği olarak ise vanilik asit (3883.90 µg/g), hidroksikinamik asit (0.60 µg/g), kafeik asit (113.70 µg/g), ferulik asit (2295.00 µg/g) ve rosmarinik asit (2.90 µg/g) içerdiği saptanmıştır. Bu sonuçlara göre *R. acetosella*'nın flavonoit ve fenolik asit içeriği oldukça

zengin bir bitki olduğu görülmektedir. Yapılan literatür araştırmasında bu bitkinin flavonoid ve fenolik asit içeriğinin belirlendiği herhangi bir çalışmaya rastlanmadı.

R. acetosella bitkisinin vitamin, sterol ve yağ asidi içerikleri Tablo 2’de gösterilmiştir. Buna göre *R. acetosella* bitkisinde yağda çözünen vitaminler olarak retinol (0.05 mg/kg), α -tokoferol (0.10 mg/kg), δ -tokoferol (0.05 mg/kg), D (1.65 mg/kg) ve K vitamini (0.10 mg/kg) bulunduğu, fitosterol olarak ise ergosterol (1.60 mg/kg) ve stigmasterol (0.70 mg/kg) bulunduğu saptanmıştır. *R. acetosella*’nın yağ asitleri içeriğinin %15.82 palmitik asit (16:0), %5.77 palmitoleik asit (16:1), %5.12 stearik asit (18:0), %10.22 oleik asit (18:1), %24.99 linoleik asit (18:2), %38.08 linolenik asit (18:3), %20.94 toplam doymuş yağ asitleri, %79.06 toplam doymamış yağ asitleri olduğu saptanmıştır. Pereira ve ark. [13] *R. acetosella*’nın 52.24 mg/100 g α -tokoferol içerdiğini belirlemişlerdir. Bu α -tokoferol değerinin bizim çalışmamızdaki değere göre (0.10 mg/kg) oldukça yüksek olduğu açıkça görülmektedir. *R. acetosella*’nın yağ asitleri içeriğiyle ilgili çalışmalara bakıldığında ise sadece Pereira ve ark. [13] bu bitkinin %11.23 oranında palmitik asit (16:0), %20.18 oranında linoleik asit (18:2), %51.34 linolenik asit (18:3), %19.45 oranında toplam doymuş yağ asitleri, %80.55 oranında ise toplam doymamış yağ asitleri ihtiva ettiğini göstermişlerdir. Bu sonuçlara göre *R. acetosella*’nın doymamış yağ asitleri bakımından oldukça zengin olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

Tablo 2. *Rumex acetosella*’nın flavonoid, fenolik asit, vitamin, fitosterol ve yağ asitleri içerikleri

Flavonoid ve Fenolik Asitler	($\mu\text{g/g}$)
Rutin	54.15 \pm 0.95
Myrisetin	37.00 \pm 1.05
Morin	3.50 \pm 0.10
Kuersetin	0.05 \pm 0.00
Kaempferol	0.20 \pm 0.05
Katesin	23.40 \pm 0.70
Naringin	37.20 \pm 0.90
Naringenin	0.05 \pm 0.00
Resveratrol	2.85 \pm 0.25
Vanilik Asit	3883.90 \pm 2.55
Hidroksikinamik Asit	0.60 \pm 0.10
Gallik Asit	113.70 \pm 1.25
Kafeik Asit	2295.00 \pm 1.95
Ferulik Asit	2.90 \pm 0.15
Rosmarinik Asit	3883.90 \pm 2.55
Vitamin ve Fitosteroller	($\mu\text{g/g}$)
Retinol	0.05 \pm 0.00
δ -Tocopherol	0.05 \pm 0.00
α -Tocopherol	0.10 \pm 0.00
Vitamin K	0.10 \pm 0.00
Vitamin D	1.65 \pm 0.20
Ergosterol	1.60 \pm 0.10
Stigmasterol	0.70 \pm 0.05
Yağ Asitleri (YA)	(%)
Palmitik Asit (16:0)	15.82 \pm 0.19
Palmitoleik Asit (16:1)	5.77 \pm 0.32
Stearik Asit (18:0)	5.12 \pm 0.45
Oleik Asit (18:1)	10.22 \pm 0.11
Linoleik Asit (18:2)	24.99 \pm 0.57
Linolenik Asit (18:3)	38.08 \pm 0.09
Doymuş YA	20.94
Doymamış YA	79.06

C. Antimikrobiyal Özellikler

R. acetosella ekstraktlarının antimikrobiyal aktivite sonuçları Tablo 3’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre *R. acetosella*’nın su ekstraktının *E. coli*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae* ve *B. subtilis* bakterileri üzerinde, etanol ve metanol ekstraktlarının ise *E. coli*, *P. vulgaris*, *P. aeruginosa*, *L. monocytogenes*, *K. pneumoniae*, *B.*

subtilis, *B. megaterium* ve *S. aureus* bakterileri ve *C. albicans* mantarı üzerinde antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğu saptanmıştır. *R. acetosella* metanol ekstraktının *L. monocytogenes*, *K. pneumonia* ve *B. subtilis* üzerinde (sırasıyla, 9 mm, 10 mm, 10 mm) standart antibiyotikten (sırasıyla, 8 mm, 9 mm, 9 mm) daha yüksek antimikrobiyal aktivite gösterdiği belirlenmiştir. *R. acetosella* bitkisiyle alakalı antimikrobiyal çalışmalar incelendiğinde Wegiera ve ark. [16] bu bitkinin *E. coli*, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, *S. epidermidis*, *P. vulgaris*, *K. pneumoniae* bakterileri ve *C. albicans* mantarı üzerinde antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir. Akgunlu ve ark. [32] *R. acetosella* su-metanol ve heksan ekstraktlarının *P. aeruginosa*, *Acinetobacter baumannii*, *Salmonella enteritidis*, *S. aureus*, *Enterococcus faecalis*, *B. subtilis* bakterilerine ile *C. albicans* ve *C. krusei* mantarlarına karşı antimikrobiyal aktivite gösterdiklerini belirlemişlerdir. Orbán-Gyapai vd. [33] *R. aquaticus* bitkisinin *S. aureus*, metisilin dirençli *S. aureus*, *S. epidermidis*, *B. subtilis*, *P. aeruginosa*, *E. coli* ve *K. pneumoniae* bakterilerine karşı antimikrobiyal aktiviteye sahip olduklarını göstermişlerdir. Ansari vd. [34] *R. acetosella* ekstraktlarının *Acinetobacter baumannii* bakterisine karşı yüksek antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuçların çalışma sonuçlarımızla oldukça benzerlik gösterdiği ve *R. acetosella*'nın antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3. *Rumex acetosella* ekstraktlarının antimikrobiyal aktiviteleri (mm zone)

Mikroorganizma	<i>R. acetosella</i> Su	<i>R. acetosella</i> Etanol	<i>R. acetosella</i> Metanol	Standart Antibiyotikler
<i>Escherichia coli</i>	8	9	10	10
<i>Proteus vulgaris</i>	-	8	9	10
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	8	9	10	15
<i>Listeria monocytogenes</i>	-	8	9	8
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	8	9	10	9
<i>Bacillus subtilis</i>	8	8	10	9
<i>Bacillus megaterium</i>	-	8	9	12
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	8	10	12
<i>Candida albicans</i>	-	8	9	10

Streptomycin sülfat (10 mg/disk) bakteriler için, Nystatin (30 mg/disk) ise maya-mantarı için standart antibiyotik olarak kullanılmıştır. Kağıt disklerin çapı 6 mm alınmıştır.

D. Antikanser Özellikler

PC-3, A2780, MCF-7 ve HCT-116 kanser hücre serilerine karşı *R. acetosella* ekstraktlarının antikanser aktivitelerinin IC₅₀ değerleri Tablo 4'de sunulmaktadır. Buna göre *R. acetosella* metanol ekstraktının (28.91 µg/mL, 4.64 µg/mL, 30.47 µg/mL, sırasıyla) MCF-7 insan göğüs kanseri, PC-3 insan prostat kanseri ve HCT-116 insan kolon kanseri hücrelerine karşı diğer ekstraktlardan daha yüksek antikanser aktivite gösterdiği; *R. acetosella* etanol ekstraktının (10.63 µg/mL) ise A2780 insan yumurtalık kanseri hücrelerine karşı daha yüksek antikanser aktiviteye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre *R. acetosella*'nın etkili bir antikanser aktiviteye sahip olduğu söylenebilir. *R. acetosella* ile ilgili literatür araştırmasında bu bitkinin antikanser özelliğiyle ilgili herhangi bir çalışma bulunamadı. Ottenweller vd. [35] yaptıkları çalışmada *R. acetosella* ekstraktlarının DNA hasarını engellediğini ve insan prostat kanseri hücrelerinin farklılaşmasını indüklediğini saptamışlardır. Wegiera vd. [36] insan lösemik hücre hatları 1301 (insan T lenfoblastik hücreleri) ve EOL-1 (insan eozinofilik lösemi) hücrelerine karşı *R. acetosa*, *R. confertus*, *R. crispus*, *R. hydrolapathum* ve *R. obtusifolius* ekstraktlarının yüksek sitotoksik aktivite gösterdiğini belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada ise Lajter vd. [37] *R. acetosa*, *R. aquaticus*, *R. scutatus* ve *R. thyrsoiflorus* heksan ve kloroform ekstraktlarının MCF-7 kanser hücre serilerine karşı yüksek antikanser aktiviteye sahip olduğunu saptamışlardır. Tamokou vd. [38] *R. abyssinicus* ve *R. bequaertii* bitkilerinin A2780 over kanseri hücrelerine karşı antikanser aktivite gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bütün bu çalışma sonuçları *Rumex* türlerinin potansiyel antikanser aktiviteye sahip olduklarını kanıtlamaktadır.

Tablo 4. *R. acetosella* ekstraktlarının PC-3, A2780, MCF-7 ve HCT-116 kanser hücre serileri üzerindeki antikanser aktivite testlerinin IC₅₀ değerleri

Örnekler (µg/mL)	PC-3	A2780	MCF-7	HCT-116
<i>R. acetosella</i> Su	6.94	14.41	38.35	42.36
<i>R. acetosella</i> Etanol	5.46	10.63	34.47	50.25
<i>R. acetosella</i> Metanol	4.64	14.29	28.91	30.47

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada *R. acetosella* toprak üstü kısımlarının su, etanol ve metanol ekstraktlarının antiradikal, antimikrobiyal, antikanser ve fitokimyasal özelliklerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma sonunda bu bitkinin etkili antiradikal, antimikrobiyal ve antikanser özelliklere sahip olduğu, fitokimyasal içerik bakımından zengin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sunulan çalışma ile ilk defa *R. acetosella*'nın *in vitro* antikanser özellikleri incelenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Abushita, A.A., Hebshi, E.A., Daood, H.G. & Biacs, P.A. (1997). Determination of antioxidation vitamins in tomatoes. *Food Chemistry*, 60, 207-212.
- [2] Meyer, A.S., Heinonen, M. & Frankel, E.N. (1998). Antioxidant interactions of catechin, cyanidin, caffeic acid, quercetin, and ellagic acid on human LDL oxidation. *Food Chemistry*, 61, 71-75.
- [3] Nakagawa, K., Ninomiya, M., Okubo, T., Aoi, N., Nuneja, L.R., Kim, M., Yamanaka, K. & Miyazawa, T. (1999). Tea catechin supplementation increases antioxidant capacity and prevents phospholipid, hydroperoxidation in plasma in human. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 3967-3973.
- [4] Miyake, Y., Murakami, A., Sugiyama, Y., Isobe, M., Koshimizu, K. & Ohigashi, H. (1999). Identification of coumarin from lemon fruit (*Citrus limon*) as inhibitors of *in vitro* tumor promotion and superoxide and nitric oxide generation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 3151-3157.
- [5] Modi, C., Mody, S., Patel, H., Dudhatra, G., Kumar, A. & Awale, M. (2012). Herbal antibacterials: a review. *Journal of Intercultural Ethnopharmacology*, 1, 52-61.
- [6] Lemke, L., Williams, D.A., Roche, V.F. & Williams, Z.S. (2008). *Foye's Principles of Medicinal Chemistry*. 6th edition.
- [7] Hilal, Z., Michael, S., Ben, A.E. & Bashar, S. (2012). Greco-Arab and Islamic herbal-derived anticancer modalities: from tradition to molecular mechanisms. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012, Article ID 349040, 13 pages.
- [8] Kahraman, S. (2009). *Labada (Rumex cristatus DC) 'nin antioksidan aktivitesi*. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [9] Kuruüzüm, A. (1996). *Bazı Rumex L. türlerinin kemotaksonomik açıdan karşılaştırılmaları ve sitotoksik etkilerinin belirlenmesi*. Bilim Uzmanlığı Tezi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [10] Kuruüzüm, A. (1999). *Rumex patens L. üzerinde fitokimyasal araştırmalar ve biyolojik aktivite çalışmaları*. Doktora Tezi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [11] Alpınar, K., Ozyurek, M., Kolak, U., Guclu, K., Aras, C., Altun, M., Celik, S.E., Berker, K.I., Bektasoglu, B. & Apak, R. (2009). Antioxidant capacities of some food plants wildy grown in Ayvalik of Turkey. *Food Science and Technology Research*, 15, 59-64.
- [12] Özen, T. (2010). Antioxidant activity of wild edible plants in the Black Sea Region of Turkey. *Grasas Y Aceites*, 61, 86-94.
- [13] Pereira, C., Barros, L., Carvalho, A.M. & Ferreira, I.C.F.R. (2011). Nutritional composition and bioactive properties of commonly consumed wild greens: Potential sources for new trends in modern diets. *Food Research International*, 44, 2634-2640.
- [14] Ahmed, D., Mughal, Q. M., Younas, S. & Ikram, M. (2013). Study of phenolic content and urease and alpha-amylase inhibitory activities of methanolic extract of *Rumex acetosella* roots and its sub-fractions in different solvents. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 26, 553-559.
- [15] Isbilir, S.S. & Sagioglu, A. (2013). Total phenolic content, antiradical and antioxidant activities of wild and cultivated *Rumex acetosella* L. extracts. *Biological Agriculture & Horticulture*, 29, 219-226.
- [16] Wegiera, M., Kosikowska, U., Malm, A. & Smolarz, H.D. (2011). Antimicrobial activity of the extracts from fruits of *Rumex* L. species. *Central European Journal of Biology*, 6, 1036-1043.

- [17] Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E. & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*, 28, 25-30.
- [18] Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26, 1231-1237.
- [19] Halliwell, B., Gutteridge, J.M.C. & Aruoma, O. (1987). The deoxyribose method: a simple test tube assay for determination of rate constants for reactions of hydroxyl radicals. *Analytical Biochemistry*, 165, 215-219.
- [20] Slinkard, K. & Singleton, V.L. (1977). Total phenol analysis-automation and comparison with manual methods. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28, 49-55.
- [21] Kim, D.O., Chun, O.K., Kim, Y.J., Moon, H.Y. & Lee, C.Y. (2003). Quantification of polyphenolics and their antioxidant capacity in fresh plums. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 6509-6515.
- [22] Amaeze, O.U., Ayoola, G.A., Sofidiya, M.O., Adepoju-Bello, A.A., Adegoke, A.O. & Coker, H.A.B. (2011). Evaluation of antioxidant activity of *Tetracarpidium conophorum* (Mull. Arg) Hutch & Dalziel leaves. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, Article ID976701, 7 pages.
- [23] Zu, Y.G., Li, C.Y., Fu, Y.J. & Zhao, C.J. (2006). Simultaneous determination of catechin, rutin, quercetin, kaempferol and isorhamnetin in the extract of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) leaf by RP-HPLC with DAD. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 41, 714-719.
- [24] Christie, W.W. (1992). *Gas chromatography and lipids*. The Oil Press, Glasgow.
- [25] Sanchez-Machado, D.I., Lopez-Hernandez, J. & Paseiro-Losado, P. (2002). High performance liquid chromatographic determination of alpha-tocopherol in macroalgae. *Journal of Chromatography A*, 976, 277-284.
- [26] López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D.I. & Ríos-Vázquez, N.J. (2006). High performance liquid chromatography method for the simultaneous quantification of retinol, α -tocopherol, and cholesterol in shrimp waste hydrolysate. *Journal of Chromatography A*, 1105, 135-139.
- [27] Collins, C.M. & Lyne, P.M. (1989). *Microbiological methods*. Butterworths-Heinemann, London, England.
- [28] Mosmann, T. (1983). Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays. *Journal of Immunological Methods*, 65, 55-63.
- [29] Denizot, F. & Lang, R. (1986). Rapid colorimetric assay for cell growth and survival. Modifications to the tetrazolium dye procedure giving improved sensitivity and reliability. *Journal of Immunological Methods*, 89, 271-277.
- [30] Samancıoğlu, A., Sat, I.G., Yildirim, E., Ercisli, S., Jurikova, T. & Mlcek, J. (2016). Total phenolic and vitamin C content and antiradical activity evaluation of traditionally consumed wild edible vegetables from Turkey. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 15, 208-213.
- [31] Sarikurkcu, C., Targan, S., Ozer, M.S. & Tepe, B. (2017). Fatty acid composition, enzyme inhibitory, and antioxidant activities of the ethanol extracts of selected wild edible plants consumed as vegetables in the Aegean Region of Turkey. *International Journal of Food Properties*, 20, 560-572.
- [32] Akgunlu, S.B., Sekeroglu, N., Koca-Caliskan, U., Ozkutlu, F., Ozcelik, B., Kulak, M. & Gezici, S. (2016). Research on selected wild edible vegetables: Mineral content and antimicrobial potentials. *Annals of Phytomedicine*, 5, 50-57.
- [33] Orbán-Gyapai, O., Liktör-Busa, E., Kúsz, N., Stefkó D., Urbán, E., Hohmann, J., Vasas, A. (2017). Antibacterial screening of *Rumex* species native to the Carpathian Basin and bioactivity-guided isolation of compounds from *Rumexaquaticus*. *Fitoterapia*, 118, 101-106.
- [34] Ansari-pour, S., Safaei, N., Bagheri, N. (2020). Antibacterial effects of hydroalcoholic and aqueous extracts of two medicinal plants in comparison with popular antibiotics: An *in vitro* study. *Zahedan Journal of Research in Medical Sciences*, 22, e97873.
- [35] Ottenweller, J., Putt, K., Blumenthal, E.J., Dhawale, S., Dhawale, S.W. (2004). Inhibition of prostate cancer-cell proliferation by Essiac. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 10, 687-691.
- [36] Wegiera, M., Smolarz, H.D., Bogucka-Kocka, A. (2012). *Rumex* L. species induce apoptosis in I301, EOL-1 and H-9 cell lines. *Acta Poloniae Pharmaceutica – Drug Research*, 69, 487-499.
- [37] Lajter, I., Zupkó, I., Molnár, J., Jakab, G., Balogh, L., Vasas, A., Hohmann, J. (2013). Antiproliferative activity of Polygonaceae species from the Carpathian Basin against human cancer cell lines. *Phytotherapy Research*, 27, 77-85.
- [38] Tamokou, J.D., Chouna, J.R., Fischer-Fodor, E., Chereches, G., Barbos, O., Damian, G., Benedec, D., Duma, M., Efouet, A.P.N., Wabo, H.K., Kulate, J.R., Mot, A., Silaghi-Dumitrescu, R. (2013). Anticancer and antimicrobial activities of some antioxidant-rich Cameroonian medicinal plants. *PlosOne*, 8, 1-14.

Araştırma Makalesi - Research Article

Türkiye Kısa Dönem Elektrik Yük Talep Tahmininde Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Comparison of Machine Learning Methods in Turkey's Short- Term Electricity Load Demand Estimation

Kübra Kaysal^{1*}, Emre Akarşlan², Fatih Onur Hocaoğlu³

Geliş / Received: 05/10/2021

Revize / Revised: 24/07/2022

Kabul / Accepted: 25/07/2022

ÖZ

Enerji sektöründe arz-talep yönetimi, gelişmekte olan ve büyüyen ülke ekonomileri için öncelikli öneme sahiptir. Artan nüfusa, yükselen ekonomiye ve sanayideki gelişmelere bağlı olarak ülkelerin enerji ihtiyaçları da büyük ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, gelecekteki elektrik arz-talep eğilimlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi için modeller kullanılması, tüketiciler ve bu alandaki yatırımcılar için dikkat çeken bir konu olmuştur. Bu çalışmada, Türkiye kısa dönem elektrik yük talep tahminini gerçekleştirebilmek için başarıları literatürde kanıtlanmış makine öğrenmesi yöntemlerinden, Yapay Sinir Ağları, Ridge Regresyon, Lasso Regresyon ve Destek Vektör Regresyonu kullanılmıştır. Tahmin modellerinde kullanılan veriler Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'nden temin edilmiştir. Geçmişe dönük saatlik frekansta ölçülmüş bir yıllık veri seti ile bir saatlik ileriye yönelik tahminler gerçekleştirilmiştir. Yöntemlerden elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için literatürde sık kullanılan performans ölçüt kriterlerinden RMSE, MAE ve R^2 değerleri hesaplanmıştır. Yapay Sinir Ağları, geliştirilen makine öğrenmesi modelleri arasında RMSE=0,86, MAE=0,62 ve $R^2=0,97$ sonuçları ile daha başarılı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler- Makine Öğrenmesi, Yapay Sinir Ağları, Destek Vektör Regresyonu, Lasso Regresyon, Ridge Regresyon

ABSTRACT

Supply-demand management of the energy sector is of prime importance for rapidly growing economies and developing countries. Depending on the increasing population, the rising economy, and the developments in the industry, the countries' energy needs are increasing to a great extent. Therefore, using models to accurately and reliably predict future electricity supply-demand trends has attracted the attention of consumers and investors in this field. In this study, Artificial Neural Networks, Ridge Regression, Lasso Regression and Support Vector Regression, proven successes in the literature, are used to realize Turkey's short-term electric load demand estimation. Data used in the forecasting models were obtained from the Turkish Electricity Transmission Corporation. A one-hour future estimation is accomplished using a past year-long dataset of electrical energy. To compare the results obtained from the methods, RMSE, MAE and R^2 values, frequently used in the literature, were

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: kkaysal@aku.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3983-2608>)

Elektrik Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksek Okulu, Afyonkarahisar, Türkiye

²İletişim: akarşlan@aku.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5918-7266>)

Elektrik Mühendisliği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Afyonkarahisar, Türkiye

³İletişim: fohocaoglu@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3640-7676>)

Elektrik Mühendisliği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Afyonkarahisar, Türkiye

calculated. The comparison results show that the Artificial Neural Networks were more successful with RMSE=0.86, MAE=0.62 and $R^2=0.97$ results among the developed machine learning models.

Keywords- *Machine Learning, Artificial Neural Network, Support Vector Regression, Lasso Regression, Ridge Regression*

I. GİRİŞ

Günümüzde dünya üzerinde talebi hızla artan enerji türlerinden biri elektrik enerjisidir. Artan nüfus, gelişen teknoloji ve sanayi gibi etkenler elektrik ihtiyacını her gün biraz daha artırmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanmaması arz-talep dengesini bozacağı ve dünya üzerinde enerji krizlerine yol açabileceği için ileriye dönük elektrik üretim, iletim ve dağıtım planlarının yapılması zorunluluk haline gelmiştir. Elektrik enerjisinin doğru bir şekilde kullanılması için ihtiyaç olan miktarda üretilmesi gerekmektedir. Bu yüzden enerji sektöründe planlama önemli bir yere sahip olmakta ve bunun temelini ise yük talep tahmini oluşturmaktadır. Enerji talebinin doğru bir şekilde tahmin edilememesi arz ve buna bağlı olarak talep arasında oluşacak farklar ülke ekonomisi üstünde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Nitekim üretilen enerjinin talepten fazla olması elektrik sistemlerinde kararsızlığa, az olması ise enerji açıklarının oluşmasına, kesintilere, sistem sorunlarına vb. problemlere yol açabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı dünyada enerji talebi üzerine yapılan çalışmalar oldukça önem kazanmış ve bu konu üzerine çalışmalar hız kesmeden devam etmiştir [1].

Haliloğlu ve Tutu, literatüre katkı sağladıkları bir çalışmalarında, Türkiye için kısa dönem elektrik enerjisi talep tahmini yapmışlardır. Çalışmada günlük toplam tüketim verileri kullanılarak bir gün sonrası En Küçük Kareler yöntemi ile tahmin edilmiştir [1]. Diğer bir çalışmada, Kell ve arkadaşları İngiltere için kısa dönem talep tahmininde 16 farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanmışlardır. Yöntemlerden elde edilen hataları kıyaslayıp en uygun tahminin Online algoritmalarında olduğu gözlenmiştir [2]. Naik ve arkadaşları, rüzgâr hızı ve gücünün kısa dönem tahmini için hibrit bir tahmin modeli geliştirmiştir. Modelde Multi Kernel Ridge regresyon yöntemi kullanılmış ve modelin performansını geliştirmek için çeşitli parametreleri Mutasyona Uğramış Ateş Böceği algoritması ile optimize edilmiştir. Sonuç olarak optimize edilen modelin performansı daha başarılı bulunmuştur [3]. Lv ve arkadaşları, kısa dönem rüzgâr gücü tahmini için makine öğrenimi yöntemlerini kullanmışlardır. Sonuçlar olasılıksal tahmin yöntemlerinin daha başarılı olduğu göstermiştir [4]. Alleee ve arkadaşları, makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak Tanzanya için yük tahmini yapmışlardır. Tahmin modelleri için 1378 Tanzanya mini şebeke müşterisinden alınan anket ve akıllı sayaç verileri kullanılmıştır. En iyi performans Lasso Regresyon modelinden elde edilmiştir [5]. Yıldız ve arkadaşları, ticari bir binanın elektrik yükü tahmini için regresyon ve makine öğrenmesi yöntemlerini kullanmışlardır. Sonuç olarak Bayes Regülasyonlu Geri Yayılımlı Yapay Sinir ağlarının en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir [6]. Bitirgen ve Filik literatüre katkıda buldukları çalışmalarında, elektrik fiyat tahmini için XGBoost ve ARIMA algoritmalarını kullanmışlardır. XGBoost modelinin MAE (Mean Absolute Error) sonucu 101,3 olarak bulunmuş ve performansı ARIMA modeline göre daha başarılı kabul edilmiştir [7]. Alsafadi ve Filik'in bir diğer çalışmasında ise, saatlik küresel güneş radyasyonu tahmini için makine öğrenmesi yöntemini kullanılmıştır [8]. Yürek ve arkadaşları, makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimini tahmin etmişlerdir. Yöntemler arasından hatası en düşük çıkan Rasgele Karar Ormanı algoritması olmuştur [9]. Ali ve arkadaşları, ARIMA ve Random Forest tahmin yöntemleri ile kısa dönem elektrik yük tahmini yapmışlardır [10]. Shi ve arkadaşları kısa dönem yük tahmini için Random Forest ve Destek Vektör Makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarını kıyaslamışlardır. Çalışmada Random Forest modeli daha başarılı sonuçlar vermiştir [11]. Wang ve arkadaşları, kısa dönem güneş yoğunluğu tahminini Lasso Regresyon algoritmasını kullanarak gerçekleştirmişlerdir [12]. Küçük, çalışmasında parametre tahmini yapabilmek için Lasso, Ridge ve Liu yöntemlerini kullanmış ve bu yöntemlerin performansını karşılaştırmıştır. Sonuç olarak En Küçük Kareler yöntemine alternatif olarak bu üç yöntemde kullanılabileceğini gözlemlemiştir [13]. Shirzadi ve arkadaşları makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri ile orta dönem elektrik yük tahmini yapmışlardır. Buna göre Derin Öğrenme yöntemlerinde tahmin hatalarının daha az olduğu görülmüştür [14].

Kaur ve arkadaşları, makine öğrenmesi yöntemleri ile kısa dönem elektrik talep tahmini yapmışlardır. Çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve bu çalışma için en uygun performansı, Destek Vektör Regresyonu ve Lasso Regresyon algoritmaları vermiştir [15]. Waciko ve Ismail Endonezya ve Hindistan'ın GSYİH tahmini için Makine öğrenmesi yöntemlerinden Lasso, Ridge ve Elastik Net Regresyon yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. MSE (Mean Square Error) kriterine göre Elastik Net Regresyon modeli, diğer modellerden daha başarılı sonuç vermiştir [16]. Portabales ve arkadaşları Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı makine öğrenimi yöntemleri ile elektrik talep tahmini yapmıştır [17]. Khan ve arkadaşları

yenilenebilir ve yenilenemez güç kaynaklarının enerji tüketimini, makine öğrenimi yöntemleri ile tahmin etmişlerdir. Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı, Destek Vektör Regresyonu ve CatBoost yöntemleri birleştirilerek hibrit bir makine öğrenimi yöntemi oluşturulmuştur [18].

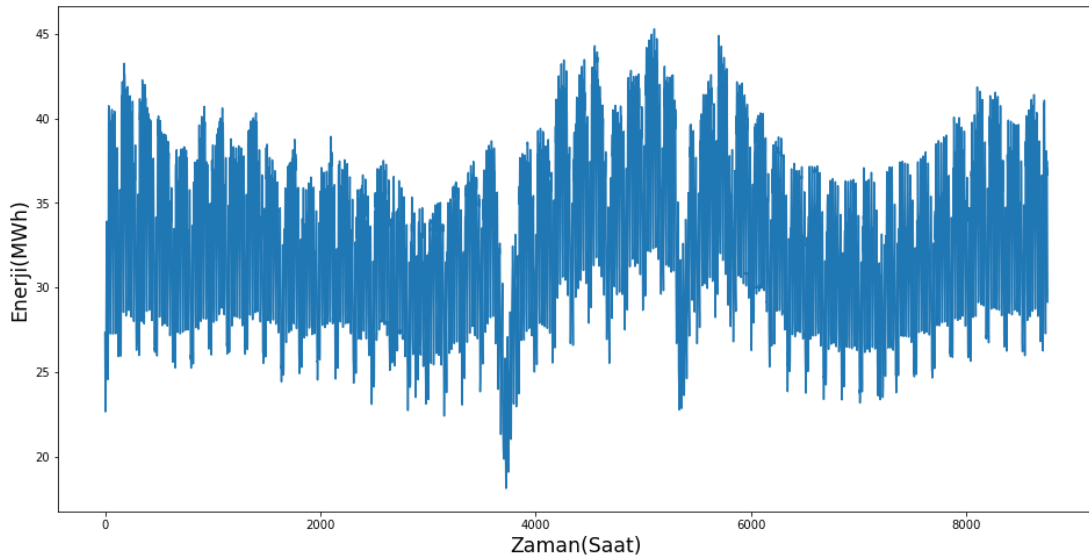
Mitchell ve arkadaşları, Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Destek Vektör Regresyonunu kullanarak kısa dönem yük tahmini yapmışlardır. Çalışmada, YSA'nın tahmin hatası daha düşük tespit edilmiştir [19]. Mohammad ve arkadaşları derin sinir ağı metodu ile kısa dönem yük tahmini yapmışlardır. Sinir ağını sigmoid, hiperbolik tanjant gibi aktivasyon fonksiyonları ile test edip sonuçları değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonunun daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [20]. Küçük ve Gezer, enerji alanındaki tahmin problemlerinde, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme tekniklerini kullanmışlardır. Çalışmaların sonucunda Makine Öğrenmesi tekniklerinin yanında Derin Öğrenme tekniklerinin de başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [21]. Işıl ve Bulut, Ridge Regresyon tahmin edicisinde farklı yanlılık parametrelerinin performanslarını simülasyon çalışması ve gerçek veri örneği üzerinde incelemiştir [22]. Yıldırım ve Kandemir, geçmiş yağış verilerini kullanarak yağış tahmini yapmışlardır. Tahminde, YSA ve Doğrusal Regresyon yöntemleri kullanılmış ve performansları kıyaslanmıştır. YSA modeli daha başarılı sonuçlar vermiştir [23].

Yapılan bu çalışmanın amacı, arz-talep dengesini sağlayabilmek adına, Türkiye kısa dönem elektrik yük talep tahmini için en doğru ve güvenilir sonuçlar veren, Makine Öğrenimi yöntemlerini belirlemektir. Bu kapsamda, literatürde farklı alanlarda tahminleme çalışmalarında kullanılan ve iyi performans gösterdiği belirlenen YSA, Ridge Regresyon, Lasso Regresyon ve Destek Vektör Regresyonu yöntemleri, sunulan çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu yöntemlerin, Türkiye kısa dönem elektrik yük talebi tahminindeki performansı incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışmada mevcut güncel veriler ve güncel yöntemler kullanıldığı için arz-talep tahmininin de enerji sektörüne ışık tutacağı düşünülmektedir.

II. MATERYAL VE METOT

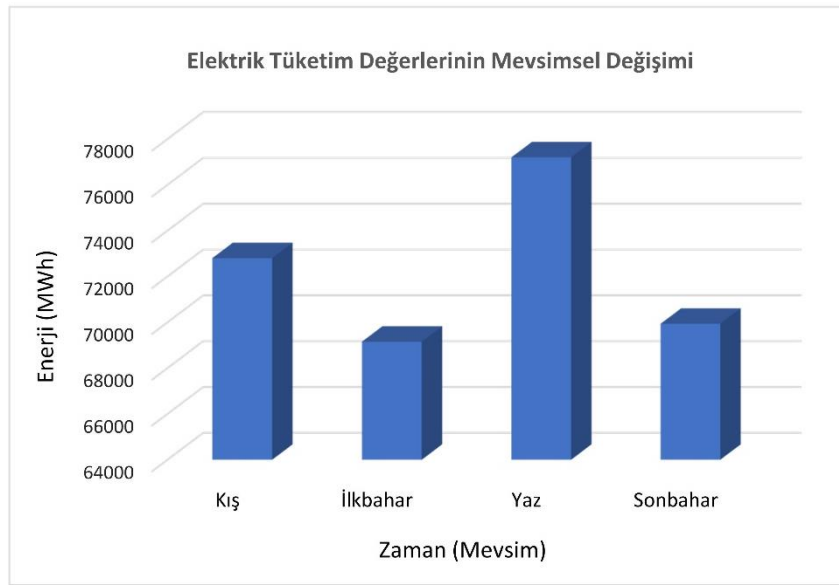
A. Veri Tanımı

Bu çalışmada, Türkiye Elektrik İletim Anonim şirketinden alınan 1 Ocak 2019 ile 31 Aralık 2019 dönemine ait elektrik yük talebi verileri kullanılmıştır. Saatlik frekansta toplam 8760 adet veri Makine Öğrenmesi algoritmaları kullanılarak eğitilmiştir [24]. Çalışmada kullanılan bir yıllık elektrik üretim verileri Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. 1 Ocak 2019-31 Ocak 2019 tarihlerinde üretilen saatlik elektrik tüketim verileri

Veriler incelendiğinde elektrik tüketiminin mevsimsel bir trend sergilediği görülmektedir. Tüketim verilerinin mevsimsel değişimini daha detaylı görebilmek için saatlik verilerin mevsimsel olarak ortalamaları alınmış ve Şekil 2'deki gibi oluşturulmuştur.

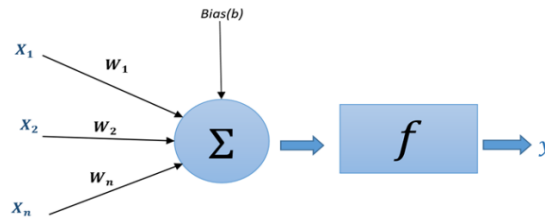


Şekil 2. Tüketim verilerinin mevsimsel değişimi

Doğrusal bir trende sahip olmayan bu verilerin modellenmesi oldukça karmaşık ve zor olduğu için klasik tahmin yöntemleri yerine Makine Öğrenmesi yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. [25,26].

B. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları; tıpkı insan beyni gibi katmanlı yapısı ile makineye sayısal olarak tüm işlevleri yaptırabilen bir modeldir. Ağın yapısı biyolojik sinir ağı yapısına benzemektedir. YSA'nın en önemli özelliği modele sunulan veri setini öğrenerek istenilen sonuca uygun tahmin ya da sınıflandırma yapabilmesidir. Veri seti üzerinde çalışarak ağın ağırlıkları belirlenir. Her bir ağırlık(w) her bir girdi değerleri(x) ile çarpılıp toplandıktan sonra bir aktivasyon fonksiyonunda işlenir ve çıktı katmanına gönderilir. YSA'nın kaç gizli katmanı ve kaç nöronu olacağı çalışmanın durumuna ve istenilen sonuca göre değişiklik gösterir. Bir YSA modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3.Yapay sinir ağı modeli

En genel haliyle bir YSA'nın matematiksel ifadesi Denklem 1'de verilmiştir.

$$y = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

Burada x_i ağın girdi değerleri, w_i sistemin ağırlıkları ve y ise çıktı değerleridir.

C. Regresyon Yöntemi

Regresyon yöntemi, bilinen bir değerden bilinmeyen bir durumu belirlemek olarak adlandırılabilir. Bu yöntem içerisinde bağımlı ve bağımsız değişkenler mevcuttur. Model oluşturulurken istenilen duruma göre bağımsız değişken bir veya daha fazla olabilir. Regresyon yöntemi değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklayabildiği gibi bilinen durumlardan bilinmeyen durumları da tahmin edebilmektedir.

Tek bağımsız değişkeni olan regresyona basit regresyon, birden fazla değişkeni olan regresyona ise çok değişkenli regresyon denilmektedir. Çok değişkenli bir regresyon modelinin matematiksel ifadesi Denklem 2'de verilmiştir [27].

$$\beta = \beta^{arg\ min}\{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i'\beta)^2\} \quad (2)$$

Denklem 2'de β katsayısı bağımsız değişkenlerin etkisini kontrol eder. Hata terimleri ε ile gösterilmektedir ve rassal bir dağılım söz konusudur. Burada $\beta^{arg\ min}$ doğrunun y eksenini kestiği yer ve regresyon sabitidir. β ise doğrunun eğimidir.

1) *Ridge Regresyon*: Doğrusal regresyonda hesaplanan varyansların büyük olması tahmini gerçek değerlerinden uzaklaştırmaktadır. Ridge Regresyon, çoklu doğrusal bağlantıda çoklu regresyon verilerini analiz etmek için kullanılan sapmalı bir tahmin yöntemidir. Doğrusal regresyonun bir dalı olan Ridge Regresyonda hatalar minimize edilerek hata fonksiyonu değiştirilmektedir. Bu değişikliği modelin β katsayılarının karesini bir ceza parametresi (λ) ile çarparak yapmaktadır. Bu sayede Doğrusal Regresyonda oluşan hatalar Ridge Regresyonda minimize edilmiş olacaktır [27]. Ridge Regresyon modelinin matematiksel ifadesi Denklem 3'teki gibi verilmiştir.

$$\beta^{rdg} = \beta^{arg\ min}\{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i'\beta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2\} \quad (3)$$

2) *Lasso Regresyon*: Lasso Regresyon doğrusal regresyon modelini iyileştirmek için geliştirilen yöntemlerden biridir. Çoklu doğrusal regresyonda değişken sayısı arttıkça kurulan modelde bir süre sonra aşırı öğrenmeye gidilmektedir. Bu durum tahmin sonuçlarını gerçek sonuçlardan uzaklaştırmaktadır. Diğer bir problem ise sıfırdan farklı katsayı arttıkça modeli açıklamak zorlaşabilmektedir. Lasso Regresyon'un amacı doğrusal regresyondaki sorunları azaltıp tahminin doğruluğunu artırmaktır. Bunun için modele bir ceza terimi olan λ katsayısı uygulanmaktadır. λ modeldeki hata kareler toplamını minimize eden terimdir. Modele uygulanan λ parametresinin seçimi modelin daha doğru çalışabilmesi için oldukça önemlidir. Eğer λ aşırı yüksek seçilirse katsayılar sıfır olabilir ve model kavramını ortadan kaldırabilir. λ sıfır olursa klasik regresyon analizi yapılmış olur. Bu sebeplerden dolayı λ 'nın optimal değeri yaygın olarak çapraz doğrulama metodu ile belirlenir. Lasso Regresyon'un matematiksel ifadesi Denklem 4'te verilmiştir [12, 13, 27].

$$\beta^{lasso} = \beta^{arg\ min}\{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i'\beta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j|\} \quad (4)$$

3) *Destek Vektör Regresyonu*: Destek vektör regresyonu, denetimli makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir. Bu regresyon modelinin temelini doğrusal olmayan bir fonksiyonun girdi verilerinin eşleştiği yüksek boyutlu bir girdi uzayında doğrusal regresyonun hesaplanması oluşturmaktadır. Böylece düşük boyutlu doğrusal olmayan bir regresyon probleminin çözümü yüksek boyutlu bir uzayda gerçekleştirilmektedir [27]. Destek vektör regresyonunun optimizasyonu için kernel parametresi (γ), ceza faktörü (C), epsilon değeri (ε) gibi hiper parametrelere ait değerlerdeki değişiklikler incelenebilmektedir [28]. Destek vektör regresyon modelinin matematiksel ifadesi Denklem 5'te verilmiştir.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) < x_i, x > + b \quad (5)$$

Makine öğrenmesi yöntemlerinde performans değerlendirmek için çeşitli ölçütler kullanılmaktadır. Seçilen performans değerlendirme ölçütleri modele ve veri setine göre farklılık göstermektedir. Bu performans değerlendirme ölçütleri arasında en sık kullanılanlar, Açıklayıcılık Katsayısı (R^2), Ortalama Hata Kare Kökü (Root Mean SquareError-RMSE), Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE)'dir. RMSE ve MAE birer hata ölçüsü olduklarından performans değerlendirme de bu ölçütlerin ne kadar küçük olduğuna bakılmaktadır. RMSE sıfıra yakın veya sıfır gibi bir değer ise yapılan tahminin oldukça başarılı olduğu yorumu yapılabilmektedir [28]. R^2 performans ölçütü ise modelin doğruluğunu açıklamaktadır. R^2 ne kadar 1'e yakınsa modelin doğruluğu ve açıklanabilirliği o kadar yüksektir.

Enerji arz-talep dengesini sağlamak adına yük talep tahmini oldukça önemli bir yere sahiptir. Bunun için seçilen yöntemin hem veri setine uygun olması hem de performansının yüksek olmasına dikkat etmek gerekir [29]. Bu çalışmada, daha yüksek bir model performansını sağlamak için yük talep tahmininde makine öğrenmesi yöntemlerinden Ridge Regresyon, Lasso Regresyon, Destek Vektör Regresyonu ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri ile yük tahmini yapılmış ve performans değerlendirmek için literatürde sıklıkla kullanılan RMSE, MAE ve R^2 kriterleri kullanılmış ve sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde farklı makine öğrenmesi yöntemleri, 2019 yılına ait Türkiye'nin toplam elektrik tüketim verileri kullanılarak Matlab R2020b yazılımı ile test edilmiştir. Öncelikle veriler hazırlanmış, değerlendirme kriterleri hesaplanmış ve sonuçlar hem sayısal hem de grafiksel olarak verilmiştir.

A. Veri Düzenleme ve Değerlendirme Ölçütleri

Bu çalışmada, çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarının uygulanabilirliği ve performansı test edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle; 1 Ocak 2019 ile 31 Aralık 2019 tarihleri arasında gerçek zamanlı saatlik frekansta ölçülen 8760 adet veri seti eğitimin daha verimli hale getirilebilmesi için normalleştirilmiştir. Veri normalleştirme tekniklerinden biri olan ve literatürde sık karşılaşılan Min-Max yöntemi ile veriler 0-1 aralığında olacak şekilde tekrar düzenlenmiştir [30]. Denklem 6'da Min-Max yöntemine ait formül verilmiştir.

$$x' = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (6)$$

Burada x' normalleştirilmiş veriyi, x_i girdi verisini, x_{min} girdi veri seti içerisindeki en küçük değeri, x_{max} ise girdi veri seti içerisindeki en büyük değeri ifade etmektedir [30]. Sonrasında tahmin değişkenleri dört, üç, iki, bir saat önceki veriler olarak belirlenmiş ve bir saat sonrası tahmin edilmeye çalışılmıştır. Verinin %80'i eğitim, %20'si de test verisi olarak ayrılmıştır. Bu doğrultuda, 1 Ocak 2019-19 Ekim 2019 tarihleri arasında ölçülen 7008 adet veri modele eğitim, 20 Ekim 2019- 31 Aralık 2019 tarihleri arasında ölçülen 1752 adet veri ise modele test verisi olarak sunulmuştur.

Önerilen modellerin tahmin performansını değerlendirmek için literatürde sık kullanılan istatistiki değerlendirme ölçütlerinden Ortalama Hata Kare Kökü (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve doğruluk kriterinden olan Belirleme Katsayısı R^2 kullanılmıştır [31-35]. RMSE, modeldeki tahmin hatalarının standart sapmasını hesaplamaktadır. Denklem 7 ile ifade edilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n)^2}{N}} \quad (7)$$

MAE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkın ortalama mutlak sapmasıdır. Denklem 8 ile ifade edilmiştir [35].

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_n - \hat{y}_n|}{N} \quad (8)$$

R^2 , modellerden tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi hesaplamaktadır. Denklem 9'da verilmiştir [35].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n)^2}{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y}_n)^2} \quad (9)$$

Değerlendirme ölçütleri olarak kullanılan Denklem (7)-(9)'daki y_n n. zamanda gözlenen veri değeri, \hat{y}_n tahmin edilen değeri, \bar{y}_n verilerin ortalamasını, N ise gözlem sayısını ifade etmektedir [15,35].

B. Modellerden Elde Edilen Sonuçlar

Makine öğrenmesi metodlarında model başarısını etkileyen çeşitli hiper parametreler bulunmaktadır. Uygun parametre değerleri, tahminde hatayı azaltmakta başarı oranını artırmaktadır [15,35]. Ridge ve Lasso Regresyon modellerinde hatayı minimize etmek amacıyla ceza katsayısı olan λ 'ya 0 ile 1 arası değişen çeşitli değerler verilerek hata ölçütlerinden RMSE ve MAE sonuçları hesaplanmıştır. Her iki model için en düşük hatayı veren λ değeri Ridge Regresyon için 0,012, Lasso Regresyon için 0,899 olarak bulunmuştur.

Destek Vektör Regresyonunda model hassasiyetini belirleyen hiper parametrelerden biri epsilon (ϵ) değeridir. ϵ değerinin çok yüksek seçilmesi veri üzerinde fazla basınç oluşturacağından, destek vektörlerinin sayısını azaltıp tahmin doğruluğunu düşürecektir. Modele 0 ile 1 arasında değişen farklı ϵ değerleri uygulandığında hata değerini en düşük hesaplayan ϵ değeri 0,54 olarak tespit edilmiştir.

YSA'da model üç adet gizli katman ve bir adet çıkış katmanından oluşmuştur. Sistemin üreteceği çıktıyı belirlemek için hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

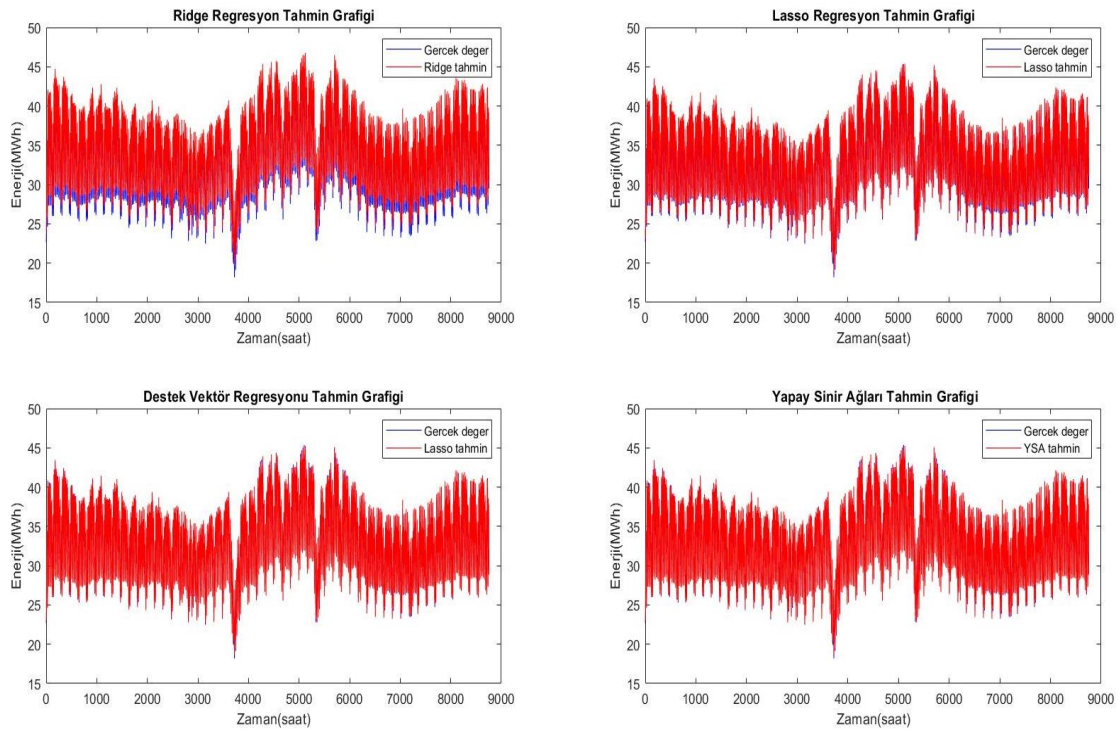
Parametre ayarları tamamlandıktan sonra modeller ayrı ayrı eğitilmiştir. Her modelin RMSE, MAE ve R^2 değerleri hesaplanmış ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Modellerden elde edilen performans sonuçları

Modellerden Elde Edilen RMSE, MAE ve R^2 Değerleri			
	RMSE (MWh)	MAE (MWh)	R^2
Ridge Regresyon	1,45	1,30	0,961
Lasso Regresyon	2,00	1,49	0,831
Destek Vektör Regresyonu	0,94	0,67	0,961
Yapay Sinir Ağları	0,86	0,62	0,97

Tahminlerde RMSE ve MAE gibi hata ölçüt kriterlerinin küçük olması gerçeğe yakın tahminler yapıldığını ve R^2 değerinin yüksek olması ise tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Makine öğrenmesi yöntemleri ile tahminde başarılı sonuçlar alınıyor olması araştırmacıların ilgi odağı olmaya başlamıştır [1,7,8,15].

Modellerin sonuçlarından elde edilen, gerçek ve tahmini değerleri gösteren grafikler Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Modellerden elde edilen tahmin grafiği

Türkiye elektrik talebinin saatlik tahmini için belirlenen modellerin güvenilirliğine yönelik yapılan analizler sonucunda dört farklı yöntem ile tahmin yapılmış ve modellerin performansı gerekli hiper parametre ayarları yapıldıktan sonra RMSE, MAE ve R^2 ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Tahmin modellerinden beklenen başarı hatası az, doğruluğu yüksek sonuçlar üretmektir. Bu amaç doğrultusunda modellerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve YSA’nın diğer modellere göre hata değerleri oldukça düşük, doğruluk kriteri ise 0,97 ile oldukça başarılı çıkmıştır. Çalışmada başarılı olan modelin performans sonuçları literatürde kullanılan ve güncel çalışmalardan oluşan tahmin modelleri ile kıyaslaması Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarının yapılan çalışma ile kıyaslanması

Yazarlar	Yayın Tarihi	Tahmin Yöntemi	Değerlendirme Ölçütleri	Veri Seti
Haliloğlu vd. [1]	2018	EKK	$R^2 = 0,928$	1945 adet gerçek zamanlı veri seti
Allee vd. [5]	2021	Lasso Regresyon	RMSE=13,5 MAE=3,5 MAPE=%37	1378 adet gerçek zamanlı veri seti
Bitirgen ve Filik [7]	2020	XGBoost	MAE= 101,3 MAPE=306,9 RMSE=99,4	8760 adet gerçek zamanlı veri seti
Alsafadi vd. [8]	2020	Destek Vektör Regresyonu	RMSE=63,86 $R^2 = 0,97$	8760 adet gerçek zamanlı veri seti
Mitchell vd. [19]	2017	Yapay Sinir Ağları	MAPE = 1,04	15960 adet gerçek zamanlı veri seti
Mohammad vd. [20]	2018	Derin Öğrenme	MAPE = 0,58	62104 adet gerçek zamanlı veri seti
Yıldırım vd. [23]	2018	Yapay Sinir Ağları	$R^2 = 0,92$	4018 adet gerçek zamanlı veri seti
Bekçioğulları vd. [32]	2021	Destek Vektör Makinesi	RMSE=0,04 MAE=0,037 $R^2 = 0,97$	8760 adet gerçek zamanlı veri seti
Kuşkapan vd. [33]	2022	Yapay Sinir Ağları	$R^2 = 0,97$	1977-2019 yıllık veri seti
Yapılan Çalışma	2022	Yapay Sinir Ağları	RMSE=0,85 MAE=0,62 $R^2 = 0,97$	8760 adet gerçek zamanlı veri seti

Tablo 2 incelendiğinde tahmin için yeterli veri seti olduğu görülmektedir. Güncel literatür çalışmalarının tahmin sonuçları incelendiğinde bazılarında sadece hata değerlendirme ölçütleri kullanılıyorken bazılarında ise sadece doğruluk ölçütlerine göre değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmada hem hata hem de doğruluk ölçütlerine göre modellerin performansı değerlendirilmiş ve hata değerleri oldukça düşük, R^2 değeri oldukça yüksek çıktığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar diğer çalışmalarla kıyaslandığında bu çalışmada YSA'da oluşturulan modelin başarısı oldukça yüksek gözlenmiştir.

Çalışma sonuçlarının makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak yük talep tahmininin modellendiği araştırmalar için en uygun yöntemin belirlenmesi konusunda literatüre katkı sağladığı ve elde edilen başarılı tahmin sonuçlarına göre enerji piyasası yatırımcılarına doğru bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

IV. SONUÇ

Yapılan çalışmada çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketinden saatlik periyotlarda elde edilen tüketim verileri ile en doğru tahmini yapan yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada, literatürde sık kullanılan makine öğrenimi modellerinden Ridge Regresyon, Lasso Regresyon, Destek Vektör Regresyonu ve YSA kullanılarak performansları incelenmiştir.

Oluşturulan modellerdeki hiper parametre değerleri hataları minimize edecek şekilde ayarlanmış ve başarı performansları kıyaslanmıştır. Çalışmada seçilen yöntemlerde düzenleyici hiper parametreler; Lasso ve Ridge Regresyon için λ , Destek vektör regresyonu için ϵ ve YSA için ise w tahmin doğruluğunu etkileyen faktörlerdir.

Yük talep tahmininde amaç hatayı en aza indirip doğruluğu ve güvenilirliği artırmaktır. Bu çalışmada performans değerlendirme ölçütlerinden hata ölçütü olan RMSE ve MAE, doğruluk ölçütü olan R^2 değeri kullanılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde çalışmada kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarından YSA modeli hem hata hem de doğruluk testlerinde daha başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca çalışmamız literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında doğruluk ölçüt değeri olan R^2 yüksek sonuç vermiştir. İleriki çalışmalarda Makine Öğrenmesi yöntemleri ve Derin Öğrenme yöntemleri kullanılarak performans sonuçlarının incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Haliloğlu, Y.E., & Tutu, E. B. (2018). Türkiye İçin Kısa Vadeli Elektrik Enerjisi Talep Tahmini. *Journal of Yasar University*, 13-51, 243-255.
- [2] Kell, A.J.M, McGough, A.S., & Forshaw, M., (2021). The impact of online machine-learning methods on long-term investment decisions and generator utilization in electricity markets. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 30.

- [3] Naik, J., Bisoi, R., & Dash, P.K., (2018). Prediction interval forecasting of wind speed and wind power using modes decomposition based low rank multi-kernel ridge regression. *Renewable Energy*, 129, 357-383.
- [4] Lv, J., Zheng, X., Pawlak, M., Mo, W., & Miskowicz, M. (2021). Very short-term probabilistic wind power prediction using sparse machine learning and nonparametric density estimation algorithms. *Renewable Energy*, 177, 181-192.
- [5] Allee, A., Williams, N.J., Davis, A., & Jaramillo P. (2021). Predicting initial electricity demand in off-grid Tanzanian communities using customer survey data and machine learning models. *Energy for Sustainable Development*, 62, 56-66.
- [6] Yildiz, B., Bilbao, J.I., & Sproul, A.B. (2017). A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1104-1122.
- [7] Bitirgen, K., & Filik, Ü.B. (2020). Electricity Price Forecasting based on XGBooST and ARIMA Algorithms. *BSEU Journal of Engineering Research and Technology*, 1, 1.
- [8] Alsafadi, M., & Filik, Ü.B. (2020). Hourly Global Solar Radiation Estimation Based On Machine Learning Methods in Eskişehir. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology*, 21(2), 294- 313.
- [9] Yürek, E.Ö., Birant, D., & Yürek, İ. (2021). Wind Power Generation Prediction Using Machine Learning Algorithms. *Dokuz Eylül University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, 67, 107-119.
- [10] Ali, S., Mansoor, H., Khan, I., Arshad, N., Khan, M.A., & Faizullah, S. (2020). Short-Term Load Forecasting Using AMI Data. *Electrical Engineering and Systems Science*, Signal Processing August 13, 2020, Cornell University.
- [11] Huo, J., Shi, T., & Chang, J. (2016). Comparison of Random Forest and SVM for Electrical Short-term Load Forecast with Different Data Sources. 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), 26-28 Aug. 2016, Beijing, China.
- [12] Wang, Y., Shen, Y., Mao, S., Chen, X., & Zou, H. (2019). LASSO and LSTM Integrated Temporal Model for Short-Term Solar Intensity Forecasting. *IEEE Internet of Things Journal*, 6, 2.
- [13] Küçük, A. (2019). *Doğrusal Regresyonda Ridge, Liu ve Lasso Tahmin Edicileri Üzerine Bir Çalışma*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, İstatistik Anabilim Dalı, Ankara.
- [14] Shirzadi, N., Nizami, A., Khazen, M., & Bakht, N.M. (2021). Medium-Term Regional Electricity Load Forecasting through Machine Learning and Deep Learning. *Designs*, 5(2), 27.
- [15] Kaur, M., Panwar, S., Joshi, A., & Gupta, K. (2021). *Residential Electricity Demand Prediction using Machine Learning*. International Semantic Intelligence Conference, February 25-27, New Delhi, India.
- [16] Waciko, K.J., & Ismail, B. (2020). Performance of Shrinkage Methods for Forecasting GDP. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29 (5), 7792-7799.
- [17] Portabales, A.R., Nores, M.L., & Arias, J.J.P. (2021). Systematic review of electricity demand forecast using ANN-based Machine Learning algorithms. Preprints (www.preprints.org), Not Peer-Reviewed, Posted: 21 May.
- [18] Khan, P.W., Byun, Y.C., Lee, A.J., Kang, D.H., Kang, J.Y., & Park, H.S. (2020). Machine Learning-Based Approach to Predict Energy Consumption of Renewable and Nonrenewable Power Sources. *Energies*, 13, 2681.
- [19] Mitchell, G., Bahadoorsingh, S., Ramsamooj, N., & Sarmaca., (2017). A Comparison of Artificial Neural Networks and Support Vector Machines for Short-term Load Forecasting using Various Load Types. 2017 *IEEE Manchester PowerTech*, 117044934.
- [20] Mohammad, F., Lee, K.B., & Kim, Y.C., (2018). *Short Term Load Forecasting Using Deep Neural Networks*. International Symposium on Information Technology Convergence, 2018, South Korea.
- [21] Küçük, D., & Gezer, D. (2020). *Enerji Alanındaki Tahmin Problemleri İçin Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemlerinin Kullanılması*. Elektrik İletim ve Üretiminde Enerji Verimliliği Sempozyumu, 2020, Ankara.
- [22] Işıl, M., & Bulut, Y.M. (2021). Farklı Yanlılık Parametreleri İçin Ridge GM Tahmin Edicilerinin Performanslarının Karşılaştırılması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 203-216.
- [23] Yıldırım, A., & Kandemir, S.Y. (2018). Yağış Miktarının Yapay Sinir Ağları ile Tahmini. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 97-104.
- [24] TEİAŞ. (2021). Yıllık Rapor. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, (Erişim tarihi: 20.05.2021).
- [25] Aydın, D., Kavak A. F., & Toros H. (2015). *Isınma ve Soğuma Derece Günlerin Elektrik Tüketimi Üzerindeki Etkisi*. 7th Atmospheric Sciences Symposium, 2015, İstanbul.

- [26] Nebati, E.E., Taş, M., & Ertaş, G. (2021). Türkiye’de Elektrik Tüketiminde Talep Tahmini: Zaman Serisi ve Regresyon Analizi ile Karşılaştırma. *European Journal of Science and Technology*, 31, 348-357.
- [27] Demirezen, S., & Çetin, M. (2021). Rassel Orman Regresyonu ve Destek Vektör Regresyonu ile Piyasa Takas Fiyatının Tahmini. *Journal of Quantitative Sciences*, 3(1), 1-15.
- [28] Çınaroğlu, S. (2017). Sağlık Harcamasının Tahmininde Makine Öğrenmesi Regresyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(2), 179-200.
- [29] Demir, Y. (2021). Çoklu Doğrusal Regresyon ve Bazı Cezalı Tahmin Yöntemlerinin İncelenmesi. Gece Kitaplığı, Sosyal ve Beşerî Bilimlerde Teori ve Araştırmalar II, pp.261-276, Chapter 44.
- [30] Yavuz, S., & Deveci, M. (2013). Statiksel Normalizasyon Tekniklerinin Yapay Sinir Ağın Performansına Etkisi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40, 167-187.
- [31] Hahn, H., Meyer-Nieberg, S., & Pickl, S. (2009). Electric load forecasting methods: Tools for decision making. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 902-907.
- [32] Bekçioğulları, M. F., Dikici, B., Açıkgöz, H., & Keçecioglu, Ö.F. (2021). Güneş Enerjisinin Kısa-Dönem Tahmininde Farklı Makine Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *EMO Bilimsel Dergi*, 11, 22.
- [33] Kuşkapan, E., Çodur, M. K., & Çodur, M.Y. (2022). Türkiye’deki Demiryolu Enerji Tüketiminin Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(1), 72-84.
- [34] Özkan, E., Güler, E., & Aladağ, Z. (2020). Elektrik Enerjisi Tüketim Verileri İçin Uygun Tahmin Yöntemi Seçimi. *Journal of Industrial Engineering*, 31(2), 198-214.
- [35] Kara, A. (2019). Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Kullanarak Global Güneş Işınımı Zaman Serileri Tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C*, 7(4), 882-892.

Araştırma Makalesi - Research Article

Farklı Bekletme Süreli Derin Kriyojenik İşlemin Sementasyon Çeliğinin Korozyon Davranışına Etkisinin Araştırılması

Investigation of the Effect of Deep Cryogenic Treatment with Different Holding Time on the Corrosion Behavior of Cementation Steel

Furkan Güney^{1*}, Menderes Kam², Hüsnü Gerengi³, Ertuğrul Kaya⁴, Mesut Yıldız⁵

Geliş / Received: 09/11/2021

Revize / Revised: 11/08/2022

Kabul / Accepted: 17/09/2022

ÖZ

Bu çalışmada sementasyon çeliğinin %3,5 NaCl ortamındaki korozyon davranışına, uygulanan gaz sementasyon, temperleme ve farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin (-196 °C'de 24, 36, 48 saat) etkisi araştırılmıştır. Beş farklı grupta sınıflandırılan numunelerin korozyon testleri; Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) yöntemiyle incelenmiş ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile metal yüzeyinin ne kadar bozulduğu görsel olarak bakılmış ve Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ile analiz edilmiştir. Bulgular, sementasyon, temperleme ve kriyojenik işlem uygulamalarının sementasyon çeliğinin korozyon hızını azalttığını göstermektedir. Sementasyon işlemi sonrasında 24 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlem yapılan N3 numunesinin diğer numunelere göre %3,5 NaCl ortamında çok daha az korozyona uğradığı yapılan elektrokimyasal ve yüzey görüntüleme yöntemleriyle ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler- *Sementasyon çeliği, Kriyojenik işlem, Korozyon, Sementasyon, Temperleme*

ABSTRACT

In this study, the effect of gas cementation, tempering and deep cryogenic treatment with different holding times (24, 36, 48 hours at -196 °C) on the corrosion behavior of cementation steel in 3,5% NaCl environment was investigated. The corrosion tests of the samples classified in five different groups were examined with the Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) method, the degradation of the metal surface was visually investigated with the Scanning Electron Microscope (SEM), and the chemical composition of the surface was determined by Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). The findings show that cementation, tempering and cryogenic treatment applications reduce the corrosion rate of cementation steel. It has been demonstrated by electrochemical and surface imaging methods that the N3 sample, which applied deep cryogenic treatment with 24 hours holding time after cementation, is much less corroded in 3,5% NaCl environment than other samples.

Keywords- *Cementation steel, Cryogenic treatment, Corrosion, Cementation, Tempering*

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: furkanguney@duzce.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7147-7242>)

Dr. Engin PAK Cumayeri Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, Düzce Üniversitesi, Düzce/Türkiye

²İletişim: mendereskam@duzce.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9813-559X>)

Dr. Engin PAK Cumayeri Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, Düzce Üniversitesi, Düzce/Türkiye

³İletişim: husnugerengi@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-9663-4264>)

Korozyon Araştırma Laboratuvarı, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce/Türkiye

⁴İletişim: ertugrul.kaya.92@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1579-6411>)

Korozyon Araştırma Laboratuvarı, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce/Türkiye

⁵İletişim: mesutyildiz@duzce.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6964-6705>)

Korozyon Araştırma Laboratuvarı, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce/Türkiye

I. GİRİŞ

İmalat endüstrisinde uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmasına karşın günümüzün büyüyen teknolojiyle birlikte daha üstün özelliklere sahip çelik malzemelere ihtiyaç vardır. Bu sebeple, özellikle korozyon nedeniyle oluşan malzeme kayıplarını önlemek amacıyla farklı bileşenlere sahip çelik türleri geliştirilmiştir. Dişli çark, pim, mil, makine ve otomobil parçalarının üretiminde yaygın kullanıma sahip AISI 8620 sementasyon çeliği bu eksikliği gidermek amacıyla geliştirilen çelikler arasındadır [1-3]. Bu çeliğin mekanik özellikleri ve korozyon dirençlerini geliştirilebilmesi için krom, nikel, molibden, tungsten ve vanadyum gibi seçkin alaşım elementlerinin ilavesine ihtiyaç duyulmaktadır [4]. Çeliklerin bu özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden birisi de sıcaklık kontrolü ile mümkün olmaktadır. Bu bağlamda, geleneksel ısıtma işlemi tamamlayıcı olarak kullanılan kriyojenik işlem, malzemenin özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla uygulanan yeni bir yöntemdir. Literatürde kriyojenik işlem, malzemeleri oda sıcaklığından sıfırın altındaki sıcaklık değerlerine belirli hızlarla kontrollü olarak soğutmak, bu sıcaklıklarda belirlenen sürelerde bekletmek ve sonrasında belirli hızlarla oda sıcaklığına tekrar ısıtmak olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem, -80 °C sıcaklıklara kadar uygulanıyorsa sığ kriyojenik işlem, -196 °C sıcaklıklara kadar uygulanıyorsa derin kriyojenik işlem olarak iki farklı şekilde uygulanmaktadır [5]. Derin kriyojenik işlem, kriyojenik işlemin dışında daha belirli özellikleri geliştirmeye yardımcı olur [6]. Kriyojenik işlem, malzemenin iç yapısında değişimlere sebep olarak malzemeye istenilen fiziksel ve mekanik özelliklerin kazandırılmasını amaçlamaktadır. Ayrıca, kaplamaların aksine malzemenin tüm iç ve dış yapısını etkileyen, bir kere yapılan özel kalıcı bir işlem türüdür [7]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde çeliklerin korozyon davranışlarının geliştirilmesine yönelik birçok çalışma yapıldığı, ancak farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin korozyon davranışına etkisi ile ilgili fazla çalışma yapılmadığı görülmektedir. Karacif ve ark. [8], yapmış oldukları çalışmada AISI 1020 çeliğine düşük oranlarda yaptıkları bor ilavesinin, asidik ve tuz ortamlarında korozyon direncini olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Kayalı ve ark. [9], borlanmış D2 çeliğinin elektrokimyasal korozyon davranışını incelemişlerdir. %3,5 NaCl ortamında gerçekleştirilen elektrokimyasal deneyler sonucunda borlanmış çeliklerin korozyon dirençlerinde borlanmamış çeliklere göre artışın yaşandığını belirtmişlerdir. Jovi'cevi'c-Klug ve ark. [10], yaptıkları çalışmada AISI 52100 ve AISI D3 çeliklerin korozyon direncine derin kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Deney numunelerine geleneksel ısıtma işlemi ve tamamlayıcı olarak -196 °C'de 24 saat bekletmeli olarak derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. Elektrokimyasal deneyler sonucunda kriyojenik işlemin çeliklerin korozyon direncini artırmada etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Demir ve Uygur [11], yaptıkları çalışmada AZ63 magnezyum alaşımına -80 °C'de 24 ve 48 saat bekletmeli kriyojenik işlem uygulayarak numunelerin EIS yöntemi ile korozyon direncindeki değişimleri incelemişlerdir. Kriyojenik işlemle birlikte korozyon direncinde kayda değer bir artış yaşandığını belirtmişlerdir. AISI 8620 sementasyon çelikleri son yıllarda endüstride birçok makine parçası imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak düşük korozyon dirençleri problem oluşturmaktadır. Bu bağlamda, literatürde henüz çalışma yapılmamış olan AISI 8620 sementasyon çeliğine farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin etkisinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle bu çalışmada, AISI 8620 çeliğine uygulan sementasyon ve farklı bekletme süreli (-196 °C'de 24, 36 ve 48 saat) derin kriyojenik işlemin %3,5 NaCl ortamında korozyon davranışına etkisi araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

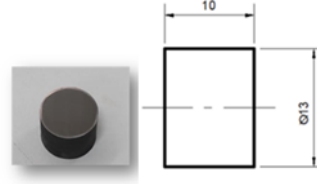
Günümüzün üstün imalat çelikleri arasında yer alan AISI 8620 sementasyon çeliği numunelerine, ısıtma işlem süreci olarak uygulanan sementasyon ve tamamlayıcı bir işlem olan derin kriyojenik işlemin korozyon davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Nihat Uyar Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen AISI 8620 çelik numunelerinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi

Element	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S
(Wt %)	0,19	0,75	0,22	0,47	0,19	0,43	0,005	0,004

AISI 8620 çeliğinden Şekil 1'deki ölçülerde hazırlanan numunelere uygulanan ısıtma işlem süreçleri Tablo 2'de verilmiştir. Numunelerden, standart numune N1 olarak kodlanmış olup herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Diğer numuneler başlangıçta, atmosfer kontrollü ısıtma fırınında 400 °C sıcaklığa ısıtılarak ½ saat ön ısıtma, 900 °C sıcaklığa ısıtılmasının ardından 4 saat boyunca % 33 H₂, % 28 CO, % 0,8 CH₄ ile C₃H₈ karışımı karbonlama gaz içeriğinde sementasyon işlemi ve ardından sertleşme işlemi için 70 °C yağda su verilmiştir. Sertleştirme işlemi sonrasında N2 kodlu numuneye 200 °C'de 2 saat temperleme işlemi, N3 numunesine -196 °C'de 24 saat, N4

numunesine 36 saat, N5 numunesine ise 48 saat bekleme sürelerinde derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem uygulanan N3, N4 ve N5 numunelerine son aşama olarak 200 °C’de 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır.



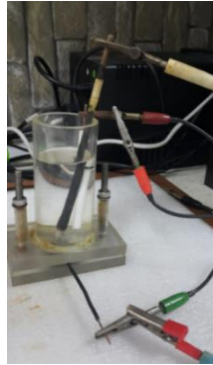
Şekil 1. Korozyon numunesi

Tablo 2. AISI 8620 çeliği numunelerin ısıtılma süreci

No	Numune Kodu	Uygulanan Isıl İşlemler		
1	N1	-	-	-
2	N2	Sementasyon	-	Temperleme (2saat)
3	N3	Sementasyon	Derin Kriyojenik İşlem (24 saat)	Temperleme (2saat)
4	N4	Sementasyon	Derin Kriyojenik İşlem (36 saat)	Temperleme (2saat)
5	N5	Sementasyon	Derin Kriyojenik İşlem (48saat)	Temperleme (2saat)

A. Korozyon Deney Düzenegi

Korozyon deneyleri oda sıcaklığında üçlü elektrot sistemi kullanılarak yapılmıştır. Referans elektrot olarak Ag/AgCl; karşıt elektrot olarak da 1 cm² alana sahip Pt elektrot kullanılmıştır [12]. Şekil 2’de gösterildiği gibi çalışma elektrotu hücreye bağlanmıştır.



Şekil 2. Deney hücresi

Deney hücresi kullanılan numunelerin sadece 0,785 cm²’lik kesit alanı korozif ortama maruz bırakılacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Korozif ortam olarak % 3,5 NaCl ortamı seçilmiştir [13]. Bu ortam yapay deniz suyunu karşılayacak oranda NaCl içermektedir. Yolların kışın tuzlanması ile sulu çözeltinin de benzer bir konsantrasyonda olduğu kabul edilmektedir [14]. Şekil 3’de belirtildiği gibi deney hücresi GAMRY PC3/600 potansiyostat/ galvanostat/ZRA cihazına bağlanıp elektrokimyasal ölçümler yapılmıştır. Her deney öncesi çalışma elektrotları 2000 numaralı zımpara kâğıtları ile zımparalanarak yüzeyde oluşan oksit tabakalarının giderilmesi sağlanmıştır.



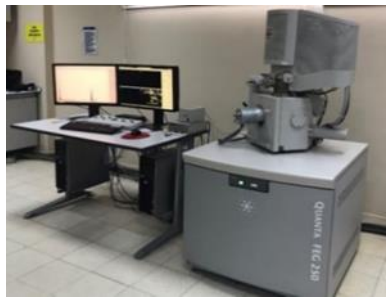
Şekil 3. Elektrokimyasal ölçümlerin uygulandığı düzenek

B. Uygulanan Yöntemler

Çalışma elektrotlarının %3,5 NaCl ortamındaki korozyon dirençleri 2 saat açık devre potansiyeli ölçümünden sonra Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) yöntemi ile araştırılmıştır. EIS yöntemi sonunda numuneler desikatörde 2 saat bekletildikten sonra yüzey görüntüleme işlemleri için hazırlanmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile metal yüzeyinin ne kadar bozulduğu görsel olarak incelenmiş ve Enerji Dağılımlı X-ray kırınımı (EDS) analizi sayesinde araştırılan metal yüzeyde oluşan elementlerin yüzdeleri belirlenmiştir.

1) *Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)*: EIS yöntemi, alternatif akım ile çalışan bir yöntemdir. Belirlenen frekans aralığına bağlı olarak bir sistemin empedansını ölçmek için kullanılan bir elektrokimyasal tekniktir [15]. Sistem ara yüzünde meydana gelen elektrokimyasal etkileşim uygun devre modeli aracılığıyla simule edip hesaplanmaktadır [16]. İncelenen sistem ara yüzünde meydana gelen elektrokimyasal süreçlerin fiziksel temsili olan pasif elektrik bileşenleri (yani dirençler R, kapasitörler C ve endüktanslar L) hesaplanabilmektedir. Tüm EIS analizleri 100.000 ile 0.01 Hz aralığında yapılmıştır. EIS yöntemi ile sırasıyla Nyquist, Bode ve Angle grafikleri elde edilmektedir. Bu grafikler ZSimpWin 3.21 yazılımı kullanılarak analiz edilmektedir [17].

2) *Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)*: Taramalı elektron mikroskobu, yüksek enerjili elektron demetiyle numuneyi satır satır tarayarak numunenin yüzey topografyası ile ilgili görüntü ve kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi vermektedir [18]. Oda sıcaklığında korozyona maruz bırakılan metal numuneler açık havada kurutularak desikatörde saklanmış ve yüzeyinde meydana gelen değişimler Quanta FEG 250 (FEI, Hollanda) model cihaz ile yüksek vakum modu kullanılarak incelenmiştir. Numuneler çift taraflı karbon bant kullanılarak alüminyum numune tutucuların üzerine monte edilmiştir. Yüzey morfolojisi hakkında görüntü alınırken 10KeV'lik hızlandırma voltajı uygulanmıştır.



Şekil 4. Mikroyapı incelemesinde kullanılan SEM Quanta FEG 250 model cihaz

3) *Enerji Dağılımlı X-Ray Kırınımı (EDS)*: SEM ile incelenen numunenin yüzeyinde EDS yöntemi kullanılarak malzemeye özgü elementler karakterize edilmektedir. Odaklanmış elektron demeti ile bombardıman edilen örneğin yüzeyinden X-ışınları salınmaktadır. EDS dedektörü ile belirlenen bu ışınlar malzeme yüzeyinin kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi sağlamaktadır [19]. Korozyon deneyleri sonrasında numunelerin yüzeyindeki elementel bileşim hakkında kalitatif bilgi elde etmek amacıyla EDS yöntemi uygulanmıştır. EDS analizleri 20 KeV'lik hızlandırma voltajı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS analizleri 5 mm çalışma mesafesinde incelenmiştir.

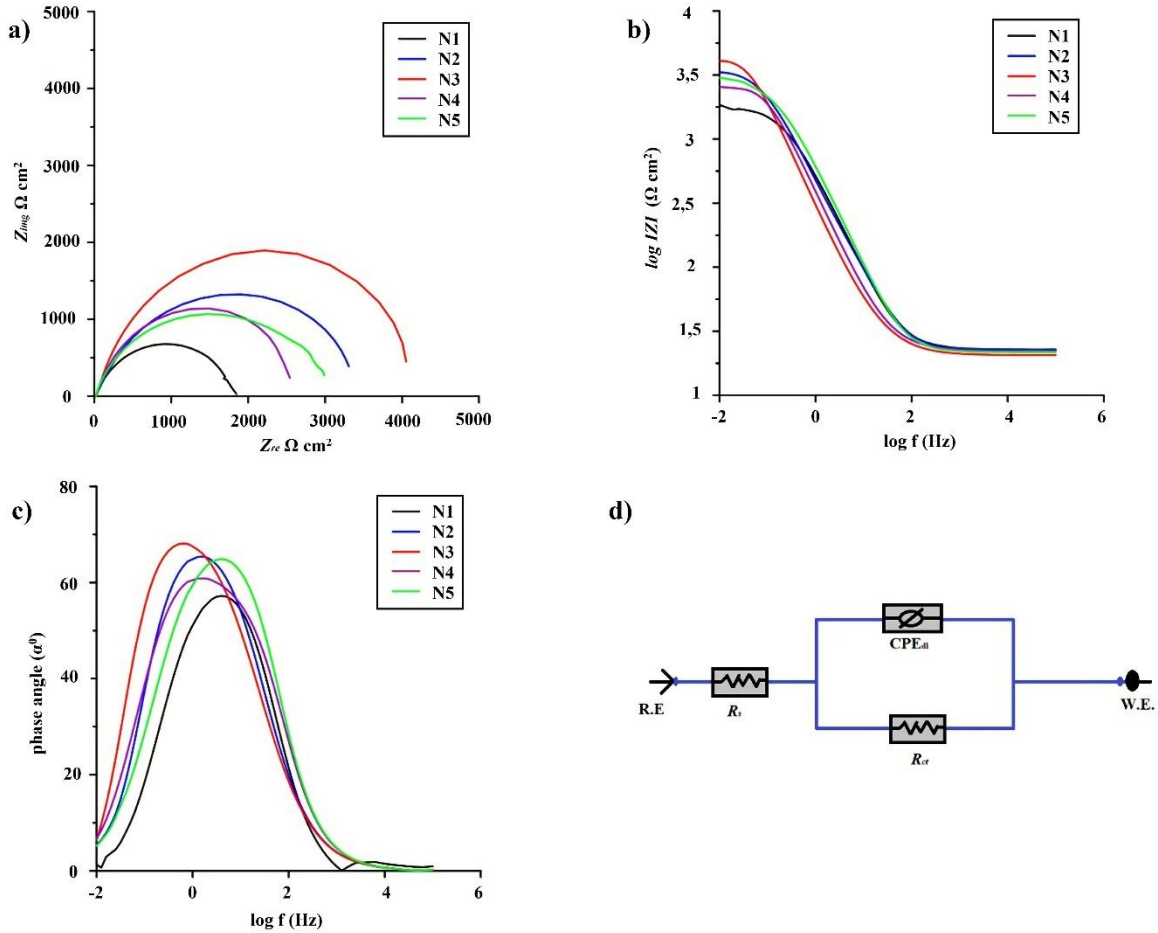


Şekil 5. SEM Quanto FEG 250 model EDS cihazı

III. SONUÇ VE TARTIŞMA

A. EIS Sonuçları

EIS yöntemi analizinde çalışma elektrotu ile çözelti arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu oluşan elektriksel parametreler hesaplanmaktadır. Şekil 5'te EIS analizleri sonucunda elde edilen veriler sırasıyla Nyquist (a), Bode (b) ve Angle (c) grafikleri şeklinde sunulmuştur. Bu grafiklerin elde edilmesinde kullanılan elektriksel devre R(QR) Şekil 6 (d) 'de gösterilmiştir.



Şekil 6. EIS Nyquist (a), Bode (b) ve Angle (c) grafikleri; R(QR) devresi (d)

R(QR) devresindeki ilk R (Direnç); çözelti direncini (R_s), ikinci R ise yük transfer direncini (R_{ct}) ifade etmektedir. Sabit faz elemanı, kusurlu bir kapasitör olan çift katmanın davranışını modelleyen eşdeğer bir elektrik devre bileşenidir ve "Q" ile gösterilir. "Q" değeri; eşdeğer devre modellemesinde ve elektrokimyasal empedans

spektroskopisi verilerinin uyarlamasında kullanılır [20]. Elde edilen tüm elektriksel parametreler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. EIS yöntemi sonunda elde edilen elektriksel parametreler

Numune	R_s	Q	n_{layer}	R_{ct}
	Ω	$P (\mu F/cm^2)$	$0 \leq n \leq 1$	$\Omega.cm^2$
N1	22,59	292,55	0,78	1806,63
N2	22,40	465,80	0,81	3467,20
N3	21,10	668,50	0,83	4706,95
N4	22,41	322,30	0,80	2770,23
N5	21,48	338,60	0,82	3001,65

R_s değerinin tüm numuneler için yaklaşık aynı değerde olduğu görülmektedir. Bu bulgu, çözeltilerin hep aynı standartlarda hazırlandığını göstermektedir. Sementasyon, kriyojenik işlem ve temperleme işlemleri yapılmayan N1 numunesinin R_{ct} değerinin 1806,63 $\Omega.cm^2$ ile diğer çeşitli işlemler yapılan numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Sementasyon ve temperleme işlemi yapılan N2 numunesinin R_{ct} değeri 3467,20 $\Omega.cm^2$ 'dir. Bu sonuca bakılarak işlem yapılmayan numuneye göre N2 numunesinin korozyon direncinde %47,9 düzeyinde bir artış olmuştur.

Sırasıyla 24, 36 ve 48 saat bekleme süreli kriyojenik işlem yapılan N3, N4 ve N5 numunelerinin R_{ct} değerlerindeki artış, uygulanan kriyojenik işlem süresi ile orantılı olmadığı görülmüştür. 24 saat kriyojenik işlem yapılan N3 numunesinin R_{ct} değeri (4706,95 $\Omega.cm^2$) 36 ve 48 saat kriyojenik işlem yapılan numunelerin (N4 ve N5) R_{ct} değerlerinden daha fazladır.

Oda sıcaklığı değerine kadar yapılan geleneksel soğutmayla birlikte çelik numunelerin içeriğinde yüksek oranda kalıntı östenit olarak bilinen metastabil fazı oluşmaktadır. Bu fazını gidermenin en etkili yolu geleneksel soğutmanın ardından tamamlayıcı olarak uygulanan kriyojenik işlemdir [21]. Metallerin korozyona maruz kaldıkları ortamlarda klor iyonlarının varlığı östenit fazını daha fazla korozyona uğratmaktadır. Östenit fazı üzerinde tane sınırlarının değişmesi sonucu meydana gelen ince östenit polarizasyon akım yoğunluğunu artırarak korozyonu hızlandırmaktadır [22]. Kalıntı östenitte meydana gelen mikrogalvanik korozyonun seçici çözünmeye neden olmakta [23] ve çeliklerde sıcaklığa bağlı olarak oluşan kalıntı östenit fazının hacmine ve boyutuna bağlı olarak korozyon hızı değişmektedir [24]. Kriyojenik işlem uygulanan N3, N4 ve N5 numunelerinin; EIS yöntemi ile elde edilen Q ve yüzey pürüzlüğü değerleri (n) de R_{ct} değerleri ile aynı oranda değişmektedir. Kriyojenik işlemle en yüksek R_{ct} değerine sahip olan N3 numunesinin n değeri 0,83 iken, 36 saat kriyojenik işlem yapılan N4 numunesinin n değerinin 0,80 olduğu görülmüştür. Bu bulgu, N4 numunesinin N3 numunesine göre daha çok korozyona uğradığı için yüzeyinin daha çok bozulduğunu belirtmektedir. Kalıntı östenit miktarı ve ince dağılmış karbürlerin varlığı korozyon davranışlarının belirlenmesinde rol alan iki temel faktördür. Ayrıca matristeki karbon miktarı, su verme ve temperleme işlemi sırasında iç gerilimdeki değişiklikler de korozyon davranışını etkilemektedir. Kriyojenik işlem martenzit fazda karbon içeriğini ve kalıntı östenit miktarını azaltarak çeliklerin korozyon davranışını değiştirmektedir [25]. Kriyojenik işlem ile karbür yüzdesinin artırılması sonucu daha düzgün karbür dağılımı elde edilerek korozyon direncinde artış meydana gelmektedir [26]. Homojen olmamanın sonucu olarak geniş boyutlu karbürler ince karbürlere kıyasla daha zararlıdır. Karbür çökmesi ile martenzit fazın karbon içeriği azalması ve matrisin karbon miktarının artması ile korozyon direnci düşmektedir. Ayrıca Cr açısından zengin olan karbür çökmesi sonucu matristeki Cr içeriği azalarak metalin korozyon direnci de azalmaktadır. Karbür çökmesi tane sınırlarında meydana geldiği için Cr miktarı tane sınırlarında azalacaktır. Bunun sonucu olarak taneler arası korozyon olayı meydana gelmektedir [25].

Kriyojenik işlemle çeşitli çelik alaşımların ömrünü artırmak, özelliklerini iyileştirmek ve aşınmaları azaltmak istenmektedir [27, 28, 29]. Ancak kriyojenik işlemin metallerin korozyona uğrama hızında artışa da neden olduğuna dair çalışmalar bulunmaktadır [30]. Şekil 5 (b) ve (c)'de Bode ve Angle diyagramları verilmiştir. Bu diyagramlarda görülen tam yarı dairesel olmama durumu Nyquist diyagramını desteklemektedir [31, 32]. Nyquist, Bode ve Angle diyagramlarında bir kapasitif lup olduğu görülmektedir [33]. Bu durum metalin çözelti içerisinde korozyon direncinin yük transfer direnci ile kontrol edildiğini göstermektedir [34]. Sementasyon, kriyojenik işlem ve temperleme işlemleri yapılmayan N1 numunesinin Bode eğrisine bakıldığında $\log|Z|$ değeri 3,26 $\Omega.cm^2$, faz açısını gösteren Angle diyagramı ise 56,84°'yi göstermektedir. Sementasyon ve temperleme yapılan N2 numunesinin Bode eğrisine bakıldığında $\log|Z|$ değeri 3,55 $\Omega.cm^2$, faz açısını gösteren Angle

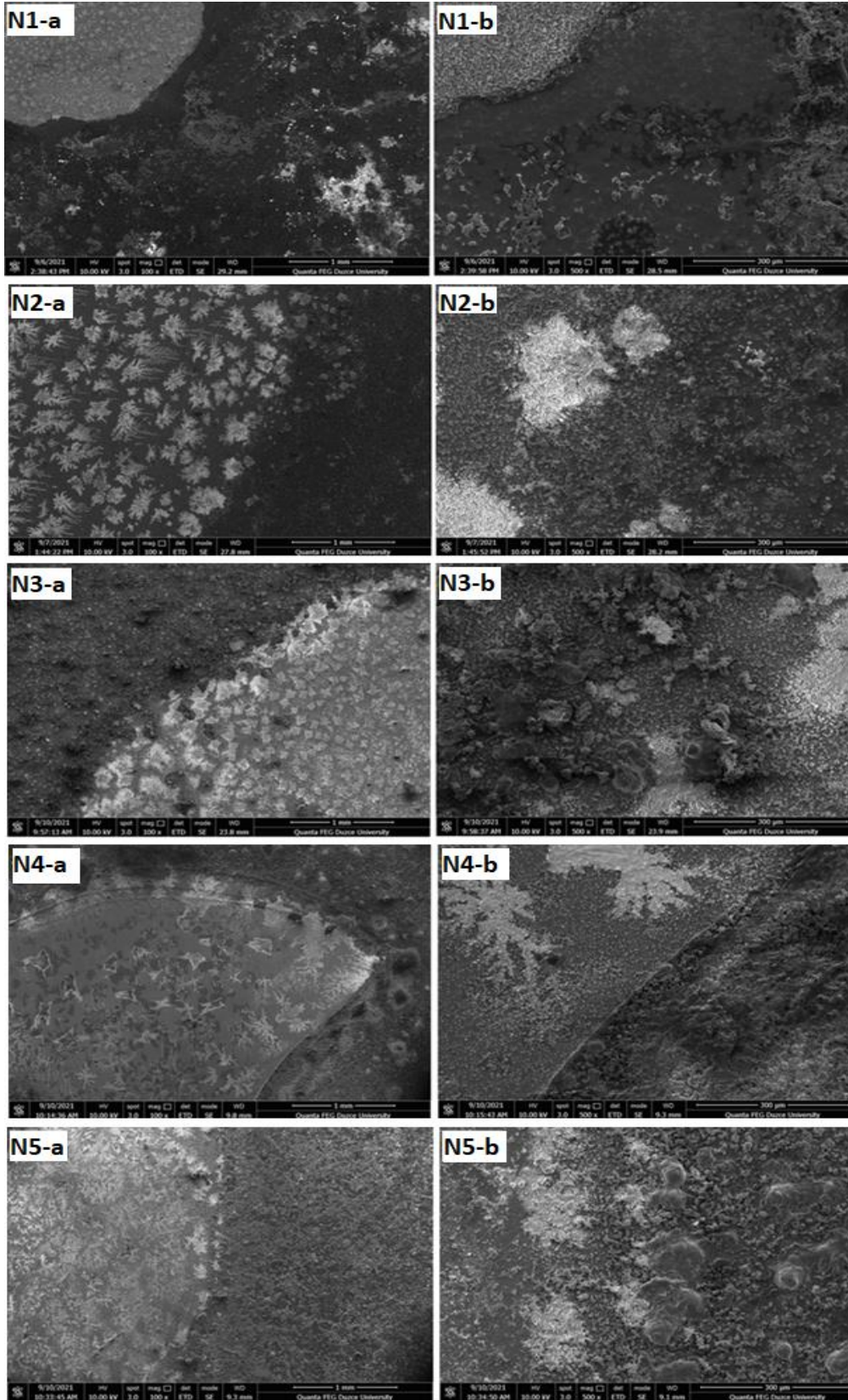
diyagramı ise 64,88°'yi göstermektedir. Sementasyon ve temperleme işlemi sayesinde numunenin Bode ve Angle değerlerindeki artış korozyon direncindeki artış ile doğru orantılı olarak bulunmuştur. Sırasıyla 24, 36 ve 48 saat bekletmeli kriyojenik işlem yapılan N3, N4 ve N5 numunelerinin Bode eğrisi $\log|Z|$ değerleri 3,61 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 3,37 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ve 3,48 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir. Angle değerleri ise sırasıyla, 68,15°, 60,43° ve 63,91°'dir. Uygulanan kriyojenik işlem süresi ile Bode ve Angle değerleri orantılı olarak artmamaktadır. Fakat en yüksek değer 24 saat kriyojenik işlem yapılan N3 numunesinde görülmüştür. Bu durum Nyquist diyagramı ile Bode ve Angle diyagramlarının benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir.

B. SEM-EDS Sonuçları

Niteliksel analizlere ait bulguları doğrulamak amacıyla SEM yöntemi ile metal yüzeyinde oluşan korozyon ürünlerinin daha ayrıntılı incelemesi yapılmıştır. Şekil 7'de korozyon deneyleri sonrasında numunelere ait 100x ve 500x büyütme elde edilen SEM görüntüleri yer almaktadır. EIS deneyleri sonrasında referans numune (N1) ve ısıtma işlemi uygulanan metallerin (N2, N3, N4 ve N5) yüzeylerinde oksit tabakanın oluşumu gözlemlenmiştir. Numunelere uygulanan sementasyon, kriyojenik ve temperleme işlemleri sonrasında AISI 8620 metaline ait yüzey görüntülerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Ayrıca kimyasal bileşimlerine göre çeşitli korozyon ürünlerinin varlığını belirlemek amacıyla tamamlayıcı teknik olan EDS yöntemi kullanılmıştır. EDS yöntemi sonucu elde edilen veriler Tablo 4'te verilmiştir. EDS analizinde görülen sodyum ve klor deneyin yapıldığı ortamdan (%3,5 NaCl) kaynaklanmaktadır. EDS verilerine göre N1 numunesinin yüzeyinde oksijen (%20,54), demir (%59,03) ve mangan (%0,94) tespit edilmiştir. Numunelere ısıtma işlemi uygulanması ile bu elementlere ait oranların referans numuneye kıyasla azaldığı belirlenmiştir. EDS sonuçlarına göre N1 numunesinde oksijen, demir ve mangan oranının daha yüksek değerde olması yüzeyin daha çok demir-oksit veya mangan-oksit tabaka ile kaplandığını dolayısıyla daha fazla korozyon olduğunu ifade etmektedir. Sementasyon, kriyojenik ve temperleme gibi işlemler yapılan N2, N3, N4 ve N5 numunelerinin EDS analizinde referans alınan diğer elementlerin (karbon, silisyum, fosfor, molibden, krom, nikel) oranlarında belirgin bir değişim tespit edilmemiştir.

Tablo 4. EIS deneyleri sonrası EDS analiz sonuçları.

Element (Wt %)	N1	N2	N3	N4	N5
C	1,67	1,28	1,14	1,37	1,52
O	20,54	14,32	14,41	14,56	13,35
Na	5,62	14,62	16,22	16,59	14,61
Si	0,27	0,22	0,19	0,20	0,23
P	0,07	0	0,14	0,16	0,20
Mo	0,72	0,67	0,15	0,65	0,79
Cl	10,09	10,54	11,07	10,38	11,12
Cr	0,55	0,52	0,58	0,47	0,55
Mn	0,94	0,77	0,75	0,65	0,73
Fe	59,03	56,28	55,03	54,58	56,39
Ni	0,50	0,78	0,32	0,39	0,51



Şekil 7. Denei numunelerinin SEM görüntüleri a) 100x b) 500x

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada sementasyon çeliğinin %3,5 NaCl ortamındaki korozyon davranışı, uygulanan sementasyon, temperleme ve farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlemin etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla maddeler halinde verilmiştir.

- AISI 8620 çeliğine yapılan sementasyon, temperleme ve kriyojenik işlemler malzemenin korozyon davranışına olumlu yönde etkide bulunmuştur.
- EIS yöntemi ile elde edilen sonuçlar, SEM ve EDS verilerini desteklemektedir.
- Korozyona karşı en duyarlı numunenin, sementasyon, kriyojenik ve temperleme yapılmamış N1 numunesi olduğu EIS yöntemi ile hesaplanan R_{ct} ($1806,63 \Omega.cm^2$) değerinden anlaşılmaktadır. Korozyona en az uğrayan numunenin 24 saat derin kriyojenik işlem yapılan N3 numunesi (R_{ct} : $4706,95 \Omega.cm^2$) olduğu görülmektedir.
- Farklı bekletme süreli (24, 36 ve 48 saat) derin kriyojenik işlem yapmanın, doğru orantılı olacak şekilde direkt olarak korozyon dayanımına olumlu etkisi görülmemiştir. Ancak, 36 saat kriyojenik işlem yapılan N4 numunesinin R_{ct} değeri $2770,23 \Omega.cm^2$ olarak bulunmuştur. Bu değer 24 saat kriyojenik işlem yapılan N3 numunesine ait R_{ct} değerine kıyasla yaklaşık %70 daha düşüktür.
- Tüm numunelerin yüzeyinde oluşan siyah oksit filmin ağırlıklı olarak magnetite (Fe_3O_4) yapısında olabileceği EDS verilerinden öngörülmektedir.
- İlerleyen çalışmalarda; numune sayısı artırılarak zamana bağlı elektrokimyasal parametrelerin ölçülebildiği Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS) yöntemi kullanılarak, AISI 8620 çeliğinin korozyon davranışına sementasyon ve kriyojenik işlemin etkisinin incelenmesinde fayda vardır.

KAYNAKLAR

- [1] Güney, F. (2021). *AISI 8620 çeliğinin farklı şartlar altındaki mekanik özellikleri, korozyon direnci ve mikroyapılarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce.
- [2] Güney, F., & Kam. M. (2021). AISI 8620 çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde kriyojenik işlemin etkisi üzerine bir değerlendirme, 6. *Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, 20-21 Kasım, İstanbul, 430-438.
- [3] Güney, F., & Kam. M. (2022). AISI 8620 (20NiCrMo2) Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Kriyojenik İşlemin Etkisinin İncelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(2), 22-31.
- [4] Erden, M. (2016). Effect of C content on microstructure and mechanical properties of Nb-V added microalloyed steel produced by powder metallurgy method. *European Journal of Science and Technology*, 5(9), 44-47.
- [5] Kam, M., & Saruhan, H. (2018). Derin kriyojenik işlemin farklı bekletme sürelerinin AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(3), 553-564.
- [6] Asl, K.M., Tari, A., & Khomamizadeh, F. (2009). Effect of deep cryogenic treatment on microstructure, creep and wear behaviors of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 523(1-2), 27-31.
- [7] Nalbant, H. (2018). *Derin kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- [8] Karacif, K., Çarboğa, C., & Candemir, D. (2019). Düşük oranlarda bor içeren az karbonlu çeliklerin asidik ve tuzlu ortamlarda korozyon özelliklerinin incelenmesi. *Bor Dergisi*, 4(1), 39-45.
- [9] Kayalı, Y., Yalçın, Y., & Ülker, Ş. (2019). Plazma pasta borlama yöntemiyle borlanmış AISI D2 çeliğinin aşınma ve elektrokimyasal korozyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 177-185.
- [10] Jovićević-Klug, P., Kranjec, T., Jovićević-Klug, M., Kosec, T., & Podgornik, B. (2021). Influence of the deep cryogenic treatment on AISI 52100 and AISI D3 steel's corrosion resistance. *Materials*, 14(21), 6357.
- [11] Demir, İ.D.K., & Uygur, İ. (2019). AZ63 magnezyum alaşımının korozyon direncine kriyojenik işlemin etkisi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1-8.
- [12] Ryl, J., Wysocka, J., Cieslik, M., Gerengi, H., Ossowski T., Krakowiak S., & Niedzialkowski P. (2019). Understanding the origin of high corrosion inhibition efficiency of bee products towards aluminium alloys in alkaline environments. *Electrochimica Acta*, 304, 263-274.

- [13] Gerengi, H., Solomon, M. M., Kaya, E., Bağcı, F. E., & Abaib E. J. (2018). An evaluation of the anticorrosion effect of ethylene glycol for AA7075-T6 alloy in 3.5% NaCl solution. *Measurement*, 116, 264-272.
- [14] Gerengi, H., Akcay, C., Ozgan, E., & Arslan, I. (2012). Investigation on the corrosion of low carbon steel placed in asphalt concrete in 3.5% NaCl environment. *Journal of the Science and Technology*, 3(1), 5-11.
- [15] Gerengi H., Cakmak R., Dag B., Solomon M.M., Tuysuz H.A., & Kaya E. (2020). Synthesis and anticorrosion studies of antipyrine on SAE 1012 carbon steel in 15 wt.% HCl solution. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(22), 2448-2466.
- [16] Rizvi, M., Gerengi, H., Kaya, S. et al. (2021). Sodium nitrite as a corrosion inhibitor of copper in simulated cooling water. *Scientific Reports*, 11(1), 8353.
- [17] Gerengi, H., Uğraş, H. I., & Yıldız, M. (2017). Bor katyonu içeren iyonik sıvıların 0.1 M HCl ortamında korozyon inhibitörü olarak kullanılması. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 6(1), 11-12.
- [18] Fytianos G., Ucar S., Grimstvedt A., Svendsen H. F., & Knuutila H. (2016). Corrosion evaluation of MEA solutions by SEM-EDS, ICP-MS and XRD. *Energy Procedia*, 86, 197-204.
- [19] M. Abd Mutalib, M.A. Rahman, M.H.D. Othman, A.F. Ismail, & J. Jaafar. (2017). Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-Ray (EDX) Spectroscopy. *Membrane Characterization*, 9, 161-179.
- [20] Gerengi, H. (2012). Anticorrosive properties of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruit juice on 7075 type aluminum alloy in 3.5% NaCl solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(39), 12835-12843.
- [21] Arslan, Y., & Özdemir, A. (2013). Farklı sürelerde kriyojenik işlem uygulanmış AISI D3 soğuk iş takım çeliği zımbalarda aşınma davranışları ve takım ömrü. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 2(3), 87-99.
- [22] Park, S., Shin, B.H., Park, J., Kim, D., & Chung, W. (2019). Effect of austenite morphology on the electrochemical properties of super duplex stainless UNS S 32750. *International Journal of Electrochem Science*, 14, 5386-5395.
- [23] Kazum, O., Kannan M.B., Beladi, H., Timokhina, I.B., Hodgson, P.D., & Khoddam, S. (2014). Aqueous corrosion performance of nanostructured bainitic steel, *Materials and Design*, 54, 67-71.
- [24] Kazum, O., Kannan, M.B., Beladi, H., Timokhina, I., Hodgson, P., & Khoddam, S. (2014). Selective dissolution of retained austenite in nanostructured bainitic steels. *Advanced Engineering Materials*, 16(4), 442-444.
- [25] Wang, W., Srinivasan, V., Siva, S., Albert, B., Lal, M., & Alfantazi, A. (2014). Corrosion behavior of deep cryogenically treated AISI 420 and AISI 52100 steel. *Corrosion*, 70(7), 708-720.
- [26] Akhbarizadeh, A., Amini, K., & Javadpour, S. (2012). Effects of applying an external magnetic field during the deep cryogenic heat treatment on the corrosion resistance and wear behavior of 1.2080 tool steel. *Materials & Design*, 41, 114-123.
- [27] Firouzidor, V., Nejati, E., & Khomamizadeh, F. (2008). Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill. *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1-3), 467-472.
- [28] Yumak, N., & Aslantaş, K. (2021). Effect of heat treatment procedure on mechanical properties of Ti- 15V-3Al-3Sn-3Cr metastable β titanium alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(2), 1066-1074.
- [29] Yumak, N., Aslantaş, K., & Çetkin, A. (2021). Cryogenic and aging treatment effects on the mechanical properties of Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn titanium alloy. *J. Test. Eval.*, 5, 3221-3233.
- [30] Uygur, I., Gerengi, H., Arslan, Y., & Kutay, M. (2015). The effects of cryogenic treatment on the corrosion of AISI D3 steel. *Materials Research*, 18(3), 569-574.
- [31] Wang, F., & Rick, J. (2014). Synergy of Nyquist and Bode electrochemical impedance spectroscopy studies to commercial type lithium ion batteries. *Solid State Ionics*, 268, 31-34.
- [32] Solomon, M.M., Gerengi, H., Kaya, T., Kaya, E., & Umoren, S.A. (2017). Synergistic inhibition of St37 steel corrosion in 15% H₂SO₄ solution by chitosan and iodide ion additives. *Cellulose*, 24(2), 931-950.
- [33] Jiang, X., Wan, W., Wang, B., Zhang, L., Yin, L., Bui, H.V., Xie, J., Zhang, L., Lu, H., & Deng, L. (2022). Enhanced anti-corrosion and microwave absorption performance with carbonyl iron modified by organic fluorinated chemicals. *Applied Surface Science*, 572, 151320.
- [34] Liu, Y., Guo, X., Liu, D., Wang, Y., Hao, L., Jin, Y., Li, H., & Wu, Y. (2022). Inhibition effect of sparteine isomers with different stereochemical conformations on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution. *Journal of Molecular Liquids*, 345, 117833.

Araştırma Makalesi - Research Article

The Effect of Nisin and Chloramphenicol Combination on *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 Biofilm Structure

Nisin ve Kloramfenikol Kombinasyonunun *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 Biyofilmi Üzerindeki Etkileri

Umut Çağrı Koçak¹, Elif Arslan², Şeymanur Çobanoğlu³, Kürşad Coşkun⁴ Ayşenur Yazıcı^{5*}, Serkan Örtücü⁶

Geliş / Received: 16/01/2022

Revize / Revised: 05/11/2022

Kabul / Accepted: 21/11/2022

ABSTRACT

Nowadays, due to the rapid spread of antibiotic resistance and the difficulty of discovering new antimicrobial agents, the reuse and combinational strategies of old antibiotics have come to the fore. In this study, we investigated the combinational efficacy of nisin and chloramphenicol against the ATCC 6538 strain of *Staphylococcus aureus*. The MIC values of nisin and chloramphenicol were >64 and 32 µg/mL, respectively. The checkerboard assay was carried out for the inspection of synergism between nisin and chloramphenicol. Furthermore, the crystal violet assay was employed to assess antibiofilm effects. Additionally, the expressions of various virulence genes (*agrA*, *spa*, *icaA* and *saeR*) were investigated using the colony biofilm assay and qRT-PCR methods. In combination application, MIC values of nisin and chloramphenicol was decreased. In addition, biofilm formation was decreased. It was shown that the expression level of the *agrA* gene decreased compared to the control in the nisin, chloramphenicol and combinational applications. The expression levels of other genes were increased compared to the control. The results showed that the activities of nisin and chloramphenicol combinations had synergistic and antibiofilm activity. This study sheds light on the combinatorial use of older antibiotics.

Keywords- *Staphylococcus Aureus, Combination, Antibiotic Resistance, Nisin, Chloramphenicol*

ÖZ

Günümüzde antibiyotik direncinin hızla yayılması ve yeni antimikrobiyal ajanların keşfedilmesinin zorluğu nedeniyle eski antibiyotiklerin yeniden kullanımı ve kombinasyon stratejileri ön plana çıkmıştır. Bu çalışmada, *Staphylococcus aureus*'un ATCC 6538 suşuna karşı nisin ve kloramfenikolün kombinasyonel etkinliğini araştırdık. Nisin ve kloramfenikolün MİK değerleri sırasıyla >64 ve 32 µg/mL olarak bulundu. Nisin ve

¹Contact: umutcagrikocak@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-3754-9753>)

Department of Molecular Biology and Genetics, Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye

²Contact: elif.sancar02@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7310-241X>)

Department of Molecular Biology and Genetics, Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye

³Contact: seymanucobanoglu25@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2805-0523>)

Department of Molecular Biology and Genetics, Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye

⁴Contact: coskun.kursat25@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-7551-9523>)

Department of Molecular Biology and Genetics, Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye

*5 Corresponding Author Contact: aysenur.ozdemir@erzurum.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3369-6791>)

High Technology Research and Application Centre (YUTAM), Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye

⁶Contact: serkanortucu@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3180-0444>)

Department of Molecular Biology and Genetics, Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye

kloramfenikol arasındaki sinerjizmin incelenmesi için dama tahtası (Checkerboard) testi yapıldı. Ayrıca, antibiyofilm etkilerini değerlendirmek için kristal viole testi kullanıldı. Koloni biyofilm testi ve qRT-PCR yöntemleri kullanılarak çeşitli virülans genlerinin (*agrA*, *spa*, *icaA* ve *saeR*) ekspresyonları araştırıldı. Kombinasyonel uygulamada, nisin ve kloramfenikolün MİK değerlerinde azalma gözlemlendi. Ayrıca, kombinasyonel uygulamada, biyofilm oluşumu azalma gösterdi. Nisin, kloramfenikol ve kombinasyon uygulamalarında *agrA* geninin ekspresyon seviyesinin kontrole göre azaldığı gösterilmiştir. Diğer genlerin ekspresyon seviyeleri ise kontrole göre artış göstermiştir. Sonuçlarımız, nisin ve kloramfenikol kombinasyonlarının aktivitelerinin sinerjistik ve antibiyofilm aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, eski antibiyotiklerin kombinasyonel kullanımının önemine ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler- *Staphylococcus Aureus*, *Kombinasyon*, *Antibiyotik Dirençliliği*, *Nisin*, *Kloramfenikol*

I. INTRODUCTION

Nowadays, one of the most important health problems is infections caused by antibiotic resistance [1,2]. The genetic basis of antibiotic resistance involves mutations and mobile genetic elements. Mutations cause changes in antibiotic targets, lower cell membrane permeability and reduced drug accumulation. Mobile genetic elements give rise to the transfer of antibiotic resistance genes among bacteria. Resistance mechanisms in bacteria have evolved rapidly due to the misuse or overuse of antibiotics. Clinically, one of the rapidly growing antibiotic-resistant bacteria is *Staphylococcus aureus*. It was estimated to be responsible for over 148,000 infections and 7000 deaths in the European Union in 2015 [2]. Furthermore, its biofilm-forming capacity is quite high, and it is shown as a major cause of biofilm-associated infections [3]. Hence, the fight against multidrug-resistant *S. aureus* infections increases the need for new antimicrobial agents and new treatment strategies. One of the approaches used to combat antibiotic resistance is the use of combinational treatment approaches [4–6]. It is common to use two antibiotics together to achieve synergistic effects. This way, old antibiotics can be reused to combat antibiotic resistance. Recently, combinations of traditional antibiotics and antimicrobial peptides (AMPs) called next-generation antibiotics have shown promising results to fight infections.

Nisin is an AMP belonging to the bacteriocins group produced from *Lactococcus lactis* [7]. It has an inhibitory effect against Gram-positive bacteria such as *S. aureus* and *Listeria monocytogenes*. It has also gained importance as a food preservative [8]. It creates a pore structure on the bacterial membrane. Moreover, it prevents cell wall synthesis by binding to the lipid II molecule [9]. Chloramphenicol is one of the most active broad-spectrum antibiotics. It inhibits protein synthesis by binding to the 50S subunit of the ribosome. Furthermore, it inhibits peptidyl transferase activity. However, chloramphenicol has serious side effects such as neurotoxicity and hematological disorders [10,11]. Nevertheless, its use is being reconsidered due to the increase in antibiotic resistance.

In this study, we confirmed that *S. aureus* ATCC 6538 is capable of forming strong biofilms under in vitro conditions, and therefore, we selected this strain for our study. So, we investigated the in vitro activities of nisin and chloramphenicol alone and their combinational effects on *S. aureus* ATCC 6538. Furthermore, we explored the effects of biofilm-related virulence genes by gene analysis.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Strain, Reagents and Antibiotics

The tested bacterial strain was *S. aureus* ATCC 6538. Nisin from *L. lactis* (2.5%; balance sodium chloride) and chloramphenicol ($\geq 98\%$, HPLC) were purchased from Sigma Aldrich (St. Louis, MO). All other chemicals used in this study were of analytical grade.

B. Minimum Inhibitory Concentration (MIC) Assays

MICs for nisin and chloramphenicol were assigned by using the broth microdilution method according to a previous report [12]. First of all, bacterial culture (100 μ L) with a turbidity of 0.5 McFarland standard and different concentrations of nisin and chloramphenicol (2-128 μ g/mL) were inoculated in a 96-well plate. The plate was incubated at 37°C for 24 h. The no visible growth well was designated as MIC value.

C. Crystal Violet (CV) Assay

Bacterial culture (100 µL) and increasing concentrations of nisin and chloramphenicol (2-128 µg/mL) in the Mueller-Hinton Broth (MHB) medium were seeded into 96-well plates. The plate was incubated at 37°C for 48 h. After incubation, non-adhered bacterial cells were removed, and the plate was washed three times with PBS. The wells were then subjected to staining with 0.5% CV for 20 min, and each well was washed with PBS. Finally, each well was fixed with 30% acetic acid. OD was read at 590 nm with a spectrometer. In addition, light microscopy images were taken with antibiotic treatment at 1/2 MIC concentration [13].

D. Checkerboard Assay

The checkerboard assay was used to evaluate the synergism between nisin and chloramphenicol against *S. aureus* ATCC 6538 [14]. Nisin and chloramphenicol solutions were added at increasing concentrations in the horizontal and vertical directions into a 96-well plate. 0.5 McFarland bacterial suspension (100 µL) was added to each well. The final volume was adjusted to 200 µL. The plates were incubated statically at 37°C for 24 h. After incubation, the fractional inhibitory concentration (FIC) value was calculated as follows:

$$\Sigma \text{FIC} = \text{FIC}(\text{NISIN}) + \text{FIC}(\text{Chloramphenicol}) \quad (1)$$

$$\text{FIC}(\text{NISIN}) = \frac{\text{MIC of drug Nisin in the combination}}{\text{MIC of drug Nisin alone}} \quad (2)$$

$$\text{FIC}(\text{Chloramphenicol}) = \frac{\text{MIC of drug Chloramphenicol in the combination}}{\text{MIC of drug Chloramphenicol alone}} \quad (3)$$

E. Colony Biofilm Assay

For the colony biofilm assay, sterile polycarbonate membranes (Poretics 25-mm-diameter black polycarbonate membranes with a pore size of 0.22 µm, GE) were placed on Petri dishes with and without antibiotics. 0.5 McFarland bacterial suspension (10 µL) was seeded on the membranes. The Petri dishes were changed every 24 hours and incubated statically at 37°C for 48 h to form biofilms [15].

F. RNA isolation and cDNA synthesis

Total RNA from the biofilm samples were isolated with TRIzol reagent (Invitrogen, San Diego, CA) following the manufacturer's guidelines. The concentration and purity of the RNAs were assessed with spectrophotometry using a Multiskan GO (Thermo Fisher Scientific, Inc., Wilmington, DE, USA). 300 ng of RNA was reverse-transcribed using a High-Capacity cDNA Reverse Transcription Kit (Applied Biosystems™).

G. Quantitative Real-Time Polymerase Chain Reaction (qRT-PCR)

The expression levels of *agrA*, *icaA*, *saeR* and *spa* were analyzed with qRT-PCR using "HOT FIREPol® EvaGreen® qPCR Mix Plus" (Solis BioDyne, Estonia). The primers were designed using the Primer3 program (<https://bioinfo.ut.ee/primer3-0.4.0/>) and are shown in Table 1. The *GyrB* gene, encoding the subunit B of DNA gyrase, was used as the housekeeping gene. The reactions were facilitated with Rotor-Gene (Qiagen, Düsseldorf, Germany) using standard parameters. The expression levels of the genes were determined using the $2^{-(\Delta\Delta C_t)}$ method.

Table 1. Primer sequences used in the study

Gene Name	Primer Sequence
<i>AgrA</i>	F: 5'-CCTATGGAAATTGCCCTCGC-3'
	R: 5'-CCAACTGGGTCATGCTTACG-3'
<i>Spa</i>	F: 5'-GCGTAACACCTGCTGCAAAT-3'
	R: 5'-AGAAGGCGCTTTGTTGATCT-3'
<i>Ica A</i>	F: 5'-ACACTTGCTGGCGCAGTCAA-3'
	R: 5'-TCTGGAACCAACATCCAACA-3'
<i>Sae R</i>	F: 5'-GTAACAACGACAACACTAGCGGT-3'
	R: 5'-CGAGTTCCTTGGACTAAATGG-3'
<i>gyr B</i>	F: 5'-ATATTGCACAGCCACCGTTG-3'
	R: 5'-CCGCTTCAATCGCATCTTCA-3'

H. Statistical Analysis

The results were examined by using a one-way analysis of variance (ANOVA) test with three independent replicates. $P < 0.05$ was regarded as statistically significant.

III. RESULTS

A. Antimicrobial and Antibiofilm Activity

In this study, we investigated the effects of chloramphenicol, nisin and their combinations against *S. aureus* (ATCC 6538). The MIC values of chloramphenicol and nisin were 32 µg/mL and >64 µg/mL, respectively. Thus, chloramphenicol had a higher-level antimicrobial effect than nisin against *S. aureus* (ATCC 6538). Nisin and chloramphenicol showed antibiofilm activity at increasing concentrations (Fig.1).

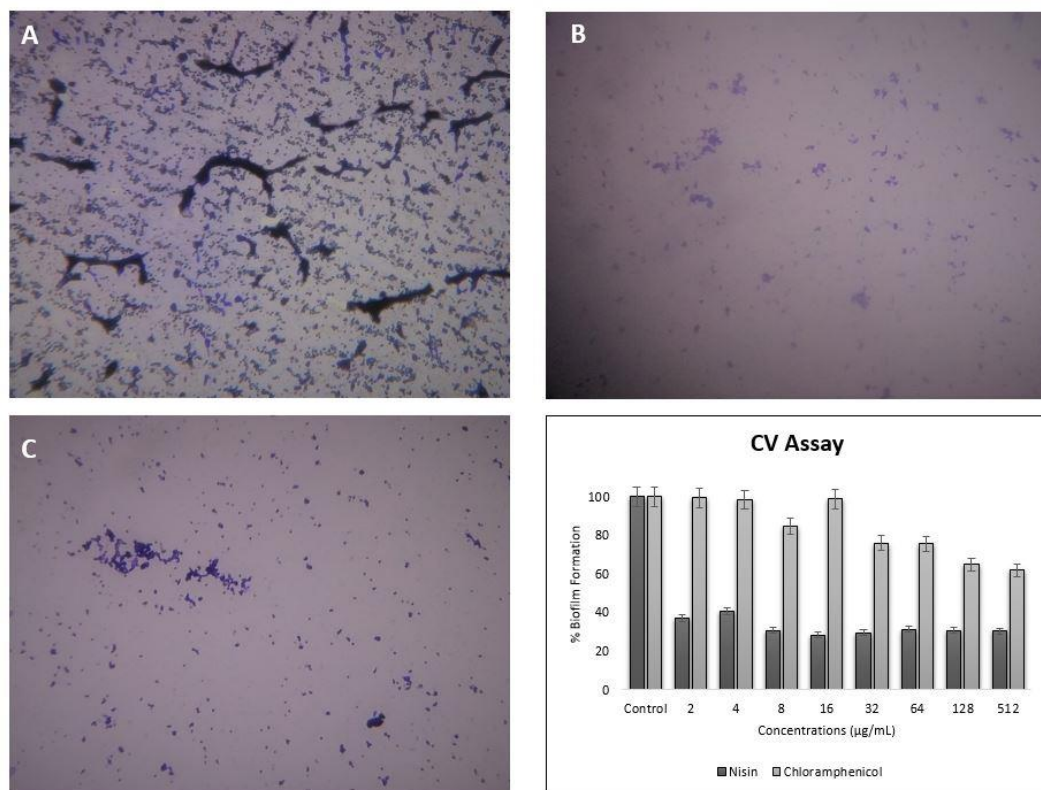


Figure 1. Light microscopic images of crystal violet stained *S. aureus* (ATCC 6538) biofilm. A. Control B. ½ MIC concentration of nisin treatment C. ½ MIC concentration of chloramphenicol treatment. D. Antibiofilm activity of nisin and chloramphenicol

B. Checkerboard Assay

The combined effects of chloramphenicol and nisin were calculated by the FIC index. The MIC value of chloramphenicol was determined as 8 µg/mL in combination. On the other hand, the MIC value of nisin was calculated as 5 µg/mL in combination. The FIC index calculated with these results was 0.32. A FIC index value of less than 0.5 ($\Sigma \text{FIC} < 0.5$) indicates a synergistic interaction between two antimicrobial agents. Therefore, the combination of nisin and chloramphenicol showed a synergistic effect against *S. aureus* (ATCC 6538).

C. Gene Expression Analysis

To evaluate the expression levels of biofilm-related genes, the ½ MIC values of nisin, chloramphenicol and their combination were applied in the colony biofilm assay. The total RNA obtained from the biofilm sample was extracted, and the expressions of the *agrA*, *spa*, *icaA* and *saeR* genes were determined by qRT-PCR. The total RNA of the untreated biofilm sample was used as the control, and the *gyrB* gene was used to normalize the expression results of the virulence genes.

As shown in Fig. 2a, the analysis of *agrA* expression levels in the treatments with nisin alone, chloramphenicol alone and their combination demonstrated that the expression of this gene decreased significantly compared to the control group. However, it was found that the expressions of the *icaA*, *saeR* and *spa* genes were upregulated in all groups compared to the control (Figure 2b-d).

The expressions of the *spa* (Figure 2c) and *saeR* (Figure 2d) genes were upregulated 16- and 30-fold in the chloramphenicol application, respectively. In the combination of the two agents, the expression of *agrA* was significantly reduced compared to the control group (Figure 2a). However, the expressions of the *icaA*, *saeR* and *spa* genes were found to be significantly upregulated in response to this combination, most notably in the case of the *icaA* gene, whose expression was upregulated 820-fold. The expressions of *Spa* and *saeR* were upregulated 108 and 29-fold, respectively.

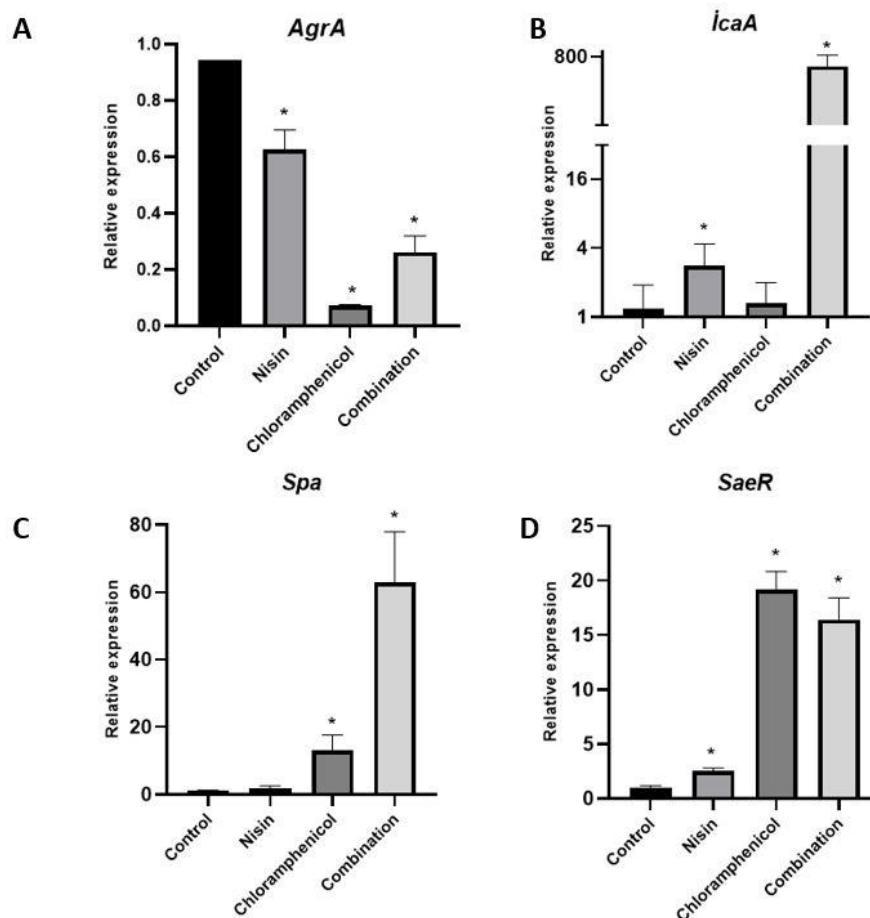


Figure 2. qRT-PCR analysis of *agrA*, *spa*, *icaA* and *saeR* which were significantly differentially expressed in control. Data were normalized to the *GyrB* gene, encoding the subunit B of DNA gyrase. Expression and fold-change was calculated by the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. *p < 0.05

IV. DISCUSSION

Infections caused by *S. aureus* are a serious problem worldwide. They lead to various severe infections, such as pneumonia, toxic shock syndrome, bacteremia, soft tissue and bloodstream infections in which bacterial virulence genes and toxins are significant mediators [16]. Antibiotic combinations may offer solutions to antibiotic resistance. Going forward, there is growing interest in the combination of antibiotics and antimicrobial peptides as a means of preventing infection.

S. aureus ATCC6538 is a clinical isolate, and it is used for infectious disease research and quality control. It also forms a strong biofilm under in vitro conditions [17,18]. Nisin which is an antimicrobial peptide and chloramphenicol is a protein synthesis inhibitor have been used in previous studies [19,20]. In this study, the interaction of nisin and chloramphenicol against this strain was assessed by using the checkerboard assay. The unit

of calculation in this test is the FIC index, which is used to evaluate the presence of synergistic, additive and antagonistic interactions of two antimicrobial agents. If the FIC index is less than 0.5 ($\Sigma \text{FIC} < 0.5$), there is a synergistic interaction between the two antimicrobial agents. If the FIC index is between 0.5 and 4 ($0.5 \leq \Sigma \text{FIC} \leq 4$), there is an additive effect. If the FIC index is greater than 4 ($\Sigma \text{FIC} > 4$), there is an antagonistic effect [14,21]. With this evaluation, the effects that may occur when antimicrobial drugs are used together are tested under in vitro conditions. Brumfitt et al. (2002) demonstrated the interaction between nisin and chloramphenicol with 20 clinical *S. aureus* isolates. They found antagonistic interactions in 18 isolates [22]. In our study, a synergistic interaction was observed between nisin and chloramphenicol in the reference strain we used. One possible reason is that different strains show distinct responses to antibiotics and their combinations. Additionally, the study by Tong et al. (2014) showed that nisin and chloramphenicol exert a synergistic effect against *Enterococcus faecalis* OG1RF, ATCC 29212, and strain E [23].

Biofilms are microbial communities that consist of the extracellular matrix, polysaccharides, extracellular DNA (e-DNA), and proteins. Microorganisms within a biofilm structure show different gene expression patterns in comparison to planktonic cells [24]. The biofilm-producing *S. aureus* generally causes chronic infections due to its ability to resist antibiotics [25]. We investigated the expressions of virulence genes in *S. aureus* (ATCC 6538) using the colony biofilm assay involving incubation with sub-MICs of nisin, chloramphenicol and their combinations. In our gene expression analysis, first, we created biofilm layers with the colony biofilm assay. It is a static method that allows the examination of the biofilm structure and components [15]. Furthermore, it determines the bacteria killing effects of the tested antimicrobial agents. The development of bacterial cells on a semipermeable membrane is provided. Bacteria growing on the membrane are taken onto the new medium at certain periods [15]. Therefore, the ability of cells to detach, migrate and get away from the biofilm is limited. This method is frequently preferred in studies carried out on antibiotic resistance and biofilm-related resistance.

In this study, the relative expression levels of *agrA*, *spa*, *icaA* and *saeR* were determined via qRT-PCR. The accessory gene regulator (Agr) operon is a global regulator associated with quorum sensing which is a cell-to-cell communication system. The Agr system has been shown to regulate the expression of a variety of virulence factors in *S. aureus*, such as delta-hemolysin toxin (*hld*), alpha toxin (*hla*), serin protease (*SplA-F*), and surface protein A (*Spa*) [26-28]. Agr operon activity has been shown to be particularly important in skin and soft tissue infections [29]. The decrease in the expression level of *agrA* compared to the untreated group indicated that it reduces biofilm formation and facilitates the dispersal of the established biofilm (Fig.2a). Staphylococcal protein A (*spa*) is another significant virulence factor that especially causes pneumonia, bloodstream infections and septic arthritis [26]. *Spa* is downregulated by RNAIII which is an Agr-dependent regulator [30]. Polysaccharide intercellular adhesin (PIA), which is important in biofilm formation, is encoded by the *ica* operon [31]. *IcaA* is a transmembrane protein which requires the *icaD* protein [31]. Interestingly, the expression levels of the *spa*, *icaA*, and *saeR* genes were upregulated in all applications. The production of virulence factors in *S. aureus* occurs by complex pathways. Additionally, antimicrobial applications at sub-MIC concentrations may cause bacterial resistance.

It has been reported that *ica* operon genes are not always required in biofilm formation, and antibiotics that affect the protein synthesis pathway do not have much effect on biofilm formation. For example, tetracyclines and streptogramin have been shown to increase the expression level of the *icaA* gene in *Staphylococcus epidermidis* [32]. However, chloramphenicol does not induce *icaA* expression changes in *S. epidermidis*. Similarly, in our study, it was found that the chloramphenicol and nisin applications increased the expression levels of the *icaA* gene. More information is needed on antimicrobial agent combinations and their effects on virulence genes to fight antibiotic resistance.

V. CONCLUSION

In conclusion, we assessed the effects of nisin and chloramphenicol alone and in combination. It was determined that nisin and chloramphenicol had a synergistic effect against the ATCC 6538 strain of *S. aureus* under in vitro conditions. Nisin can be used in antimicrobial therapy to enhance the antibiofilm effect of chloramphenicol. To test these results, similar studies should be conducted with different isolates of *S. aureus*.

REFERENCES

- [1] Cascioferro, S., Carbone, D., Parrino, B., Pecoraro, C., Giovannetti, E., Cirrincione, G., & Diana, P. (2021). Therapeutic Strategies to Counteract Antibiotic Resistance in MRSA Biofilm - Associated Infections. *Chemmedchem*, 16(1), 65-80.

- [2] Kakoullis, L., Papachristodoulou, E., Chra, P., & Panos, G. (2021). Mechanisms of Antibiotic Resistance In Important Gram-Positive And Gram-Negative Pathogens And Novel Antibiotic Solutions. *Antibiotics*, 10(4), 415.
- [3] Seethalakshmi, P. S., Rajeev, R., Kiran, G. S., & Selvin, J. (2020). Promising Treatment Strategies To Combat Staphylococcus Aureus Biofilm Infections: An Updated Review. *Biofouling*, 36(10), 1159-1181.
- [4] Worthington, R. J., & Melander, C. (2013). Combination Approaches To Combat Multidrug-Resistant Bacteria. *Trends In Biotechnology*, 31(3), 177-184.
- [5] Angst, D. C., Tepekule, B., Sun, L., Bogos, B., & Bonhoeffer, S. (2021). Comparing Treatment Strategies To Reduce Antibiotic Resistance In An In Vitro Epidemiological Setting. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(13), E2023467118.
- [6] Annunziato, G. (2019). Strategies To Overcome Antimicrobial Resistance (AMR) Making Use Of Non-Essential Target Inhibitors: A Review. *International Journal Of Molecular Sciences*, 20(23), 5844.
- [7] De Freire Bastos, M. D. C., & Ceotto, H. (2011). Bacterial Antimicrobial Peptides and Food Preservation. *Natural Antimicrobials In Food Safety And Quality*, 62.
- [8] Chung, K. T., Dickson, J. S., & Crouse, J. D. (1989). Effects Of Nisin On Growth Of Bacteria Attached To Meat. *Applied and Environmental Microbiology*, 55(6), 1329-1333.
- [9] Punyappa-Path, S., Phumkhachorn, P., & Rattanachaiakunsopon, P. (2015). Nisin: Production And Mechanism Of Antimicrobial Action. *International Journal Of Current Research And Review*, 7(2), 47.
- [10] Tevyashova, A. N. (2021). Recent Trends In Synthesis Of Chloramphenicol New Derivatives. *Antibiotics*, 10(4), 370.
- [11] Schlünzen, F., Zarivach, R., Harms, J., Bashan, A., Tocilj, A., Albrecht, R., ... & Franceschi, F. (2001). Structural Basis For The Interaction Of Antibiotics With The Peptidyl Transferase Centre In Eubacteria. *Nature*, 413(6858), 814-821.
- [12] Andrews, J. M. (2001). Determination Of Minimum Inhibitory Concentrations. *Journal Of Antimicrobial Chemotherapy*, 48(Suppl_1), 5-16.
- [13] Yazici, A., Örtücü, S., & Taşkin, M. (2021). Screening And Characterization Of A Novel Antibiofilm Polypeptide Derived From Filamentous Fungi. *Journal Of Proteomics*, 233, 104075.
- [14] Nagarajan, D., Roy, N., Kulkarni, O., Nanajkar, N., Datey, A., Ravichandran, S., & Chandra, N. (2019). Ω76: A Designed Antimicrobial Peptide to Combat Carbapenem-And Tigecycline-Resistant Acinetobacter Baumannii. *Science Advances*, 5(7), Eaax1946.
- [15] Merritt, J. H., Kadouri, D. E., & O'Toole, G. A. (2005). *Growing And Analyzing Static Biofilms*. Curr. 852 Protoc. Microbiol. Chapter 1. Unit 1B, 1, 853.
- [16] Hodille, E., Rose, W., Diep, B. A., Goutelle, S., Lina, G., & Dumitrescu, O. (2017). The Role of Antibiotics In Modulating Virulence In Staphylococcus Aureus. *Clinical Microbiology Reviews*, 30(4), 887-917.
- [17] Abbas, H. A., Elsherbini, A. M., & Shaldam, M. A. (2019). Glyceryl Trinitrate Blocks Staphyloxanthin and Biofilm Formation In Staphylococcus Aureus. *African Health Sciences*, 19(1), 1376-1384.
- [18] Chen, Q., Xie, S., Lou, X., Cheng, S., Liu, X., Zheng, W., ... & Wang, H. (2020). Biofilm Formation and Prevalence Of Adhesion Genes Among Staphylococcus Aureus Isolates From Different Food Sources. *Microbiologyopen*, 9(1), E00946.
- [19] Tong, Z., Ni, L., & Ling, J. (2014). Antibacterial Peptide Nisin: A Potential Role In The Inhibition Of Oral Pathogenic Bacteria. *Peptides*, 60, 32-40.
- [20] Dinos, G. P., Athanassopoulos, C. M., Missiri, D. A., Giannopoulou, P. C., Vlachogiannis, I. A., Papadopoulos, G. E., ... & Kalpaxis, D. L. (2016). Chloramphenicol Derivatives As Antibacterial And Anticancer Agents: Historic Problems And Current Solutions. *Antibiotics*, 5(2), 20.
- [21] Meletiadiis, J., Pournaras, S., Roilides, E., & Walsh, T. J. (2010). Defining Fractional Inhibitory Concentration Index Cutoffs For Additive Interactions Based On Self-Drug Additive Combinations, Monte Carlo Simulation Analysis, And In Vitro-In Vivo Correlation Data For Antifungal Drug Combinations Against Aspergillus Fumigatus. *Antimicrobial Agents And Chemotherapy*, 54(2), 602-609.
- [22] Brumfitt, W., Salton, M. R., & Hamilton-Miller, J. M. (2002). Nisin, Alone And Combined With Peptidoglycan-Modulating Antibiotics: Activity Against Methicillin-Resistant Staphylococcus Aureus And Vancomycin-Resistant Enterococci. *Journal Of Antimicrobial Chemotherapy*, 50(5), 731-734.
- [23] Tong, Z., Zhang, Y., Ling, J., Ma, J., Huang, L., & Zhang, L. (2014). An In Vitro Study On The Effects Of Nisin On The Antibacterial Activities Of 18 Antibiotics Against Enterococcus Faecalis. *Plos One*, 9(2), E89209.
- [24] Lister, J. L., & Horswill, A. R. (2014). Staphylococcus Aureus Biofilms: Recent Developments In Biofilm Dispersal. *Frontiers In Cellular And Infection Microbiology*, 4, 178.

- [25] Moormeier, D. E., & Bayles, K. W. (2017). Staphylococcus Aureus Biofilm: A Complex Developmental Organism. *Molecular Microbiology*, 104(3), 365-376.
- [26] Jenul, C., & Horswill, A. R. (2019). Regulation Of Staphylococcus Aureus Virulence. *Microbiology Spectrum*, 7(2), 7-2.
- [27] Painter, K. L., Krishna, A., Wigneshweraraj, S., & Edwards, A. M. (2014). What Role Does The Quorum-Sensing Accessory Gene Regulator System Play During Staphylococcus Aureus Bacteremia?. *Trends In Microbiology*, 22(12), 676-685.
- [28] Singh, R., & Ray, P. (2014). Quorum Sensing-Mediated Regulation Of Staphylococcal Virulence And Antibiotic Resistance. *Future Microbiology*, 9(5), 669-681.
- [29] Cheung, G. Y., Wang, R., Khan, B. A., Sturdevant, D. E., & Otto, M. (2011). Role Of The Accessory Gene Regulator Agr In Community-Associated Methicillin-Resistant Staphylococcus Aureus Pathogenesis. *Infection And Immunity*, 79(5), 1927-1935.
- [30] Cheung, A. L., Schmidt, K., Bateman, B., & Manna, A. C. (2001). Sars, A Sara Homolog Repressible By Agr, Is An Activator Of Protein A Synthesis In Staphylococcus Aureus. *Infection And Immunity*, 69(4), 2448-2455.
- [31] O'Gara, J. P. (2007). Ica And Beyond: Biofilm Mechanisms And Regulation In Staphylococcus Epidermidis And Staphylococcus Aureus. *FEMS Microbiology Letters*, 270(2), 179-188.
- [32] Rachid, S., Ohlsen, K., Witte, W., Hacker, J., & Ziebuhr, W. (2000). Effect Of Subinhibitory Antibiotic Concentrations On Polysaccharide Intercellular Adhesin Expression In Biofilm-Forming Staphylococcus Epidermidis. *Antimicrobial Agents And Chemotherapy*, 44(12), 3357-3363.

Araştırma Makalesi - Research Article

Canal Surfaces Through a Null Quaternionic Spine Curve

Null Kuaterniyonik Omurga Eğrisi Boyunca Kanal Yüzeyler

Gül Tuğ^{1*}

Geliş / Received: 17/01/2022

Revize / Revised: 09/07/2022

Kabul / Accepted: 18/07/2022

ABSTRACT

In this study, we give the parameterizations of the canal surfaces through a null quaternionic spine curve by using the pseudo-spheres in \mathbb{R}_1^4 . Besides, we give formulas for the Gauss and Mean curvatures and some corollaries related to the Cartan curvatures of the null quaternionic curve.

Keywords- Canal Surfaces, Cartan Frame, Null Quaternionic Curve, Semi Real Quaternions, Spine Curve

ÖZ

Bu çalışmada, \mathbb{R}_1^4 deki pseudo-küreleri kullanarak, bir null kuaterniyonik omurga eğrisi boyunca kanal yüzeylerin parametrisasyonları verilmiştir. Ayrıca, Gauss ve ortalama eğrilikler hesaplanmış ve null kuaterniyonik eğrinin Cartan eğrilikleri ile ilişkili bazı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Kanal Yüzeyler, Cartan Çatsı, Null Kuaterniyonik Eğri, Yarı Reel Kuaterniyonlar, Omurga Eğrisi

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: gguner@ktu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9453-3809>)
Department of Mathematics, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey

I. INTRODUCTION

Hamilton first defined the quaternions in 1843 with the aim of generalizing the complex numbers. He discovered that it is the best generalization if the real axis is left unchanged when the vector axis is appended by adding two more axes [1]. After him, it has been made considerable studies on the quaternions in many fields of science, for example, quaternions are used in robotic systems, video games, computer graphics, navigation systems and in several computer programs as well as mathematics and physics. Also, they derive remarkable convenience for the rotations in the three dimensional space. Many scientific studies exist on the representations of surfaces (such as constant slope or canal surfaces) by the help of quaternions [2, 4, 5, 10]. Moreover, the semi-quaternions are studied in [6, 7]. In these works, it is stated that the semi-quaternions algebra with a degenerate scalar product has the dimension four semi-Euclidean space structure with rank 2 semi-metric.

In 1987, Bharathi and Nagaraj introduced the concept of smooth quaternionic curves which lie in the three and four dimensional Euclidean spaces. They examined the Serret-Frenet formulas which are used to interpret the geometric properties of quaternionic curves [8]. Also, the quaternionic curves are described in the semi-Euclidean space by Çöken and Tuna in [9] and remarkable studies are conducted by many researchers on the different kinds of them, [10-15] are just to name a few.

On the other hand, there exist three families of curves called as spacelike, timelike or null (lightlike) depending on their causal characters in the Minkowski spacetime. Many different situations appear in the case of null curves compared to the non-null cases. The Frenet frame on a null curve was investigated and developed by many authors in this field [16-18]. Besides, in the references [19-21], it is studied the differential geometry of null quaternionic curves in semi-euclidean spaces and given the Frenet formula for null quaternionic curves by using spatial quaternions. It is also defined the Cartan frame for a null quaternionic curve in the dimension four Minkowski space in [22].

A canal surface associated to a space curve, is obtained by sweeping a family of spheres with varying radius $r(s)$ along a space curve and this curve is called as the spine curve. When we take the radius function as a constant, then the canal surface is called a tubular (pipe) surface. The canal surfaces are rather studied in many areas besides mathematics, such as CAGD, robotic path planning or shape reconstruction ([23-26]). Moreover, the canal surfaces are useful while visualising long and thin objects such as 3D fonts, poles, brass instruments or internal organs of the body in solid surface modeling. One of the primary questions is whether the canal surface is developable or not. One knows that, on a developable surface, the Gaussian curvature is identically zero at regular points and a developable canal surface is either a cylinder or a cone in the Euclidean space [27]. Farther et al. classified the canal surfaces in Minkowski-3 space in [28] and the tubular surfaces around a null curve is studied in [30].

In this study, first we introduce the basic properties of the semi-real quaternions, null quaternionic curves and canal surfaces in \mathbb{R}_1^3 . Then we define the non degenerate canal surfaces trough a null quaternionic spine curve by using the pseudo-spheres in the four dimensional Minkowski space. This process consists of three cases depending on the type of the pseudo-spheres which foliate the canal surface. Each case is detailed according to the casual character of the normal vector field $X(s, \theta)$ - $C(s)$ for describing the surface parameterization. Additionally, we calculate the Gauss and Mean curvatures and give some related corollaries.

II. PRELIMINARIES

We give some basic properties of the semi-real quaternions, null quaternionic curves and canal surfaces in the following three subsections (for further information, see [6, 7, 19-21, 28, 29]).

A. Semi-real quaternions

Let Q_H be a vector space with dimension four over the field H of characteristic greater than 2. If $e_i (1 \leq i \leq 4)$ is a basis for the vector space, then set of all the semi-real quaternions can be given by

$$Q_H = \{q | q = ae_1 + be_2 + ce_3 + d; a, b, c, d \in \mathbb{R}, e_1, e_2, e_3 \in \mathbb{R}_1^3, h(e_i, e_i) = \varepsilon(e_i), 1 \leq i \leq 3\}$$

where

$$e_i \times e_i = -\varepsilon(e_i), \quad 1 \leq i \leq 3$$

$$e_i \times e_j = \varepsilon(e_i)\varepsilon(e_j), \quad e_k \in \mathbb{R}_1^3$$

Here (ijk) is an even permutation of (123) . The multiplication of two semi real quaternions is defined by

$$p \times q = S_p S_q + S_p V_q + S_q V_p + h(V_p, V_q) + V_p \wedge V_q$$

for every $p, q \in Q_H$ by using the dot and cross products in \mathbb{R}_1^3 .

The conjugate of q is defined by $\alpha q = -ae_1 - be_2 - ce_3 + d$ for a semi real quaternion $q = ae_1 + be_2 + ce_3 + d \in Q_H$. Now we define a semi-Riemannian metric h as follows:

$$h: Q_H \times Q_H \rightarrow \mathbb{R}$$

$$h(p, q) = \frac{1}{2} [\varepsilon(p)\varepsilon(\alpha q)(p \times \alpha q) + \varepsilon(q)\varepsilon(\alpha p)(q \times \alpha p)]$$

where the semi-real quaternion inner product is defined by,

$$h(q, q) = a^2\varepsilon(e_1) + b^2\varepsilon(e_2) + c^2\varepsilon(e_3) + d^2$$

The vector product of two semi real quaternions $p = a_1e_1 + b_1e_2 + c_1e_3 + d_1$ and $q = ae_1 + be_2 + ce_3 + d$ is given as

$$V_p \wedge V_q = \varepsilon(e_2)\varepsilon(e_3)(b_1c - bc_1)e_1 - \varepsilon(e_1)\varepsilon(e_3)(a_1c - ac_1)e_2 + \varepsilon(e_1)\varepsilon(e_2)(a_1b - ab_1)e_3$$

Also, the norm of a semi real quaternion is defined by

$$\|q\|^2 = |h(q, q)| = |a^2\varepsilon(e_1) + b^2\varepsilon(e_2) + c^2\varepsilon(e_3) + d^2|$$

and q is called a spatial or temporal quaternion iff $q + \alpha q = 0$ or $q - \alpha q = 0$, respectively.

B. Null Quaternionic Curves in \mathbb{R}_1^4

Without loss of generality, we choose e_1 as a timelike vector. Then $\{e_1, e_2, e_3, e_4 = 1\}$ is an orthonormal basis of \mathbb{R}_1^4 . Let \mathbb{R}_1^4 be endowed with the quaternionic metric h . The dimension four semi-Euclidean space can be identified with the space of null spatial quaternionic curves in an obvious manner and we define a null quaternionic curve as,

$$C: I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Q}_H$$

$$C(s) = \gamma_1(s)e_1 + \gamma_2(s)e_2 + \gamma_3(s)e_3 + \gamma_4(s)e_4$$

where the tangent $L(s) = \sum_{i=1}^4 \gamma'_i(s)e_i$ has zero length for a distinguished parameter s .

We consider a Cartan null quaternionic curve β in the dimension four Minkowski space (R_1^4, h) with a Cartan frame $\{L, N, U, W\}$ with respect to a pseudo-arc parameter s together with the Cartan curvatures p and τ . Then the Cartan equations are;

$$L' = W, N' = (p - \tau)U + pW$$

$$U' = (p - \tau)L, W' = pL + N$$

or

$$L' = W, N' = (\tau + p)U + pW$$

$$U' = (\tau + p)L, W' = pL + N$$

where

$$h(L, L) = h(N, N) = h(L, U) = h(N, U) = h(W, U) = h(N, W) = h(L, W) = 0$$

$$h(U, U) = h(W, W) = +1, h(L, N) = -1.$$

C. Canal surfaces in \mathbb{R}_1^3

A canal surface is described by the envelope of a one parameter family of spheres which are centered at a spine curve $C(s)$ with a radius given by the function $r(s)$ in the Euclidean space. In the case of $r(s)$ is constant, it is called a tubular surface. When we take the spine curve as a straight line, it is actually the surface of revolution. The great circles of a canal surface lie in the normal plane of the spine curve at every point.

Similar to the Euclidean case, in the Minkowski space \mathbb{R}_1^3 , canal surfaces are formed as the envelopes of a family of pseudo spheres such as de-Sitter space, hyperbolic sphere or null cone (S_1^2 , H_1^2 or Q^2 , respectively).

Assume that $C(s)$ is a space curve in \mathbb{R}_1^3 . Then the canal surface $X(s, \theta)$ admitting $C(s)$ as the spine curve which can be given in the following form:

$$X(s, \theta) = C(s) + \lambda(s, \theta)\alpha(s) + \mu(s, \theta)\beta(s) + \omega(s, \theta)\gamma(s)$$

where $\{\alpha(s), \beta(s), \gamma(s)\}$ is the attached orthonormal frame on $C(s)$ and $\{\lambda, \mu, \omega\}$ are second order differentiable functions on s and θ . The following equation is satisfied;

$$\|X(s, \theta) - C(s)\|^2 = \epsilon r(s)^2$$

where $\epsilon = \pm 1$ or 0 .

When $C(s)$ is a null curve, it arises three cases depending on the type of the pseudo spheres. The cases are;

- The canal surface $X(s, \theta)$ is foliated by S_1^2 (i.e. $\epsilon = 1$)
- The canal surface $X(s, \theta)$ is foliated by H_1^2 (i.e. $\epsilon = -1$)
- The canal surface $X(s, \theta)$ is foliated by Q^2 (i.e. $\epsilon = 0$)

III. CANAL SURFACES THROUGH A NULL QUATERNIONIC SPINE CURVE

We construct the canal surfaces by using a null quaternionic curve as the spine curve and have three cases depending on the type of the foliating pseudo-spheres.

Let $\{L, N, W, U\}$ be the Cartan frame attached to the null quaternionic curve $C(s)$. Then the canal surface can be defined as

$$X(s, \theta) = C(s) + \alpha(s, \theta)L(s) + \beta(s, \theta)N(s) + \gamma(s, \theta)W(s) + \mu(s, \theta)U(s) \quad (1)$$

Case 1.

Let the canal surface $X(s, \theta)$ be foliated by the pseudo sphere S_1^3 . Since $X(s, \theta) - C(s)$ is a normal vector to the surface, we have

$$h(X(s, \theta) - C(s), X_s) = 0 \quad (2)$$

$$h(X(s, \theta) - C(s), X_\theta) = 0 \quad (3)$$

so that X_θ and X_s are tangent to the pseudo sphere S_1^3 [29]. Since $\epsilon = 1$,

$$\|X(s, \theta) - C(s)\|^2 = r^2(s) \quad (4)$$

Then we have following two equations by using the equation (1):

$$\gamma^2 + \mu^2 - 2\alpha\beta = r^2 \quad (5)$$

$$\gamma\gamma_s + \mu\mu_s - \alpha_s\beta - \alpha\beta_s = rr' \quad (6)$$

On the other hand, we differentiate the equation (1) with respect to s and use the equation (6) to obtain

$$rr' = \beta \quad (7)$$

Since $X(s, \theta) - C(s)$ is the normal vector it can be parallel to N or perpendicular to L hence it is a lightlike or spacelike vector, respectively.

i. Suppose that the normal vector is lightlike, i.e. parallel to N . Then we have

$$h(X(s, \theta) - C(s), N) = -\alpha = 0 \quad (8)$$

$$h(X(s, \theta) - C(s), L) = -\beta = -1 \quad (9)$$

Using the equations (7), (8) and (9), we calculate

$$r^2(s) = 2(s \pm k)$$

where k is a constant number. If we substitute the last equation in (5), we get

$$\gamma(s, \theta) = \sqrt{2(s \pm k)} \cos \theta$$

$$\mu(s, \theta) = \sqrt{2(s \pm k)} \sin \theta$$

where $\theta \in [0, 2\pi]$. Therefore, we obtain the parameterization of the surface as:

$$X(s, \theta) = C(s) + N(s) + \sqrt{2(s \pm k)} \cos \theta W(s) + \sqrt{2(s \pm k)} \sin \theta U(s) \quad (10)$$

ii. Now suppose that the normal vector is spacelike. Then we have

$$h(X(s, \theta) - C(s), L) = -\beta = 0 \quad (11)$$

$$h(X(s, \theta) - C(s), N) = \alpha = 0 \quad (12)$$

Hence we find r as a constant. It means $X(s, \theta)$ is a tubular surface and in the following form:

$$X(s, \theta) = C(s) + r \cos \theta W(s) + r \sin \theta U(s) \quad (13)$$

Theorem 3.1 *The tubular surface defined in the equation (13) is a surface of revolution.*

Proof. Since $X(s, \theta) - C(s) \perp L$ and r is constant, we have $\beta = 0$ and

$$rr' = 0$$

$$\Leftrightarrow rr' - \alpha\gamma + \alpha\gamma = 0$$

$$\Leftrightarrow -\alpha\beta_s - \beta\alpha_s - \alpha\gamma + \alpha\gamma + \gamma\gamma_s + \mu\mu_s - \beta = h(X(s, \theta) - C(s), X_s) = 0$$

The last equation implies $p = \tau = 0$, hence $C(s)$ is a straight line.

Case 2.

Suppose that the canal surface $X(s, \theta)$ is foliated by the pseudo sphere H_1^3 . Since $\epsilon = -1$. Then we have

$$\|X(s, \theta) - C(s)\|^2 = -r^2(s)$$

$$h(X(s, \theta) - C(s), X_s) = 0$$

$$h(X(s, \theta) - C(s), X_\theta) = 0$$

so that X_θ and X_s are tangent to the pseudo sphere H_1^3 . Following similar steps we obtain $rr' = \beta$. Then we find

$$r^2(s) = 2(-s \pm k)$$

where k is a constant number and $\alpha = 0$.

i. If the normal vector is lightlike, then we have the canal surface which can be written in the following form:

$$X(s, \theta) = C(s) + N(s) + \sqrt{2(-s \pm k)} \cos \theta W + \sqrt{2(-s \pm k)} \sin \theta U \quad (14)$$

ii. Now suppose that the normal vector is spacelike, since $\gamma^2 + \mu^2 = -r^2$, this is a contradiction.

Case 3.

If the canal surface $X(s, \theta)$ is foliated by the pseudo sphere Q^3 , we have following subcases:

i. Let the normal vector be parallel to N . Then $\alpha = 0$ and $\beta = 1$ hence $\gamma = \mu = 0$. We obtain

$$X(s, \theta) = C(s) + N(s) \quad (15)$$

However, the equation (15) does not imply a surface.

ii. Once we choose the normal vector as spacelike, we get $\gamma = \mu = 0$. Hence it does not construct a surface.

Theorem 3.2 Canal surface defined in the equation (10) has singularities if the principal curvatures p and τ of the curve $C(s)$ satisfy one of the following equations:

i.

$$\tau(s) = \frac{1}{2\sin(\theta)^2(s+k)} \sqrt{\left(\pm 4 \sqrt{\left(\frac{\cos(\theta)^2}{2} + \frac{\sin(\theta)}{2} - \frac{1}{2}\right)\sqrt{2s+2k} + (-p(s)\cos(\theta))^2 + (-\sin(\theta) + 1)p(s) + s+k\right)\cos(\theta)(s+k) + \sqrt{2s+2k}\sin(\theta) + 4\left(-\frac{p(s)\cos(\theta)^2}{2} + \left(-\frac{p(s)\sin(\theta)}{2} + k+s\right)\cos(\theta) + \frac{p(s)}{2}\right)(s+k)}{(s+k)^2}$$

ii.

$$\tau(s) = \frac{1}{2\sin(\theta)^2(s+k)} \sqrt{\left(\pm 4 \sqrt{\left(-\frac{\cos(\theta)^2}{2} - \frac{\sin(\theta)}{2} + \frac{1}{2}\right)\sqrt{2s+2k} + (-p(s)\cos(\theta))^2 + (-\sin(\theta) + 1)p(s) + s+k\right)\cos(\theta)(s+k) + \sqrt{2s+2k}\sin(\theta) - 4\left(\frac{p(s)\cos(\theta)^2}{2} + \left(-\frac{p(s)\sin(\theta)}{2} + k+s\right)\cos(\theta) - \frac{p(s)}{2}\right)(s+k)}{(s+k)^2}$$

Proof. Using the equation (10) we calculate the partial derivatives X_s and X_θ . Then we have

$$E = h(X_s, X_s) = -2\sqrt{2(s \pm k)}\cos\theta(1 + \sqrt{2(s \pm k)}(p(s) - \tau(s) + p(s)\cos\theta)) + (p(s) + \frac{\cos\theta}{\sqrt{2(s \pm k)}})^2 + (p(s) - \tau(s) + \frac{\sin\theta}{\sqrt{2(s \pm k)}})^2$$

$$G = h(X_\theta, X_\theta) = 2(s \pm k)$$

$$F = h(X_s, X_\theta) = -\sqrt{2(s \pm k)}(\sin\theta(p(s) + \frac{\cos\theta}{\sqrt{2(s \pm k)}}) - \cos\theta(p(s) - \tau(s) + \frac{\sin\theta}{\sqrt{2(s \pm k)}}))$$

We obtain the mentioned cases in the Theorem3.2 for $EG - F^2 = 0$ by using a symbolic programming language.

Corollary 3.1 If the spine curve is a planar null quaternionic one, then the corresponding canal surface has singularities for:

$$p(s) = \frac{1}{4\left(\cos(\theta)\sin(\theta) + \frac{1}{2}\right)(s+k)} \sqrt{\left(\pm 4 \sqrt{\cos(\theta)\left(\left(-\frac{\cos(\theta)^2}{2} + \left(\frac{\sin(\theta)}{2} - \frac{1}{2}\right)\cos(\theta) - \frac{\sin(\theta)}{2} + \frac{1}{2}\right)\sqrt{2s+2k} + \cos(\theta)(\cos(\theta) + 1)^2(s+k)^2\right)}(s+k)^2 - (\cos(\theta) + \sin(\theta))\sqrt{2s+2k} + 4\cos(\theta)(s+k)^2(\cos(\theta) + 1)\right)}$$

Now assume that the canal surface is regular. We can give following theorems:

Theorem 3.3 Gauss curvature of the canal surface defined in equation (10) is

$$K = \left(\left(\cos(\theta)\sqrt{2s+2k}(p(s) - \tau(s)) + \frac{d}{dx}p(s) - \frac{d}{ds}p(s) - \frac{\sin(\theta)}{(2s+2k)^{3/2}}\right)^2 + \left(1 + \sqrt{2s+2k}(p(s) - \tau(s) + p(s)\cos(\theta)) + \sqrt{2s+2k}\cos(\theta)p(s) + \frac{d}{ds}p(s) - \frac{\cos(\theta)}{(2s+2k)^{3/2}}\right)^2 - \left(\frac{p(s)-t(t)+p(t)\cos(\theta)}{\sqrt{2s+2k}} + \sqrt{2s+2k}\left(\frac{d}{dt}p(s) - \frac{d}{dt}t(s) + \left(\frac{d}{dt}p(t)\cos(\theta) + \left(p(t) + \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{2t+2k}}\right)p(t) + \left(p(t) - t(t) + \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{2t+2k}}\right)(p(t) - t(s))\left(\frac{2\cos(\theta)}{\sqrt{2t+2k}} + p(t)\right)\right)\right) \right. \\ \left. (2s+2k)\sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2(2s+2k) - \left(-\left(1 + \sqrt{2s+2k}(p(s) - \tau(s) + p(s)\cos(\theta)) + \sqrt{2s+2k}\cos(\theta)p(s) + \frac{d}{ds}p(s) - \frac{\cos(\theta)}{(2s+2k)^{3/2}}\right)\cos(\theta)\sqrt{2s+2k} - \left(\cos(\theta)\sqrt{2s+2k}(p(s) - u(s)) + \frac{d}{dt}p(s) - \frac{d}{dt}t(s) - \frac{\sin(\theta)}{(2s+2k)^{3/2}}\right)\sqrt{2s+2k}\sin(\theta)\right)^2\right) / \left(\left(-4k - 4z + 2p(s)\cos(\theta) + 2\sin(\theta)(p(s) - 2(s))\right)\sqrt{2s+2k} - 3((k+t) - \frac{\pi(s)}{2})p(s) + \frac{\pi(s)^2}{4}\right)(s+k)\cos(\theta)^2 - s(p(s) - \tau(s))\left(-\frac{p(s)\sin(\theta)}{2} + k+s\right)(s+k)\cos(\theta) + (2s+2k)p(s)^2 - 4\pi(s)(s+k)p(s) + 1 + (2s+2k)\tau(s)^2\right)$$

where $p(s)$ and $\tau(s)$ are the curvature and torsion of the null quaternionic spine curve, respectively.

Theorem 3.4 Mean curvature of the canal surface defined in equation (10) is

$$\begin{aligned}
 H = & \left(32(s+k) \left(-\left(p(s)^2 - 2p(s)\tau(s) + \frac{\tau(s)^2}{2} \right) (s+k)^2 \cos(\theta)^3 + (s+k)^2 \sin(\theta) \left(-\frac{\tau(s)^2}{2} + p(s)^2 \right) \cos(\theta)^2 + \left(\frac{(s+k)^2 p(s)^2}{2} - \left(\tau(s) + \frac{s}{4} \right) (s+k)^2 p(s) + \frac{1}{8} + \frac{\tau(s)(s+k)^2}{2} \right) \cos(\theta) - \frac{\sin(\theta)(s+k)^2 p(s)^2}{2} \right. \right. \\
 & - \frac{p(s)(s+k)^2}{4} + \frac{\tau(s)(s+k)^2}{2} + \frac{\sin(\theta)}{8} \left. \left(\frac{d}{ds} p(s) \right) + \left(p(s)(s+k)^2 (p(s) - \tau(s)) \cos(\theta)^3 - (s+k)^2 \sin(\theta) \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{2} \right) \tau(s) \cos(\theta)^2 - (p(s) - \tau(s))(s+k)^2 \left(p(s) - \frac{1}{2} \right) \cos(\theta) + \frac{\sin(\theta)(s+k)^2 p(s)^2}{2} \right. \right. \\
 & - \frac{p(s)(s+k)^2}{4} - \frac{\sin(\theta)}{8} \left. \left(\frac{d}{ds} \tau(s) \right) + (s+k)^2 \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{2} \right) \tau(s) \cos(\theta)^3 + p(s) \sin(\theta) (s+k)^2 (p(s) - \tau(s)) \cos(\theta)^2 + \left(-\frac{(k+s-\frac{3}{2})(s+k)p(s)^2}{2} - (s+k) \left(k+s + \frac{\tau(s)}{2} + \frac{1}{4} \right) p(s) + \left(\frac{k}{4} + \frac{s}{4} \right) \tau(s)^2 \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{8} + \frac{k^2}{2} + sk + \frac{s^2}{2} \right) \cos(\theta) - \frac{(p(s) - \tau(s))(s+k) \left(\left(-\frac{\sin(\theta)}{4} - \frac{1}{4} \right) p(s) + k + s + \frac{\sin(\theta)}{2} \right)}{2} \right) \sqrt{2s+2k-16(s+k)^3 \left(\frac{d}{ds} p(s) \right)^2 + 16(s+k)^3 \left(\cos(\theta)^2 + \frac{d}{ds} \tau(s) + \cos(\theta) - 1 \right) \left(\frac{d}{ds} p(s) \right)} - 8(s \\
 & + k)^3 \left(\frac{d}{ds} \tau(s) \right)^2 - 16 \cos(\theta) (s+k)^3 \left(\frac{d}{ds} \tau(s) \right) - 64 p(s) (p(s)^2 - 4p(s)\tau(s) + 2\tau(s)^2) (s+k)^4 \cos(\theta)^4 + 128 (p(s) - \tau(s)) \left(\sin(\theta) p(s)^2 + \frac{\tau(s)(\sin(\theta)+1)p(s)}{2} - \frac{\tau(s)^2(\sin(\theta)+1)}{4} \right) (s+k)^4 \cos(\theta)^3 \\
 & + 64 (s+k)^2 \left(\sin(\theta) (s+k)^2 p(s)^3 - 2 \left(\frac{s}{8} + \tau(s) (\sin(\theta)+1) \right) (s+k)^2 p(s)^2 + \left((s+k)^2 (\sin(\theta)+1) \tau(s)^2 + \left(sk + \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}k - \frac{1}{4} \right) \tau(s) + \frac{1}{2} + \frac{s^2}{2} + \frac{k^2}{2} + sk \right) p(s) - \frac{\tau(s)^2 (2sk + s^2 + k^2 - \frac{1}{2})}{4} \right) \cos(\theta)^2 \\
 & - 32 \left((s+k)^2 (\sin(\theta)+1) p(s)^2 + \left(2k^2 + 4sk + 2s^2 + \frac{\sin(\theta)}{2} \right) p(s) - k^2 - 2sk - s^2 - \frac{\sin(\theta)}{2} - \frac{1}{2} \right) (p(s) - \tau(s)) (s+k)^2 \cos(\theta) + 16(s+k)^3 p(s)^3 - 16(s+k)^2 ((s+i)\tau(s) + i + (2s+1)k + s^2 + s \\
 & - \frac{1}{2}) p(s)^2 + 32 \left(k + s + \frac{\tau(s)}{4} + \frac{1}{2} \right) (s+k)^3 \tau(s) p(s) - 16(s+k)^3 \left(k + s + \frac{1}{2} \right) \tau(s)^2 - 8k^3 + (-24s-4)k^2 + (-24s^2-8s)k - 8s^3 - 4s^2 - 1 \Big) / \left(64 \left(\left(-\frac{p(s)}{4} + \frac{s}{2} + \frac{k}{2} \right) \cos(\theta) \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\sin(\theta)(p(s) - \tau(s))}{4} \sqrt{2s+2k} + (s+k) \left(\left(k + s - \frac{\tau(s)}{2} \right) p(s) + \frac{\tau(s)^2}{4} \right) \cos(\theta)^2 + (p(s) - \tau(s))(s+k) \left(-\frac{p(s)\sin(\theta)}{2} + k + s \right) \cos(\theta) + \left(-\frac{s}{4} - \frac{k}{4} \right) p(s)^2 + \frac{\pi(s)(s+k)p(s)}{2} - \frac{1}{8} + \left(-\frac{s}{4} \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{k}{4} \right) \tau(s)^2 \right) (s+k)^2
 \end{aligned}$$

where $p(s)$ and $\tau(s)$ are the curvature and torsion of the null quaternionic spine curve, respectively.

Theorem 3.5 Tubular surface defined in the equation (13) has singularities if the principal curvatures $p(s)$ and $\tau(s)$ of the curve $C(s)$ satisfy the following equation:

$$p(s) = \frac{\tau(s)}{2} - \frac{1}{2r \cos \theta}$$

Suppose that the tubular surface in (13) is regular. Then we can give the following theorems:

Theorem 3.6 Gauss curvature of the tubular surface defined in equation (13) is

$$\begin{aligned}
 K = & \frac{1}{4 \left(\frac{1}{2} + r \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{2} \right) \cos(\theta) \right) \cos(\theta) r} \left(-1 + 8 \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{2} \right) p(s) r^2 \cos(\theta)^4 + 6(p(s) \sin(\theta) r - \tau(s) \sin(\theta) r + 1) \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{3} \right) r \cos(\theta)^3 \right. \\
 & \left. + (-9p(s)^2 r^2 + (6r^2 \tau(s) + 2r \sin(\theta)) p(s) - \tau(s)^2 r^2 - 2\tau(s) \sin(\theta) r + 1) \cos(\theta)^2 - 6 \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{3} \right) r \cos(\theta) \right)
 \end{aligned}$$

Theorem 3.7 Mean curvature of the tubular surface defined in equation (13) is

$$H = \frac{-1 - 10 \left(\frac{\tau(s)^2}{5} + \left(-\frac{4p(s)}{5} + \frac{1}{5} \right) \tau(s) + p(s)^2 - \frac{2p(s)}{5} \right) r^2 \cos(\theta)^2 - 6 \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{3} \right) r \cos(\theta)}{8 \left(\frac{1}{2} + r \left(p(s) - \frac{\tau(s)}{2} \right) \cos(\theta) \right) \cos(\theta) r}$$

Corollary 3.2 The tubular surface defined in equation (13) is minimal if the following relation holds for the curvature and torsion of the null quaternionic spine curve:

$$p(s) = \frac{\frac{2r \cos(\theta) \tau(s)}{5} + \frac{r \cos(\theta)}{5} - \frac{3}{10} \pm \sqrt{-4\tau(s)^2 \cos(\theta)^2 r^2 - 4\tau(s) \cos(\theta)^2 r^2 + 4r^2 \cos(\theta)^2 - 4r \cos(\theta) \tau(s) + 8r \cos(\theta) - 1}}{\cos(\theta) r}$$

Proof. We solve the equation $H = 0$ for the mean curvature given in Theorem 3.7 by using a symbolic programming language such as Maple.

Corollary 3.3 The tubular surface defined in equation (13) is developable if

$$\begin{aligned}
 \tau(s) = & \frac{1}{(\sin(\theta)^2 - 1)(2\sin(\theta)^2 - 1)r} \left(4r \sin(\theta)^4 p(s) \pm 2\sqrt{1 - \sin(\theta)^2} r \sin(\theta)^3 p(s) - \right. \\
 & \left. 5r \sin(\theta)^2 p(s) \pm 2\sqrt{1 - \sin(\theta)^2} r \sin(\theta) p(s) + \sin(\theta)^3 \pm \sqrt{1 - \sin(\theta)^2} \sin(\theta)^2 + \right. \\
 & \left. r p(s) - \sin(\theta) \right)
 \end{aligned}$$

where $p(s)$ and $\tau(s)$ are the curvature and torsion of the null quaternionic spine curve, respectively.

IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

The semi real quaternions and null quaternionic curves are developing subjects and attract attention of many scientists. Hence, in this work, we introduce the canal surfaces that admit the spine curve as a null quaternionic curve. It is obtained two kinds of canal surfaces that one is actually a tubular surface. We give the

singularity conditions for that kind of a surfaces by using a symbolic programming language. When we assume that the surface is regular, we can interpret the Gauss and Mean curvatures by the means of the Cartan curvatures of the null quaternionic spine curve. Lastly, we give the relations between the Cartan curvatures of the spine curve for the pre-defined tubular surface to be a minimal or developable one.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author sincerely thanks to the editor and the referees for helpful suggestions.

REFERENCES

- [1] Hamilton, W. R. (1844). On quaternions; or on a new system of imaginaries in algebra. *Lond. Edinb. Dublin. Philos. Mag. J. Sci.*, 25 (3), 489-495.
- [2] Aslan, S & Yaylı, Y. (2016). Canal surfaces with quaternions. *Adv. Appl. Clifford Algebras*, 26, 31–8.
- [3] Gök, İ. (2017). Quaternionic approach of canal surfaces constructed by some new ideas. *Adv. Appl. Clifford Algebras*, 27, 1175-1190.
- [4] Shoemake, K. (1985). Animating rotation with quaternion curves. *Proceedings of the 12th annual conference on computer graphics and interactive techniques (SIG-GRAPH 85)*, 19, New York, NY, USA, 245-254.
- [5] Haralick, R. M. (2017). Longitudinal & Scalar Waves: Biquaternion generalized maxwell equations. Computer Science, Graduate Center, 172.
- [6] Rosenfeld, B. (1997). Geometry of Lie groups. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 397.
- [7] Dyachkova, M. (2007). On Hopf bundle analogue for semiquaternion algebra. *10th International Conference DGA*, Olomouc, Czech Republic, 45-47.
- [8] Bharathi, K. & Nagaraj, M. (1987). Quaternion valued function of a real variable Serret-Frenet formula. *Indian J. Pure Appl. Math.*, 18, 507-511.
- [9] Çöken, A. C. & Tuna, A. (2004). On the quaternionic inclined curves in the semi-Euclidean space $E_{4,2}$. *Appl. Math. Comput.*, 155, 373–389.
- [10] Gök, İ., Okuyucu, O. Z., Kahraman, F. & Hacısalihoglu, H. H. (2011). On the quaternionic B2-slant helix in the Euclidean space E_4 . *Adv. Appl. Clifford Algebras*, 21, 707–719.
- [11] Körpınar, T. & Baş, S. (2016). Characterization of Quaternionic Curves by Inextensible Flows. *Prespacetime Journal*, 7, 1680-1684.
- [12] Okuyucu, O. Z. (2013). Characterizations of the quaternionic Mannheim curves in Euclidean space E_4 . *Mathematical Combinatorics*, 2, 44-53.
- [13] Kecilioglu, O. & Ilarslan, K. (2013). Quaternionic Bertrand Curves in Euclidean 4-Space. *Bull. Math. Anal. Appl.*, 5 (3), 27-38.
- [14] Önder, M. (2020). Quaternionic Salkowski Curves and Quaternionic Similar Curves. *Proc. Natl. Acad. Sci. India, Sect. A Phys. Sci.*, 90 (3), 447-456.
- [15] Shoemake, K. (1985). Animating rotation with quaternion curves. *Proceedings of the 12th annual conference on computer graphics and interactive techniques (SIG-GRAPH 85)*, 19, New York, NY, USA, 245-254 .
- [16] Duggal, K. L. & Bejancu, A. (1996), Lightlike Submanifolds of Semi-Riemannian Manifolds and Applications. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht / Boston / London, 303.
- [17] Ferrandez A., Gimenez A. & Lucas P. (2001). Null Helices in Lorentzian Space Forms. *Int. J. Mod. Phys. A*, 16 (30), 4845-4863.
- [18] Çöken, A. C. & Ciftci, U. (2005). On the Cartan curvatures of a null curve in Minkowski spacetime. *Geom. Dedicata*, 114, 71-78.
- [19] Kahraman, T. (2019). Null Quaternionic Slant Helices in Minkowski Spaces. *International J.Math. Combin.*, 1, 45-52.
- [20] Aksoy, A. T. (2016). Pseudo-Spherical Null Quaternionic Curves in Minkowski Space R^4 . *Acta Physica Polonica A*, 130, 259-261.
- [21] Özel, Ş., Külahçı, M. A. & Bektaş, M. (2021). The Characterizations Of Null Quaternionic Curves In Minkowski 3-Space. *Turkish Journal of Science and Technology*, 16 (2), 261-267.
- [22] Aksoy, A. T. & Çöken, A. C. (2015). Null Quaternionic Curves in Semi-Euclidean 3-Space of Index ν . *Acta Physica Polonica A*, 128, B-286-B-289.
- [23] Maekawa, T., Patrikalakis, M. N., Sakkalis, T. & Yu, G. (1998). Analysis and applications of pipe surfaces. *Comput. Aided Geom. Des.*, 15, 437–58 .

- [24] Shani, U. & Ballard, D. H. (1984). Splines as embeddings for generalized cylinders. *Computer Vision , Graphics and Image Processing*, 27, 129-156.
- [25] Wang, L., Ming, C. L. & Blackmore, D. (1995). Generating sweep solids for NC verification using the SEDE method. *Proceedings of the Fourth Symposium on Solid Modeling and Applications*, Atlanta, 364-375.
- [26] Farouki, R. T. & Sverrissor, R. (1996). Approximation of rolling-ball blends for free-form parametric surfaces. *Computer-Aided Design*, 28, 871-878.
- [27] Xu, Z., Feng, R. & Sun, JG. (2006). Analytic and algebraic properties of canal surfaces. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 195 (1-2), 220-228.
- [28] Jinhua Qian, J., Tian, X., Fu, X. & Kim, Y. H. (2020). Classifications of Canal Surfaces with the Gauss Maps in Minkowski 3-Space. *Mathematics*, 8, 1453.
- [29] Gray, A., Abbana, E. & Salamon, S. (2006). *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica* (3rd edition), Studies in Advanced Mathematics, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, FL, 1016.
- [30] Ates, F. (2021). Tubular Surfaces Around a Null Curve and Its Spherical Images, *FUJMA*, 4 (3), 210-220.

Araştırma Makalesi- Research Article

Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR Yöntemleriyle Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçimi*

Plastic Moulding Machine Selection Using Fuzzy TOPSIS and Fuzzy VIKOR

Bahar Arslan^{1*}, Özgür Eski²

Geliş / Received: 25/01/2022

Revize / Revised: 19/07/2022

Kabul / Accepted: 01/09/2022

ÖZ

Firmalar, makine ekipman yatırımları yaparken çoğu kez benzer özelliklere sahip alternatif ekipmanlar arasında seçim yapmak durumundadır. Birçok alternatif ekipman arasından karar vericiler açısından en uygun seçimin yapılması, birden fazla sayıda kriterin değerlendirilmesini gerektiren, karmaşık bir karar verme sürecidir. Bu süreçte Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada bir firmanın plastik enjeksiyon makinesi seçim süreci ele alınmış, kriterlerin ve alternatiflerin önem dereceleri dilsel ifadelerle belirlenmiş ve problem bulanık tabanlı ÇKKV yöntemleri ile çözülmüştür. Gerçekleştirilen çalışmada makine seçimi konusunda mevcut literatürde sıklıkla kullanılan maliyet, teknik özellikler gibi kriterlerin yanı sıra; çevre dostu olma, güvenlik ve güvenilirlik kriterlerine yer verilmiştir. Belirlenen kriterler alanında uzman üç kişiden oluşan bir karar verme ekibiyle değerlendirilmiştir. Sonrasında, karar vericilerin beklentilerini en iyi şekilde karşılayacak ekipmanın seçimi için Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemleri uygulanmıştır. Son olarak belirlenen alternatifler arasından seçim yapabilmek için

Anahtar Kelimeler- *Bulanık Mantık, Çok Kriterli Karar Verme, Bulanık TOPSIS, Bulanık VIKOR, Makine Seçimi*

ABSTRACT

Companies often have to choose the best equipment among alternatives with similar features when making machinery and equipment investment. Making the most appropriate choice among much alternative equipment is a complex decision-making process that requires evaluation of multiple criteria. Multi Criteria Decision Making methods are frequently used in this process. In this study, the plastic injection machine selection process of a company was considered. The importance levels of the criteria and alternatives were determined by using linguistic expressions and the decision-making problem was solved by fuzzy-based MCDM methods. In this study, in addition to the traditional criteria such as cost and technical features, which are frequently used in the current literature, environmental friendliness, safety, and reliability criteria are included. First, the determined criteria were evaluated by a decision-making team consisting of three experts in the field. Then Fuzzy TOPSIS and Fuzzy VIKOR methods were applied for choosing the alternative that best satisfies the selection criteria of decision makers.

Keywords- *Fuzzy Logic, Multi Criteria Decision Making, Fuzzy TOPSIS, Fuzzy VIKOR, Machine Selection*

*Bu makale, Bahar ARSLAN'ın 705844 No'lu ve "Bulanık Tabanlı Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Makine Ekipman Seçimi" başlıklı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: baharslan.95@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-4700-6384>)

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Türkiye.

²İletişim: ozgur.eski@cbu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5454-8029>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Manisa, Türkiye.

I. GİRİŞ

Üretim işlemlerinin düzgün ve akıcı bir biçimde ilerleyebilmesi açısından işletme için seçilecek makine ve ekipman tercihi, yetkililer ve mühendisler için oldukça önemli bir karar verme problemidir. Üretimin aksamadan sorunsuz bir şekilde ilerlemesi üretimde kullanılacak olan makine ve ekipmanlara bağlıdır. Aksi takdirde; hatalı seçilmiş makine ve ekipmanlar, üretim sistemlerinin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Makine seçiminde satın alma maliyeti, makine performansı, satış sonrası hizmet, kullanım kolaylığı, ürün kalitesi, enerji tüketimi fazla sayıda ölçüt etkin rol almaktadır. Bu sebeple, işletme yöneticileri ve operatörler sadece satın alınacak makinenin maliyetine değil, bu karara ilişkin tüm kriterleri göz önünde bulundurmaya özen göstermelidir. Makine ve ekipman seçim kararında, işletmelerin ihtiyaçlarına yönelik kriterlerin, konusunda uzman karar vericiler tarafından doğru şekilde belirlenmesi ve bütün seçeneklerin belirlenmiş olan ölçütlere göre tercih edilen metotlar uygulanarak uygun bir şekilde analiz edilmesi, işletme ihtiyaçlarına uygun alternatifin seçimi için oldukça önem arz etmektedir.

Karar vermeyi gerektiren problemlerde, kararı etkileyen fazla sayıda etmenin olması, bu etmenlerin hepsinin aynı anda dikkate alınması ve çok sayıda seçenek içerisinde tercih yapılması gereken zamanlarda çoğunlukla çok kriterli karar verme (ÇKKV) metotlarına başvurulur [1]. Kişilerin yaptıkları sözel değerlendirmelerin, matematiksel karar sürecine uyumlu hale getirilmesinde bulanık mantık dahilinde bulanık sayıların kullanılması ile olağandır. Bulanık sayıların kullanılması ile net olmayan bulanık verilerin karar verme modellerine uygulanması kolaylaşmaktadır. Dolayısı ile karar vericiler tarafından sözel değerlendirmelerin tercih edildiği, sözel ifade barındıran çok kriterli karar problemlerinin çözümünde net sayıların aksine bulanık sayıların tercih edilmesi daha uygun çözümler sunabilmektedir.

Manisa’ da faaliyet gösteren bir plastik enjeksiyon firmasında gerçekleştirilen bu çalışmada, makine seçim problemine çözüm aranmıştır. İnsan faktöründen kaynaklanan subjektifliğin üstesinden gelebilmek adına üç karar vericinin görüşlerine yer verilerek gerçekleştirilen uygulamada; bulanık üçgen sayılar ile birlikte bulanık yamuk sayılar da kullanılmış hem kullanılan sayı türüne hem de kullanılan yöntemlere göre karşılıklı analizler gerçekleştirilmiştir. Maliyet, teknik özellikler, satış sonrası servis desteği gibi kriterlerin yanı sıra güvenlik, güvenilirlik ve çevre dostu olma kriterlerine yer verilmiştir [2].

Çalışma altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmada ele alınan konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde konu ile ilgili mevcut literatürde gerçekleşen çalışmalardan söz edilmiştir. Üçüncü bölümde, Bulanık TOPSIS yöntemine ve uygulama aşamalarına değinilmiştir. Dördüncü bölümde, Bulanık VIKOR yönteminden ve işlem adımlarından bahsedilmiştir. Beşinci bölümde, plastik enjeksiyon makinesi seçimi ve seçim süreci detaylı bir şekilde anlatılmış, uygulama sonuçlarına yer verilmiştir. Son bölümde ise, genel bir değerlendirme yapılmış, gelecek çalışmalara yönelik fikir önerilerinde bulunulmuştur.

II. LİTERATÜR ÖZETİ

İşletmeler devamlılıklarını sağlamak amacıyla farklı düzeylerde kararlar vermek durumdadırlar. Böyle kararlar verilirken, karar verme durumunda olan kişiler gerçekçi bilgilere ve analiz proseslerine gereksinim duyarlar. Bu sebeplerden dolayı karar verme proseslerine doğru bilimsel yöntemlerin eklenmesi çözümün objektif ve gerçekçi olmasına olanak tanır. Farklı karar vermeyi gerektiren problemler ile karşılaşan yetkililer için kolay olmayan durumlardan bir diğeri de, seçenekler arasından ihtiyaçlar ile en örtüşeninin tercih edilmesidir. İnsan faktöründen kaynaklanan subjektifliğin üstesinden gelebilmek, aynı zamanda kriterleri eş zamanlı değerlendirmek adına Bulanık ÇKKV yöntemleri son zamanlarda sıkça kullanılmaktadır [3].

Şirketlerde makine ve ekipman tercihi problemleri en önemli karar verme problemlerinin başında gelmektedir. Geçmiş çalışmalarda da ÇKKV teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen makine seçimi problemleri aşağıda gösterilen Tablo 1’de özet bir şekilde gösterilmiştir.

Tablo 1. Makine Seçiminde Kullanılan ÇKKV Teknikleri

Kullanılan Yöntem	Ele Alınan Kriterler	Uygulama Alanı	Referanslar
Bulanık AHP, WASPAS	Satın alma maliyeti, toplam alan, makine sayısı, verimlilik	Esnek imalat sistemi için makine seçimi	[4]
AHP, ANP	Kalite, maliyet ve teslimat	İmalat işletmesi için takım tezgahı seçimi	[5]
Bulanık AHP	Verimlilik, esneklik, alan, uyarlanabilirlik, uygulama, güvenilirlik, güvenlik ve çevre, bakım ve onarım	Üretim işletmesi için makine ekipman seçimi	[6]
Bulanık TOPSIS	Maliyet, teknik özellikler, yazılım, gerekli alan, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik	AS/RS seçimi	[7]
Bulanık AHP, PROMETHEE	Esneklik, teknik özellikler, maliyet, güvenlik ve çevre	Esnek imalat hücrelerinde makine seçimi	[8]
Bulanık AHP ve Gri İlişkisel Analizi	Maliyet, operasyonel esneklik, kurulum kolaylığı, sürdürülebilirlik, servis kolaylığı, verimlilik, takım tezgahı uyumluluğu, emniyet	Takım tezgahı seçimi	[9]
Bulanık DEMATEL	Maliyet, kalite, esneklik, performans, teknik özellik	Dokuma tezgahı seçimi	[10]
Bulanık DEMATEL, Bulanık VIKOR	Fiyat, güvenlik, kullanım kolaylığı, verimlilik, kapasite, kalite, kurulum süresi, servis ve bakım ve güvenilirlik	Mermer kesim makinesi seçimi	[11]
ENTROPI, Bulanık DEMATEL, Bulanık VIKOR	Maksimum iş mili hızı, faydalı kullanım oranı, maksimum iş mili torku, başarısızlık oranı, bağlantı hassasiyeti ve maliyet	Takım tezgahı seçimi	[12]
EDAS	Dikiş hızı, maksimum dikiş uzunluğu, fiyat, enerji	Dikiş makinesi seçimi	[13]
KEMIRA-M, COPRAS	Blok kesiminin boyu, maksimum lama sayısı, motor gücü, tüketilen elektrik, garanti süresi, servis ağı ve birim fiyat	Mermer işleme makinesi seçimi	[14]
Bulanık DEMATEL, PROMETHEE	Kalite, maliyet, kullanımda kolaylık, satış sonrası servisler, güvenlik, endüstriyel seçin, fiziksel özellikler, makine performansı	Kablo üretimi için makine seçimi	[15]
ENTROPI, CRITIC ve ROV	Dikiş kafası sayısı, dikiş hızı, bordür dikim genişliği, dikiş adım sayısı, desen sayısı, kapasite, makine ağırlığı, tüketilen enerji, nakliye alanı, garanti süresi, servis hizmetleri, manuel olmayan bordür sarıncı, ip koptu/bitti sensörü	Yatak kenarı bordür dikiş makinesi seçimi	[16]
TODIM ((Tomada de Decisao Interativa Multicriterio)	Yükleme kapasitesi, erişim mesafesi, tekrarlanabilirlik hassasiyeti, ağırlık, giriş gücü, eksen çalışma alanı, eksen çalışma hızı	Robot seçimi	[17]
AHP	Maliyet, hacim kullanımı, yükseklik kullanımı, yük erişebilirliği ve stok devir hızı	Depolama sistemi seçimi	[18]
TOPSIS	Kaldırma kapasitesi, pil kapasitesi, kaldırma yüksekliği, yük ile taşıma hızı ve fiyat	Forklift seçimi	[19]
ANP	Teknoloji, tasarım, fonksiyon ve çalışma yöntemi, firma imajı, kurulum aşaması, danışmanlık eğitimi ve maliyet	3D koordinat ölçüm makinesi	[20]
Entropi Ağırlıklı TOPSIS	Motor gücü, devir hızı, Z ekseni, maksimum testere çapı ve fiyat	Mermer işleme makinesi seçimi	[21]
Bulanık VIKOR	Fiyat, kalite, satış sonrası hizmetler, istenilen ölçülerde paketleme yapabilmek, kullanım kolaylığı, güvenlik, performans	Paketleme makinesi seçimi	[22]
AHP, TOPSIS, PROMETHEE	Teknik özellikler (klas gereklilikleri, güç ve devir, ağırlık ve hacim, güç harici istenilen teknik yeterlikler), sözleşmeye bağlı kriterler (ilk yatırım maliyeti, teslim süresi) marka güvenilirliği, işletme masrafları (yakıt tüketimi, yağ tüketimi), bakım masrafları	Gemi inşa projesi için ana makine seçimi	[23]
TOPSIS, MOORA, VIKOR	Güç, devir hızı, ağırlık, hacim, ilk yatırım maliyeti, teslim süresi, marka güvenilirliği, yakıt tüketimi, yağ tüketimi, servis desteği	Gemi inşa projesi için ekipman seçimi	[24]
Bulanık AHP	Kalite (teknoloji, performans), maliyet (fiyat, ödeme koşulları), servis (garanti, yedek parça, aracı firma), verimlilik (kapasite, kullanım kolaylığı)	Tekstil işletmesi için makine seçimi	[25]
Bulanık SWARA, Bulanık ARAS	Fiyat, performans, kapasite, kalite, bakım ve onarım	Torna takım tezgahı seçimi	[26]
CRITIC ve MAUT	Fiyat, eğer örgü sayısı, kalıp programcılığa erişim, kullanmak için kalifiye personele erişim, makine, yedek parçaların mevcudiyeti, hizmet fırsatları, enerji tüketimi	Tekstil işletmesi için makine seçimi	[27]
Bulanık AHP ve TOPSIS	Maliyet, güvenlik, verimlilik, esneklik, kullanım kolaylığı ve satış sonrası servis	CNC tezgahı seçimi	[28]
Bulanık PROMETHEE ve PROMETHEE	Sektörel kullanılabilirlik, fiyat, ağırlık, çalışma uyumu, işlemeye uyumlu olduğu tel çapı çeşidi ve hacim	Gaz altı kaynak makinesi seçimi	[29]

Tablo 1. (Devamı)

Kullanılan Yöntem	Ele Alınan Kriterler	Uygulama Alanı	Referanslar
Bulanık AHP ve PROMETHEE	Teknik kriterler (kolay menü kullanımı, otomatik kalibrasyon, çoklu ekstrüderler, filament çapı, wifi kullanılabilirliği, korumalı ekipman, kolay destek ayrımı, ağırlık), ekonomik kriterler (fiyat, tek tip filament kullanımı, enerji tüketimi), performans kriteri (yüksek hacimli üretim yeteneği, üretim süresi, kurulum zamanı), çevre kriteri (gürültü emisyonu, karbondioksit emisyonu, atık miktarı)	3D yazıcı seçimi	[30]
BWM (Best Worst Method)	Karıştırma numarası, dijital malzeme sayısı, maliyet, kopma uzaması, çekme mukavemeti, shore sertliği, sipariş sıklığı, görsel ve estetik modelleme	Katmanlı üretim makinesi seçimi	[31]

Mevcut literatür incelediğinde makine ve ekipman seçim probleminde genellikle ÇKKV yöntemlerinden AHP, TOPSIS, PROMETHEE yöntemlerinin tercih edildiği görülmektedir. Bulanık ÇKKV yöntemleri ise son yıllarda tercih edilmeye başlanmıştır, fakat klasik ÇKKV yöntemlerinde olduğu gibi sıklıkla Bulanık AHP, Bulanık TOPSIS yöntemlerine başvurulduğu görülmüştür.

Uygulama alanları açısından değerlendirdiğimizde, ÇKKV yöntemlerinin makine ekipman seçimi amacıyla çok farklı alanlarda kullanıldığını görmekteyiz. Çalışmamızın kapsamı doğrultusunda, imalat işletmelerinde gerçekleşen çalışmaları içeren literatür üzerinde yoğunlaşmıştır. İmalat işletmelerinde gerçekleşen çalışmalar dikkate alındığında, ÇKKV yöntemlerinin tekstil, mermer işleme, gemi yapımı, metal işleme, katmanlı üretim, vb. farklı yelpazede makine ekipman seçim problemlerinin çözümü için kullanıldığını görmekteyiz (Tablo 1). Son dönemlerde, Endüstri 4.0 ile hız kazanan otomasyona geçiş sürecinin etkisiyle, ÇKKV yöntemlerinin otomasyona dayalı tezgahların, taşıma depolama sistemlerinin ve katmanlı üretim için uygun ekipmanların seçimi amacıyla sıklıkla kullanıldığı da göze çarpmaktadır.

Çalışmalarda dikkate alınan kriterler incelendiğinde; uygulama alanlarına göre değişkenlik göstermekle birlikte, genellikle maliyet, teknik özellikler, kullanım kolaylığı gibi temel kriterlerin kullanıldığı göze çarpmaktadır. Son dönemlerde ise enerji verimliliği, çevre, iş güvenliği vb. konulara ilişkin kriterlerin de gündeme gelmeye başladığı gözlenmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada ise, plastik enjeksiyon makinesi seçim problemi için erişebildiğimiz mevcut literatürde birlikte kullanılmamış olan Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemlerine başvurulmuştur. Üçgen ve yamuk bulanık sayılar ayrı ayrı kullanılmış, kullanılan bulanık sayı türüne göre yöntem sonuçları karşılaştırılmıştır. Makine seçiminde maliyet, satış sonrası servis, vida L/D oranı, enjeksiyon basıncı, plastikleştirme oranı, kilitleme gücü, pompa motor gücü, makine ağırlığı, yağ tankı kapasitesi enjeksiyon oranı gibi net sayısal bilgi gerektiren kriterlerin yanı sıra insan yargılarını ön planda tutan güvenlik, güvenilirlik, çevre dostu olma kriterlerine yer verilmiştir.

Seçilen plastik enjeksiyon makinesinin çevreye olabildiğince az zarar vermesi, çevreye duyarlı üretim yapması istenmektedir. Bu sebeple; makinelerin hammadde ve enerji kullanımını baz alarak çevre dostu olma kriteri alternatifler arasından tercih yapılabilmesi için belirlenmiştir. Seçilen plastik enjeksiyon makinesinin çalışanlar ve çevrenin güvenliği açısından risk oluşturma düzeyinin minimum seviyede tutulabilmesi için güvenlik kriteri, makinenin minimum düzeyde arıza yapması ve bakım onarım sürelerinin ve bu süreçlerin takibinin kolay yapılabilmesi adına güvenilirlik kriteri eklenerek karar vericilerin görüşlerine yer verilmiştir.

III. BULANIK TOPSIS YÖNTEMİ

Bulanık TOPSIS yönteminin, uygulanmasına ilk kez 1989 yılında gerçekleşmiştir [32]. Karar verileri içindeki ve ekip karar verme prosesindeki belirgin olmayan durum göz önünde bulundurulduğunda; net sayılar ile ifade edilemeyen değişkenler, süreçte yer alan bütün ölçütlerin ağırlıklarını analiz etmek ve bütün seçeneklerin ölçütleri baz alarak derecelendirilmesini gerçekleştirebilmek amacıyla tercih edilir.

Bulanık TOPSIS yöntemi uygulama adımları aşağıda verilmiştir [32].

- Karar vericilerden bir karar verme ekibi oluşturulur ve değerlendirme ölçütleri tespit edilir.
- Kriterlerin önem ağırlıklarını bulmak için uygun sözel değişkenler belirlenir ve ölçütler baz alınarak seçeneklerin analiz edilmesi sözel değişkenlerden yararlanılarak gerçekleştirilir.

Tablo 2’de ölçütlerin göreceli önem ağırlıklarını ifade eden sayısal olmayan değişkenler ve üçgen bulanık sayı olarak gösterimleri, Tablo 3’te alternatiflerin analiz edilmesi amacıyla kullanılan sayısal olmayan değişkenler ve üçgen bulanık sayı biçiminde gösterimleri yer almaktadır [33].

Tablo 2. Ölçütler için göreceli önem ağırlıklarını ifade eden sayısal olmayan değişkenler ve üçgen bulanık sayı biçiminde gösterimleri [32]

Sözel Değişken	Üçgen Bulanık Sayı
Çok Düşük (CD)	(0, 0, 0.1)
Düşük (D)	(0, 0.1, 0.3)
Biraz Düşük (BD)	(0.1, 0.3, 0.5)
Orta(O)	(0.3, 0.5, 0.7)
Biraz Yüksek (BY)	(0.5, 0.7, 0.9)
Yüksek (Y)	(0.7, 0.9, 1.0)
Çok Yüksek (ÇY)	(0.9, 1.0, 1.0)

Tablo 3. Alternatif analizi için kullanılan sayısal olmayan değişkenler ve üçgen bulanık sayı biçiminde gösterimleri [33]

Sözel Değişken	Üçgen Bulanık Sayı
Çok Kötü (CK)	(0, 0, 1)
Kötü (K)	(0, 1, 3)
Biraz Kötü (BK)	(1, 3, 5)
Orta(O)	(3, 5, 7)
Biraz İyi (Bİ)	(5, 7, 9)
İyi (İ)	(7, 9, 10)
Çok İyi (Çİ)	(9, 10, 10)

Bulanık çok kriterli bir karar problemi, matris düzeninde Eşitlik (1)’de gösterilmektedir [34].

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \\ \tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada \tilde{D} bulanık karar matrisini, \tilde{W} bulanık ağırlıklar matrisini ifade etmektedir. \tilde{x}_{ij} ve \tilde{w}_j değişkenleri sayısal olmayan değişkenler yardımıyla ifade edilmektedir. Bahsi geçen sayısal olmayan niteliklerin üçgen bulanık sayı olarak gösterimi $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ ve $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$ şeklinde ifade edilir [34].

- Karar verme ekibinde yer alan kişilerin belirttikleri önem ağırlıkları ve seçeneklerin analiz edilmesi için belirledikleri sayısal olmayan değişkenler, üçgen ya da yamuk bulanık sayılara çevrilir.

K adet karar verici kişi olduğunda, ölçütlerin önem seviyeleri ve bütün ölçütlere göre ayrı ayrı seçeneklerin değerlendirmeleri Eşitlik (2) ve Eşitlik (3)’ te gösterilen eşitlikler yardımıyla bulunmaktadır [35].

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 (+) \tilde{x}_{ij}^2 (+) \dots (+) \tilde{x}_{ij}^K] \quad (2)$$

$$\tilde{W}_j = \frac{1}{K} [\tilde{w}_j^1 (+) \tilde{w}_j^2 (+) \dots (+) \tilde{w}_j^K] \quad (3)$$

Burada \tilde{x}_{ij}^k ve \tilde{w}_j^k sırasıyla k. karar vericinin belirlediği seçeneklerin değerlendirilmesini ve ölçütler için gösterilen göreceli ağırlıkları ifade etmektedir

- Bulanık karar matrisinin oluşturulmasının ardından normalize edilmiş bulanık karar matrisi $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}$ belirlenir. B kümesi fayda-yarar ölçütleri kümesini ifade ederken, C kümesi maliyet- zarar ölçütleri kümesini gösterir. Elde edilen matrisin bulunması Eşitlik (4) ve (5)' de gösterilmektedir [36].

$$r_{ij} = (\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+}), j \in B \quad r_{ij} = (\frac{a_j^-}{c_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{b_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{a_{ij}^-}), j \in C \quad (4)$$

$$C_j^+ = \text{Maksimum } c_{ij} \quad j \in B \quad a_j^- = \text{Minumum } a_{ij} \quad j \in C \quad (5)$$

- Normalize edilmiş karar matrisi ağırlık ile çarpılır. Bütün ölçütlerin önem ağırlığı vardır, ağırlık ile çarpılan normalize edilmiş karar matrisi Eşitlik (6)' da gösterilen eşitlik ile bulunmaktadır [35].

$$V^{\sim} = [v_{ij}^{\sim}]_{m \times n} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$v_{ij}^{\sim} = r_{ij}^{\sim}(\cdot)w_j^{\sim}$$

Ağırlık ile çarpılan normalize edilmiş bulanık karar matrisinde \tilde{v}_{ij} ifadesi normalize edilmiş pozitif üçgen bulanık sayıyı ifade etmektedir, değeri [0,1] kapalı aralığında değişim göstermektedir [34].

- Bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözüm bulunur. Eşitlik (7) yardımıyla (\tilde{A}^+) ve (\tilde{A}^-) değerleri belirlenir.

$$\begin{aligned} \tilde{A}^+ &= (v_1^{\sim+}, v_2^{\sim+}, \dots, v_n^{\sim+}) \\ \tilde{A}^- &= (v_1^{\sim-}, v_2^{\sim-}, \dots, v_n^{\sim-}) \\ \check{v}_j^+ &= (1,1,1) \quad \check{v}_j^- = (0,0,0) \quad j=1,2,3,\dots,n(7) \end{aligned}$$

- Bütün alternatiflerin ayrı ayrı bulanık pozitif ideal çözüme ve bulanık negatif ideal çözüme mesafeleri Eşitlik (8) ve Eşitlik (9) yardımıyla bulunur [34].

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}^{\sim}, v_j^{\sim+}) \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (8)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}^{\sim}, v_j^{\sim-}) \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (9)$$

- Bütün seçeneklerin için yakınlık katsayısı değerleri Eşitlik (10) yardımıyla bulunur.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad i=1,2,3,\dots,m \quad (10)$$

- Yakınlık katsayısına göz önünde bulundurarak, bütün seçenekler sıralanır ve en yüksek yakınlık katsayısı değerini gösteren seçenek tercih edilir.

IV. BULANIK VIKOR YÖNTEMİ

Bulanık VIKOR Yöntemi, bulanık ve fazla sayıda kriter barındıran problemlerin çözümü için geliştirilen yöntemlerden biridir [36]. Bu yöntem, nihai bir karara varmada karar verici uzmanların yardımıyla, birbiriyle çelişkili kriterleri olan problemler için uzlaştırıcı çözümler bulmaya ve seçenekler içerisinde bir sıralama yapmaya dayanır [37]. Belirtilen yöntemde uzlaşık çözüm, ideal çözüme en yakın olan çözümdür [38]. Aynı zamanda uzlaşık çözüm, ideal çözüme “yakınlık” ölçüsüne dayanarak çok amaçlı sıralama dizinini sunmaktadır [37]. Bütün

alternatifler göz önünde tutularak tüm kriterlerin değerlendirildiği düşünüldüğünde, uzlaşık düzenleme en uygun seçeneğe yakınlık mesafesi baz alarak yapılır [37].

Bulanık VIKOR algoritması adımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Karar verme sorununu çözebilmek adına K adet karar verici, n adet kriter ve m adet alternatif belirlenir.
- Sayısal olmayan değişkenler ve bu değişkenlerin bulanık sayı karşılıkları belirlenir. Sayısal olmayan değişkenler kriter ağırlıklarını tespit etmek ve seçenekleri değerlendirmek için kullanılır.
- f_{ij} , j kriterine göre i seçeneğinin mertebesini gösterdiğinde karar verme ölçütlerinin önem ağırlıkları ve ölçütleri temelinde seçeneklerin mertebeleri Eşitlik (11) ve (12)'den yararlanarak bütün kriterler için yalnız bir değerlendirme olacak şekilde birleştirilir, bütünleştirilmiş değerler elde edilir.

$$W_j^- = 1/K [W_j^{-1}(+) W_j^{-2}(+) \dots (+) W_j^{-K}] \quad (11)$$

$$f_{ij}^- = 1/K [f_{ij}^{-1}(+) f_{ij}^{-2}(+) \dots (+) f_{ij}^{-K}] \quad (12)$$

\tilde{f}_{ij} , i seçeneğinin j. ölçüte göre derecesini ve \tilde{w}_j ise j. ölçütün önem ağırlığını ifade etmektedir.

- Bütün ölçütler ve seçenekler bir değere indirgindikten sonra, i seçenekli ve j ölçütlü \tilde{D} bulanık karar matrisi ve W_j ağırlık matrisi Eşitlik (13)'te belirtildiği gibi elde edilir.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{f}_{11} & \tilde{f}_{12} & \dots & \tilde{f}_{1j} \\ \tilde{f}_{21} & \tilde{f}_{22} & \dots & \tilde{f}_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{f}_{i1} & \tilde{f}_{i2} & \dots & \tilde{f}_{in} \end{bmatrix}, \tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad (13)$$

$i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$

- Bulanık karar matrisinde j ölçütü fayda yönünden analiz ediliyorsa bütün ölçüt fonksiyonlarının en iyi \tilde{f}_j^* ve en kötü \tilde{f}_j^- değerleri Eşitlik (14) uygulanarak ifade edilir.

$$\tilde{f}_j^* = \max_j \tilde{f}_{ij}, \quad \tilde{f}_j^- = \min_j \tilde{f}_{ij} \quad (14)$$

- \tilde{S}_i değerleri Eşitlik (15) ve \tilde{R}_i değerleri Eşitlik (16) uygulanarak bulunur.

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n [w_j (f_j^* - f_{ij}^*) / (f_j^* - f_j^-)] \quad (15)$$

$$R_i^- = \max_j [w_j (f_j^* - f_{ij}^*) / (f_j^* - f_j^-)] \quad (16)$$

\tilde{S}_i , bütün ölçütler bazında i. seçeneğin en iyi bulanık değere uzaklığının toplamıdır.

\tilde{R}_i , j. ölçüt bazında i. seçeneğin en kötü bulanık değerlere olan maksimum uzaklığıdır.

- $\tilde{S}_i^*, \tilde{S}_i^-, \tilde{R}_i^*, \tilde{R}_i^-, \tilde{Q}_i$ değerleri Eşitlik (17) ve Eşitlik (18)'e göre hesaplanır.

$$S_i^* = \min_i S_i^-, S_i^{*-} = S_i^{*-} = \max_i S_i^- \quad (17)$$

$$R_i^* = \min_i R_i^-, R_i^{*-} = \max_i R_i^- \quad (18)$$

\tilde{S}_i^* , üst seviyedeki çoğunluk kuralını ve \tilde{R}_i , farklı görüşte olanların alt seviyede bireysel pişmanlığını ifade etmektedir. \tilde{Q}_i , indeksi grup faydası ile bireysel pişmanlığın beraber değerlendirilmesi ile bulunur. v değeri maksimum grup faydasını sağlayan stratejinin önemini ifade eder iken, $(1-v)$ bireysel pişmanlık değerini gösterir. Uzlaşmacı çoğunluk için genellikle maksimum grup faydasının değeri 0,5 alınır.

$$\tilde{Q}_i = v(\tilde{S}_i^- - \tilde{S}_i^*) / (\tilde{S}_i^- - \tilde{S}_i^*) + (1-v)(\tilde{R}_i^- - \tilde{R}_i^*) / (\tilde{R}_i^- - \tilde{R}_i^*) \quad (19)$$

- Bu adımda bulanık sayıların aritmetik ortalaması alınarak durulaştırılmış ve S_i , R_i ve Q_i değerleri bulunur. Sonrasında bulunan değerlere göre seçenekler sıralanır. İndeks değeri en küçük olan en iyi alternatif gösterirken, değeri büyük olan en kötü seçeneği ifade eder.
- Belirlenen en iyi seçeneğin uzlaşık çözüm olduğunun ya da olmadığına tespit edilmesi sağlanır. Uzlaştırıcı en iyi çözümü belirlemek için aşağıda belirtilen iki şartın sağlanıp sağlanmadığına bakılır.

1.Koşul: Kabul Edilebilir Avantaj: Bu şart en iyi ve en yakın seçenek arasında belirli bir ayırım olduğunun kanıtını sağlar ve Eşitlik (20) kullanılarak şartın sağlanıp sağlanmadığına bakılır.

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ \quad (20)$$
$$DQ = \frac{1}{m-1}$$

a' değeri sıralamada birinci sırada yer alan alternatif, a'' sıralamada en iyi ikinci alternatif ve m' de seçenek adetini ifade eder.

2.Koşul: Kabul edilebilir istikrar: En iyi Q değerine sahip a' seçeneği S ve R değerlerinden en az bir tanesinde en iyi değeri sağlamalıdır.

Şayet şart 1 sağlanmaz ise, ve $Q(a(m)) - Q(a') \leq DQ$ olursa, $a(m)$ ve a' uzlaştırıcı çözüm olur.

Şayet şart 2 sağlanmaz ise, her ne kadar a' 'nin kısmi bir avantajı olsa da karar vermedeki istikrar yetersiz kalır. Bu sebeple uzlaşık çözümleri a' ve a'' aynıdır.

- Uzlaşık çözüm kümesinde koşulları gerçekleştiren küçük Q_i değerine sahip seçenek uzlaşık çözüm olarak bulunur.

V. UYGULAMA

Bu çalışma ile, artan iş hacmini karşılamak için yeni bir plastik enjeksiyon makinesi yatırım kararı alan bir plastik enjeksiyon firması için, makine seçim probleminin çözüm bulunması amaçlanmıştır. Şirket açısından en doğru alternatifin seçilebilmesi adına alanında uzman iki üretim mühendisi ve bir kalite mühendisinden oluşan üç kişilik bir karar verme ekibi oluşturulmuştur. Karar vericilerin yaptığı görüşmeler sonucu on üç adet kriter belirlenmiş, uzun araştırmalar sonucu bu kriterleri karşılayan beş adet plastik enjeksiyon makinesi alternatifi belirlenmiştir.

Seçeneklerin analiz edilmesi ve ihtiyaçlar ile en örtüşen alternatifin tercih edilmesi için; çok sayıda ölçüt ve karar verme durumdaki kişilere dayalı değerlendirmeleri gerektiren durumlar ile son zamanlarda uygulanan ÇKKV yöntemlerinden Bulanık VIKOR ve Bulanık TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir.

Uygulanacak yöntemlerin ve ölçütlerin tanımlanmasının ardından alternatif olarak gösterilen beş farklı ekipteki makine çeşitleri, bütün ölçütlere göre karar vericiler tarafından ayrı ayrı sözel değişkenler ile analiz edilmiş ve bu sözel ifadeler bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Kullanılan iki teknikte de tanımlanan bu bulanık sayılar baz alınarak işlem aşamaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında belirtilen kriterler ve yönleri Tablo 4'te, alternatifler Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Kriter Seti

Kriter	Gösterim	Yön
Maliyet Avantajı	K1	Maksimum
Satış Sonrası Servis	K2	Maksimum
Güvenlik	K3	Maksimum
Güvenilirlik	K4	Maksimum
Çevre Dostu Olma	K5	Maksimum
Vida L/D Oranı	K6.1	Maksimum
Enjeksiyon Basıncı	K6.2	Maksimum
Plastikleştirme Oranı	K6.3	Maksimum
Kilitleme Gücü	K6.4	Maksimum
Pompa Motor Gücü	K6.5	Maksimum
Makine Ağırlığı	K6.6	Maksimum
Yağ Tankı Kapasitesi	K6.7	Maksimum
Enjeksiyon Oranı	K6.8	Maksimum

Tablo 5. Plastik Enjeksiyon Makinesi Alternatifleri

Alternatifler	Kod
MA 9000IIS/6800	A1
MA 1000IIS/8400	A2
MA 12000IIS/8400	A3
BL 1600EKH/C1050	A4
ENGEL DUO/1000	A5

Ölçütlerin bulunmasından sonra, karar verme ekibi Tablo 2'deki sayısal olmayan ifadeleri kullanarak ölçütleri önem seviyesini baz alarak analiz etmiştir. Bu değerlendirmeler aşağıda Tablo 6'da verilmiş olup, kullanılan dilsel ifadelerin üçgen bulanık sayı olarak şekli de Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 6. Kriter Ağırlıklarının Karar Vericiler Tarafından Değerlendirilmesi

	KV1	KV2	KV3
K1	ÇY	Y	Y
K2	BD	D	BD
K3	Y	ÇY	ÇY
K4	BY	BY	O
K5	ÇY	Y	Y
K6.1	D	BD	D
K6.2	BY	O	O
K6.3	D	BD	D
K6.4	D	D	D
K6.5	O	BD	D
K6.6	D	D	BD
K6.7	BD	O	D
K6.8	ÇD	ÇD	D

Tablo 7. Kriter Ağırlıklarının Bulanık Sayılar ile Belirtilmesi

	KV1	KV2	KV3
K1	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
K2	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)
K3	(0.7,0.9,1.0)	(0.9,1.0,1.0)	(0.9,1.0,1.0)
K4	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)
K5	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
K6.1	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)
K6.2	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)
K6.3	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)
K6.4	(0.0,0.1,0.3)	(0.0,0.1,0.3)	(0.0,0.1,0.3)
K6.5	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)
K6.6	(0.0,0.1,0.3)	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)
K6.7	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.1,0.3)
K6.8	(0.0,0.0,0.1)	(0.0,0.0,0.1)	(0.0,0.1,0.3)

Alanında uzman üç karar verici tarafından değerlendirilen ölçüt ağırlıkları Eşitlik (3) kullanılarak bir değere indirgenmiş ve elde edilen değerlere de Tablo 8’de yer verilmiştir.

Tablo 8. Ölçüt Ağırlıklarının Bulanık Sayılar ile İfade Edilmesi

Kriterler	Ağırlıklar
K1	(0.77,0.94,1.0)
K2	(0.067,0.24,0.44)
K3	(0.84,0.97,1.0)
K4	(0.44,0.64,0.84)
K5	(0.77,0.94,1.0)
K6.1	(0.04,0.17,0.37)
K6.2	(0.37,0.57,0.77)
K6.3	(0.04,0.17,0.37)
K6.4	(0.0,0.1,0.3)
K6.5	(0.14,0.3,0.5)
K6.6	(0,0.4,0.17,0.37)
K6.7	(0.14,0.3,0.5)
K6.8	(0,0,0.04,0.17)

Sonraki aşamada ise, karar verme durumundaki kişiler ayrı ayrı bütün ölçütleri dikkate alarak alternatif plastik enjeksiyon makinesi tiplerini tek tek değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmeler Tablo 9’da gösterilmiştir. Tablo 3 kullanılarak dilsel ifadelerin üçgen bulanık sayılara dönüşümü de Tablo 10’da gösterilmiştir.

Tablo 9. Alternatiflerin Kriterlere Göre Karar Vericiler Tarafından Değerlendirilmesi

Kriterler	Alternatifler	KV1	KV2	KV3	Kriterler	Alternatifler	KV1	KV2	KV3
K1	A1	Çİ	İ	Çİ	K6.3	A1	Bİ	0	Bİ
	A2	İ	Bİ	Bİ		A2	İ	Bİ	Bİ
	A3	O	O	BK		A3	İ	İ	Bİ
	A4	İ	Bİ	Bİ		A4	Bİ	O	BK
	A5	Bİ	Bİ	O		A5	Çİ	İ	İ
K2	A1	BK	O	BK	K6.4	A1	BK	O	BK
	A2	O	Bİ	İ		A2	O	O	O
	A3	O	İ	İ		A3	Bİ	Bİ	O
	A4	BK	O	BK		A4	Bİ	İ	İ
	A5	O	İ	Çİ		A5	O	BK	O
K3	A1	İ	Çİ	Çİ	K6.5	A1	K	BK	K
	A2	Bİ	İ	Çİ		A2	BK	O	BK
	A3	Bİ	İ	İ		A3	K	O	BK
	A4	BK	O	BK		A4	Çİ	İ	Çİ
	A5	İ	Çİ	Çİ		A5	K	BK	BK
K4	A1	İ	İ	Bİ	K6.6	A1	Bİ	O	Bİ
	A2	Bİ	Bİ	O		A2	Bİ	O	Bİ
	A3	Bİ	İ	O		A3	İ	Bİ	İ
	A4	O	BK	BK		A4	Çİ	İ	Çİ
	A5	Bİ	İ	Bİ		A5	O	O	Bİ
K5	A1	Çİ	İ	Çİ	K6.7	A1	O	Bİ	BK
	A2	İ	Bİ	İ		A2	Bİ	Bİ	O
	A3	Çİ	Bİ	İ		A3	O	O	BK
	A4	Bİ	O	O		A4	Çİ	İ	İ
	A5	İ	Bİ	İ		A5	Bİ	İ	Bİ

Tablo 9. (Devamı)

Kriterler	Alternatifler	KV1	KV2	KV3	Kriterler	Alternatifler	KV1	KV2	KV3
K6.1	A1	BK	K	BK	K6.8	A1	K	BK	K
	A2	O	BK	O		A2	O	O	BK
	A3	O	O	O		A3	Bİ	BK	O
	A4	İ	Çİ	Çİ		A4	Bİ	O	İ
	A5	İ	İ	İ		A5	O	O	Bİ
K6.2	A1	Bİ	İ	K					
	A2	Bİ	Bİ	BK					
	A3	İ	Bİ	BK					
	A4	O	BK	K					
	A5	İ	İ	Çİ					

Tablo 10. Alternatiflerin Kriterlere Göre Karar Vericiler Tarafından Değerlendirilmesinin Bulanık Sayılarla Gösterilmesi

Kriterler	Alternatifler	KV1	KV2	KV3	Kriterler	Alternatifler	KV1	KV2	KV3
K1	A1	(9,10,10)	(7,9,10)	(9,10,10)	K6.3	A1	(5,7,10)	(3,5,7)	(5,7,9)
	A2	(7,9,10)	(5,7,9)	(5,7,9)		A2	(7,9,10)	(5,7,9)	(5,7,9)
	A3	(3,5,7)	(3,5,7)	(1,3,5)		A3	(7,9,10)	(7,9,10)	(5,7,9)
	A4	(7,9,10)	(5,7,9)	(5,7,9)		A4	(5,7,9)	(3,5,7)	(1,3,5)
	A5	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)		A5	(9,10,10)	(7,9,10)	(7,9,10)
K2	A1	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)	K6.4	A1	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)
	A2	(3,5,7)	(5,7,9)	(7,9,10)		A2	(3,5,7)	(3,5,7)	(3,5,7)
	A3	(3,5,7)	(7,9,10)	(7,9,10)		A3	(5,7,10)	(5,7,10)	(3,5,7)
	A4	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)		A4	(5,7,10)	(7,9,10)	(7,9,10)
	A5	(3,5,7)	(7,9,10)	(9,10,10)		A5	(3,5,7)	(1,3,5)	(3,5,7)
K3	A1	(7,9,10)	(9,10,10)	(9,10,10)	K6.5	A1	(0,1,3)	(1,3,5)	(0,1,3)
	A2	(5,7,9)	(7,9,10)	(9,10,10)		A2	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)
	A3	(5,7,9)	(7,9,10)	(7,9,10)		A3	(0,1,3)	(3,5,7)	(1,3,5)
	A4	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)		A4	(9,10,10)	(7,9,10)	(9,10,10)
	A5	(7,9,10)	(9,10,10)	(9,10,10)		A5	(0,1,3)	(1,3,5)	(1,3,5)
K4	A1	(7,9,10)	(7,9,10)	(5,7,9)	K6.6	A1	(5,7,9)	(3,5,7)	(5,7,10)
	A2	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)		A2	(5,7,9)	(3,5,7)	(5,7,10)
	A3	(5,7,9)	(7,9,10)	(3,5,7)		A3	(7,9,10)	(5,7,9)	(7,9,10)
	A4	(3,5,7)	(1,3,5)	(1,3,5)		A4	(9,10,10)	(7,9,10)	(9,10,10)
	A5	(5,7,9)	(7,9,10)	(5,7,9)		A5	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,10)
K5	A1	(9,10,10)	(7,9,10)	(9,10,10)	K6.7	A1	(3,5,7)	(5,7,9)	(1,3,5)
	A2	(7,9,10)	(5,7,9)	(7,9,10)		A2	(5,7,10)	(5,7,9)	(3,5,7)
	A3	(9,10,10)	(5,7,9)	(7,9,10)		A3	(3,5,7)	(3,5,7)	(1,3,5)
	A4	(5,7,9)	(3,5,7)	(3,5,7)		A4	(9,10,10)	(7,9,10)	(7,9,10)
	A5	(7,9,10)	(5,7,9)	(7,9,10)		A5	(5,7,10)	(7,9,10)	(5,7,10)
K6.1	A1	(1,3,5)	(0,1,3)	(1,3,5)	K6.8	A1	(0,1,3)	(1,3,5)	(0,1,3)
	A2	(3,5,7)	(1,3,5)	(3,5,7)		A2	(3,5,7)	(3,5,7)	(1,3,5)
	A3	(3,5,7)	(3,5,7)	(3,5,7)		A3	(5,7,9)	(1,3,5)	(3,5,7)
	A4	(7,9,10)	(9,10,10)	(9,10,10)		A4	(5,7,9)	(3,5,7)	(7,9,10)
	A5	(7,9,10)	(7,9,10)	(7,9,10)		A5	(3,5,7)	(3,5,7)	(5,7,9)
K6.2	A1	(5,7,9)	(7,9,10)	(0,1,3)					
	A2	(5,7,9)	(5,7,9)	(1,3,5)					
	A3	(7,9,10)	(5,7,9)	(1,3,5)					
	A4	(3,5,7)	(1,3,5)	(0,1,3)					
	A5	(7,9,10)	(7,9,10)	(9,10,10)					

Tablo 13. Üçgen Bulanık Sayılar ile Oluşturulan Ağırlıklı Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi

	K1			K2			K3			K4			K5			K6.1			K6.2		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
A1	0,64	0,91	1,00	0,02	0,16	0,44	0,70	0,94	1,00	0,29	0,55	0,84	0,64	0,91	1,00	0,01	0,09	0,37	0,20	0,44	0,77
A2	0,47	0,77	1,00	0,04	0,19	0,44	0,61	0,87	1,00	0,23	0,49	0,84	0,50	0,81	1,00	0,01	0,12	0,37	0,19	0,44	0,77
A3	0,28	0,64	1,00	0,04	0,20	0,44	0,59	0,90	1,00	0,25	0,58	0,84	0,56	0,84	1,00	0,02	0,12	0,37	0,20	0,45	0,77
A4	0,47	0,77	1,00	0,02	0,16	0,44	0,25	0,74	1,00	0,13	0,41	0,84	0,37	0,69	1,00	0,03	0,16	0,37	0,10	0,34	0,77
A5	0,40	0,71	1,00	0,05	0,21	0,44	0,70	0,94	1,00	0,27	0,53	0,84	0,50	0,81	1,00	0,03	0,15	0,37	0,28	0,53	0,77
	K6.3			K6.4			K6.5			K6.6			K6.7			K6.8					
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u			
A1	0,02	0,13	0,37	0	0,06	0,30	0,01	0,14	0,50	0,02	0,13	0,37	0,06	0,21	0,50	0,00	0,02	0,17			
A2	0,02	0,14	0,37	0	0,07	0,30	0,04	0,19	0,50	0,02	0,13	0,37	0,07	0,23	0,50	0,00	0,03	0,17			
A3	0,03	0,15	0,37	0	0,08	0,30	0,04	0,18	0,50	0,03	0,15	0,37	0,05	0,21	0,50	0,00	0,03	0,17			
A4	0,02	0,12	0,37	0	0,09	0,30	0,12	0,29	0,50	0,03	0,16	0,37	0,11	0,28	0,50	0,00	0,03	0,17			
A5	0,03	0,16	0,37	0	0,07	0,30	0,02	0,16	0,50	0,02	0,13	0,37	0,08	0,25	0,50	0,00	0,03	0,17			

Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi oluşturulmasının ardından Eşitlik (7) yardımıyla bulanık pozitif ideal çözüm (\tilde{A}^+) ve bulanık negatif ideal çözüm (\tilde{A}^-) tespit edilmiştir. Bu tanımlamada Chen (2000)'in Bulanık TOPSIS modeli gereği (\tilde{A}^+)'da karar ölçütü sayısı kadar (1, 1, 1), (\tilde{A}^-)'de karar ölçütü sayısı kadar (0, 0, 0) değeri bulunur.

Bütün seçeneklerin FPIS' den ve FNIS' den olan mesafeleri Vertex yöntemi kullanılarak (8) ve (9) Eşitlikleri yardımıyla hesaplanır. Elde edilen sonuçlar Tablo 14'te gösterilmiştir [33].

Tablo 14. FPIS ve FNIS' den Olan Uzaklıklar

Alternatifler	D_i^+	D_i^-
A1	8,43	5,58
A2	8,68	5,37
A3	8,73	5,35
A4	9,02	5,22
A5	8,53	5,45

Mesafelerin bulunmasının ardından Eşitlik (10) kullanarak her bir seçenek için yakınlık katsayıları hesaplanmıştır ve bulunan katsayılar Tablo 15'te belirtilmiştir.

Tablo 15. Yakınlık Katsayıları

Alternatifler	CC_i
A1	0,398
A2	0,382
A3	0,38
A4	0,367
A5	0,39

Tablo 15 incelendiğinde yakınlık katsayıları büyükten küçüğe göre sıralandığında, alternatifler $A1 > A5 > A2 > A3 > A4$ şeklinde olmaktadır. Yani 1 numaralı alternatif MA9000III/6800 en iyi seçim olacaktır. Bunu ENGEL DUO/1000, MA10000III/8400, MA12000III/8400 ve BL1600EKH/C1050 takip etmektedir.

Üçgen bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS yöntemindeki işlem adımları yamuk bulanık sayılar kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Yamuk bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS yönteminde Eşitlik (10) kullanarak bütün seçeneklerin yakınlık katsayıları hesaplanmıştır ve bu katsayılara Tablo 16'da belirtilmiştir.

Tablo 16. Yakınlık Katsayıları

Alternatifler	CC _i
A1	0,3991
A2	0,3935
A3	0,3939
A4	0,3872
A5	0,4001

Tablo 16'ya bakıldığında yakınlık katsayıları büyükten küçüğe göre, seçenekler $A5 > A1 > A3 > A2 > A4$ biçiminde olmaktadır. Yani 5 numaralı alternatif ENGEL DUO/1000 en uygun tercih olacaktır.

Üçgen bulanık sayılar kullanılarak VIKOR yöntemiyle problemi çözmek için; oluşturulan karar verme ekibi ile, Tablo 2'de kriter değerlendirmesi için belirtilen dilsel ifadeler, Tablo 8'de belirtilen kriter ağırlıkları, Tablo 3'te alternatif değerlendirmesi için gösterilen sözel ifadeler ve Tablo 12'de belirtilen bulanık karar matrisi baz alınmıştır. Bulunan değerlerin ardından bulanık VIKOR yöntemi için daha önce açıklanan işlem adımları izlenmiştir.

Tablo 8'deki bulanık sayıların ortalaması alınarak, hesaplanan yeni ağırlıklara Tablo 17'de değinilmiştir.

Tablo 17. Kriterin Ortalama Ağırlıkları ve Normalize Ağırlıklar

Kriterler	Ağırlıklar	Normalize Ağırlıklar
K1	0,9	0,16
K2	0,24	0,04
K3	0,93	0,17
K4	0,64	0,11
K5	0,9	0,16
K6.1	0,19	0,03
K6.2	0,57	0,10
K6.3	0,19	0,03
K6.4	0,13	0,02
K6.5	0,31	0,06
K6.6	0,19	0,03
K6.7	0,31	0,06
K6.8	0,07	0,01
TOPLAM	5,57	1,00

Normalize ağırlıklara bakıldığında karar vericiler tarafından yapılan değerlendirmelerde 0,17 değeriyle en önemli kriterin güvenlik olduğu, sonrasında bu kriteri maliyet avantajı ve çevre dostu olma kriterinin takip ettiği görülmektedir.

Bulanık VIKOR adımlarına göre gerçekleştirilen işlemler aşağıda gösterilmiştir. Her bir ölçüt için bulunan en iyi ve en kötü (\tilde{f}_j^* ve \tilde{f}_j^-) değerleri Eşitlik (17) kullanılarak Tablo 18'de belirtilmiştir.

Tablo 18. \tilde{f}_j^* ve \tilde{f}_j^- Değerleri

Kriterler	\tilde{f}_j^*			\tilde{f}_j^-		
K1	0,83	0,97	1	0,37	0,68	1
K2	0,7	0,89	1	0,29	0,65	1
K3	0,83	0,97	1	0,29	0,77	1
K4	0,66	0,86	1	0,29	0,65	1
K5	0,83	0,97	1	0,48	0,74	1
K6.1	0,83	0,97	1	0,15	0,54	1
K6.2	0,77	0,93	1	0,27	0,6	1
K6.3	0,77	0,93	1	0,43	0,71	1
K6.4	0,66	0,86	1	0,29	0,65	1
K6.5	0,83	0,97	1	0,09	0,46	1
K6.6	0,83	0,97	1	0,48	0,74	1
K6.7	0,77	0,93	1	0,37	0,68	1
K6.8	0,58	0,81	1	0,09	0,46	1

Bulunan en iyi ve en kötü (\tilde{f}_j^* ve \tilde{f}_j^-) değerleri durulaştırılmış ve Tablo 19'da belirtilmiştir.

Tablo 19. Ortalama \tilde{f}_j^* ve \tilde{f}_j^- Değerleri

Kriterler	\tilde{f}_j^*	\tilde{f}_j^-
K1	0,93	0,68
K2	0,86	0,65
K3	0,93	0,69
K4	0,84	0,65
K5	0,93	0,74
K6.1	0,93	0,56
K6.2	0,90	0,62
K6.3	0,90	0,71
K6.4	0,84	0,65
K6.5	0,93	0,52
K6.6	0,93	0,74
K6.7	0,90	0,68
K6.8	0,80	0,52

Her bir alternatif plastik enjeksiyon makinesi çeşidinin her bir kriter için olan bulanık değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış ve bulunan net değerleri Tablo 20'de ifade edilmiştir.

Tablo 20. Karar Matrisi İçin Net Değerler

	K1	K2	K3	K4	K5	K6.1	K6.2	K6.3	K6.4	K6.5	K6.6	K6.7	K6.8
A1	0,93	0,65	0,93	0,84	0,93	0,56	0,77	0,76	0,65	0,52	0,76	0,71	0,52
A2	0,81	0,79	0,87	0,76	0,84	0,68	0,76	0,81	0,71	0,65	0,76	0,76	0,68
A3	0,68	0,83	0,88	0,83	0,87	0,71	0,78	0,84	0,76	0,62	0,84	0,68	0,71
A4	0,81	0,68	0,69	0,65	0,74	0,93	0,62	0,71	0,84	0,93	0,93	0,90	0,80
A5	0,76	0,86	0,93	0,81	0,84	0,87	0,90	0,90	0,68	0,56	0,74	0,81	0,74

Net değerlerin hesaplanmasının ardından \tilde{S}_i değerleri Eşitlik (15) \tilde{R}_i değerleri Eşitlik (16), \tilde{Q}_i değeri Eşitlik (19) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları Tablo 21'de gösterilmiştir.

Tablo 21. Tüm Alternatif Plastik Enjeksiyon Makineleri İçin S, R, Q değerleri

	A1	A2	A3	A4	A5
S	0,32	0,48	0,47	0,7	0,34
R	0,06	0,08	0,16	0,17	0,11
Q	0	0,32	0,67	1	0,28

Farklı üst düzeyde grup yararını sağlayan strateji ağırlığı ile (v), zıt görüşte olanların minimum pişmanlığının ağırlığını ($1-v$) ifade eden değerlerin değişmesinin problem çözümünde nasıl bir etki yaratacağını görebilmek adına; farklı değerlerdeki (v) ve ($1-v$) ile hesaplanan Q değerleri Tablo 22’de belirtilmiştir.

Tablo 22. Alternatif Plastik Enjeksiyon Makinelerinin Farklı v Değerleri İçin Sıralama Sonuçları

v=0 için		v=0,25 için		v=0,50 için		v=0,75 için		v=1 için	
Sıralama	Qi	Sıralama	Qi	Sıralama	Qi	Sıralama	Qi	Sıralama	Qi
A1	0	A1	0	A1	0	A1	0	A1	0
A2	0,23	A2	0,27	A5	0,28	A5	0,17	A5	0,06
A5	0,5	A5	0,39	A2	0,32	A2	0,37	A3	0,4
A3	0,95	A3	0,81	A3	0,67	A3	0,53	A2	0,42
A4	1	A4	1	A4	1	A4	1	A4	1

Farklı v değerleri kullanarak gerçekleştirilen bu çalışmada en iyi alternatif her seferinde MA9000IIS/6800(A1) olarak bulunurken, en kötü alternatif BL1600EKH/C1050(A4) olarak bulunmuştur.

S , R ve Q değerlerinin bulunmasından sonra bu değerler küçükten büyüğe doğru sıralanmış olup problem çözümünde kullanılacak sıralama indeksleri Tablo 23’te gösterilmiştir.

Tablo 23. Farklı v Değerleri İçin Duyarlılık Analizi Sonuçları

Si Değerine Göre	Ri Değerine Göre	Qi Değerine Göre				
		v=0	v=0,25	v=0,5	v=0,75	v=1
A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
A5	A2	A2	A2	A5	A5	A5
A3	A5	A5	A5	A2	A2	A3
A2	A3	A3	A3	A3	A3	A2
A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4

Elde edilen sonuçlar $v=0,5$ için Tablo 24’te gösterilmiştir.

Tablo 24. Alternatif Plastik Enjeksiyon Makinelerinin S , R ve Q ’ya Göre Sıralanması

	1	2	3	4	5
S	A1	A5	A3	A2	A4
R	A1	A2	A5	A3	A4
Q	A1	A5	A2	A3	A4

Hesaplanan çözümün geçerli kılınabilmesi için iki şart vardır. Ancak bu şekilde, minimum Q değerine sahip seçenек, en iyi olarak değerlendirilecektir. Bu şartlar aşağıda gösterilmiştir;

C1: Kabul Edilebilir Avantaj

En iyi ve ikinci en iyi alternatiflerin Q değerlerinin farkına ve seçenек sayısını baz alarak gerçekleştirilen hesaplamada, şartın desteklenip desteklenmediği tespit edilmektedir.

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ$$

a" burada; Q değerine göre sıralama çizelgesinde ikinci sırada olan seçenek,
a' ise ise en düşük Q değerine sahip seçenektir.

$DQ = 1/(M-1)$, M burada alternatif sayısını ifade eder. Gerçekleştirilen çalışmada en iyi Q değerine sahip alternatif A1 ve ikinci sıradaki alternatif ise A5'tir. Yapılan işlemler aşağıda belirtilmiştir;

$$A5-A1 \geq DQ$$

$$0,28-0,0 \geq 1/(5-1)$$

$0,28 \geq 0,25$ sonucuna göre eşitlik sağlanmaktadır.

Bu durumda C1 koşulu sağlanmaktadır.

C2: Karar Vermede Kabul Edilebilir İstikrar

Hesaplanan uzlaşık çözümün, karar verme prosesinde dengede olduğunun belirlenmesi açısından, seçenek a'in, S ve/veya R değerlerinden en az birinde en iyi seçenek olarak tercih edilmelidir.

S ve/veya R değerlerine göre sıralanan seçeneklere bakıldığı zaman, S 'ye ve R 'ye göre en iyi seçenek A1'dir.

Bu durumda C2 koşulu sağlanmaktadır.

Uzlaşık çözüm kümesi dahilinde Q değerlerine bakılarak sıralama gerçekleştirilir. Bu durumda en uygun seçenek MA9000III/6800'dir. Bunu sırasıyla ENGEL DUO/1000, MA10000III/8400, MA12000III/8400 ve BL1600EKH/C1050 takip eder.

Üçgen bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen VIKOR yöntemindeki işlem adımları yamuk bulanık sayılar kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Yamuk bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen VIKOR yönteminde S , R ve Q değerleri Tablo 25'te gösterilmiştir.

Tablo 25. Alternatif Plastik Enjeksiyon Makinelerinin S , R ve Q ' ya Göre Sıralanması

	1	2	3	4	5
S	A5	A1	A3	A2	A4
R	A1	A2	A5	A3	A4
Q	A1	A5	A2	A3	A4

Üçgen ve yamuk bulanık sayılar kullanılarak çözülen Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemlerinde iki yöntemin birbiriyle ilişkisi doğrusal korelasyon kullanılarak hesaplanmıştır.

Doğrusal korelasyonda, aralarında hangi yönde bir bağ olduğu bilinmek istenen değerlerin kantitatif özellikte olduğu ve hesaplamalarıyla ilişki doğru ve gerçek verilerin bilindiği düşünülür. Buna karşı, karar alma prosesinde nicel karakterli parametrelerin olmadığı durumlarda parametrelerin sayı diliyle analizi yapılamamaktadır. Gerçekleştirilen analizlerin herhangi bir kısıta göre sıralandığı durumlarda parametrelerin sayısal olarak analizi yerine kaçınıcı sırada yer aldığı anlam kazandığında, doğrusal korelasyon katsayısının hesaplanması ile olağandır. Alternatiflerin kaçınıcı sırada bulunduğu Spearman sıra korelasyon katsayısının bulunması için gereklidir. Sıra korelasyon katsayısı hesaplanırken analiz edilen değerler belirtilen kurala göre sıralanmakta, sonrasında ise gerçek değerler yerine söz konusu sıra numaraları arasındaki bağ hesaplanmaktadır. Spearman sıra korelasyon katsayısı Eşitlik (21) kullanılarak bulunur [39].

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D_i^2}{n(n^2-1)} \quad (21)$$

Burada;

r_s : Spearman sıra korelasyon katsayısı değerini,

D_i : İki gözlemin sıraları arasındaki farkı,

n : Örneklem büyüklüğünü ifade etmektedir.

Sıra korelasyon katsayısı değeri -1 ile +1 arasında değer almaktadır. Eğer r_s :+1 bulunur ise Spearman sıra korelasyon katsayısı değeri ile analiz edilen sıralamanın tam pozitif bir ilişki gösterdiği , r_s = -1 olursa sıra korelasyon katsayısı değeri ile, gözlemlerin sıraları arasında aynı yönde olmayan tam negatif bir ilişki olduğu görülür [28].

Plastik enjeksiyon makinesi seçimi problemine (21)'deki Eşitlik uygulanarak Spearman sıra korelasyon katsayısı hesaplanmış ve Tablo 26' da yer verilmiştir.

Tablo 26.Üçgen Bulanık Sayılar Kullanarak Grup Kararı için Spearman Sıra Korelasyon Katsayısının Hesaplanması

TOPSIS Üçgen Bulanık Sayılar ile Grup Kararı Sıralaması		VIKOR Üçgen Bulanık Sayılar ile Grup Kararı Sıralaması	Sıralama Arasındaki Farklar (D_i)	(D_i) ²
A1	1	1	0	0
A2	3	3	0	0
A3	4	4	0	0
A4	5	5	0	0
A5	2	2	0	0
Toplam			0	0
Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı			$r_s=1$	

Tablo 26'dan da görülebileceği gibi, sıra korelasyon katsayısı r_s : 1 olarak bulunmuştur. Bu durum, TOPSIS yöntemi üçgen bulanık sayılar kullanılarak yapılan sıralama ile VIKOR yöntemi üçgen bulanık sayılar kullanılarak yapılan sıralama arasında tam pozitif doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde yamuk bulanık sayılar kullanarak gerçekleştirilen TOPSIS ve VIKOR yöntemleri arasındaki ilişkiye Tablo 27'de gösterilmiştir.

Tablo 27.Yamuk Bulanık Sayılar Kullanarak Grup Kararı için Spearman Sıra Korelasyon Katsayısının Hesaplanması

TOPSIS Yamuk Bulanık Sayılar ile Grup Kararı Sıralaması		VIKOR Yamuk Bulanık Sayılar ile Grup Kararı Sıralaması	Sıralama Arasındaki Farklar (D_i)	(D_i) ²
A1	2	1	1	1
A2	4	3	1	1
A3	3	4	-1	1
A4	5	5	0	0
A5	1	2	-1	1
Toplam			0	4
Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı			$r_s=0.8$	

Tablo 27'den de görülebileceği gibi, sıra korelasyon katsayısı r_s : 0,8 olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonucu, TOPSIS yöntemi yamuk bulanık sayılar kullanılarak yapılan sıralama ile VIKOR yöntemi yamuk bulanık sayılar kullanılarak yapılan sıralama arasında yüksek düzeyde pozitif korelasyon olduğunu göstermektedir.

Üçgen bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinde alternatif sıralaması aynı çıkmıştır. En iyi alternatif MA9000IIS/6800(A1) olarak bulunurken, en kötü alternatif BL1600EKH/C1050(A4) olarak bulunmuştur.

Yamuk bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinde alternatif sıralaması arasında az da olsa farklılar bulunmuştur. Yamuk bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS yönteminde en iyi alternatif ENGEL DUO/1000(A5), en kötü alternatif BL1600EKH/C1050(A4) olarak bulunurken; VIKOR yönteminde en iyi alternatif MA9000IIS/6800(A1), en kötü alternatif BL1600EKH/C1050(A4) olarak bulunmuştur.

Yamuk ve üçgen bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinde oluşan sıralamanın ortalaması alınmıştır, bütünleşik sıralamaya Tablo 28'de yer verilmiştir.

Tablo 28. Alternatiflerin Bütünleşik Sıralaması

	TOPSIS Üçgen Bulanık Sıralama	VIKOR Üçgen Bulanık Sıralama	TOPSIS Yamuk Bulanık Sıralama	VIKOR Yamuk Bulanık Sıralama	Ortalama	Bütünleşik Sıralama
A1	1.	1.	2.	1.	1,25	1.
A2	3.	3.	4.	3.	3,25	3.
A3	4.	4.	3.	4.	3,75	4.
A4	5.	5.	5.	5.	5,00	5.
A5	2.	2.	1.	2.	1,75	2.

Tablo 28 incelendiğinde MA9000IIS/6800(A1)' in kullanılan tüm yöntemler baz alındığında en iyi alternatif olduğu görülmüştür. Sonrasında ENGEL DUO/1000(A5) en iyi ikinci alternatif olarak belirlenmiştir. A1 alternatifi ve A5 alternatifi arasında az bir ortalama farkı vardır. A1 ve A5 alternatifinin ardından bunu sırasıyla; MA10000IIS/8400(A2), MA12000III/8400 (A3) ve BL1600EKH/C1050(A4) takip etmektedir.

VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada; plastik enjeksiyon sektöründe faaliyet gösteren bir işletme için satın alınacak en uygun plastik enjeksiyon makinesine nasıl karar verildiği incelenmiştir. Bu amaçla; üç farklı tonajda Haitian plastik enjeksiyon makinesi, Bole enjeksiyon makinesi ve Engel enjeksiyon makinesi arasından yapılacak seçim; enjeksiyon makinesi seçimi için üzerinde durulması gereken iktisadi unsurlardan hariç makine seçim prosesi üzerinde etkili olan kriterler de gözetilerek, daha önce gerçekleştirilmiş olan bulanık çok kriterli karar verme metodlarından Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Hangi plastik enjeksiyon makinesinin işletme için daha elverişli olduğuna karar verilmiştir [2].

Sonuç olarak, makine seçim süreci için Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR tekniklerinin beraber kullanıldığı bir çalışma olmuştur ve kullanılan iki teknikte de aynı sıralama sonucuna varılmıştır. En iyi alternatif A1 alternatifi, en kötü alternatif A4 alternatifi olarak tespit edilmiştir. Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR tekniklerinin aynı uygulama içinde yer alması, karar verme durumunda olan kişiler için ihtiyaçlar ile en iyi örtüşen plastik enjeksiyon makinesini seçme ve kullanılan Bulanık ÇKVV yöntemlerini karşılaştırmak için olanak sağlamaktadır.

İleride plastik enjeksiyon sektöründe makine tercihi için gerçekleştirilecek çalışmalarda, bu çalışmada tespit edilmiş ve analizi gerçekleştirilmiş kriterlere enerji tüketimini ve çevresel etkiyi baz alan eklemeler yapılabilir. Problemin çözümü için daha önce kullanılmamış olan bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri beraber kullanılabilir. Aynı bir sektörde daha değişik bir ekipman tercihi sorunu için Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemleri tercih edilebilir. Ek olarak çalışmada gerçekleştirilen metodlar, işletmenin diğer bölümlerinde makine ve ekipman seçimi tercihinde de uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Jahan, A., & Edwards, K. L., Bahraminasab, (2016). M. Multi Criteria Decision Analysis For Supporting The Selection of Engineering Materials in Product Design. *Butterworth-Heinemann, USA*, 223s.
- [2] Arslan, B. (2022), *Bulanık Tabanlı Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Makine Ekipman Seçimi*. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- [3] Soner, S., & Önüt, S. (2006). Multi-Criteria Supplier Selection: An ELECTRE-AHP Application. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, (4), 110-120.
- [4] Wang, T-Y., Shaw, C-F., & Chen, Y-L. (2000). Machine Selection in Flexible Manufacturing Cell: A Fuzzy Multiple Attribute Decision-Making Approach. *International Journal of Production Research*, 38(9), 2-2079.
- [5] Yurdakul, M. (2004). AHP as a Strategic Decision Making Tool to Justify Machine Tool Selection. *Journals of Materials Processing Technology*, 146(3), 365-376.
- [6] Ayag, Z., & R. G. Ozdemir. (2006). A Fuzzy AHP Approach to Evaluating Machine Tool Alternatives. *International Journal of Intelligent Manufacturing*, 17 (2), 179-190.
- [7] Guelsuen, Bahadır. (2011). Selection Of AS/RS By Using Fuzzy Topsis Method. *Annals of DAAAM, Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 22(1).
- [8] Taha, Z., & Rostam, S. (2012). A Hybrid Fuzzy AHP-PROMETHEE. Decision Support System for Machine Tool Selection in Flexible Manufacturing Cell. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6), 2137-2149.

- [9] Samvedi, A., Jain, V., Chan, F. T. (2012). An Integrated Approach for Machine Tool Selection Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Grey Relational Analysis. *International Journal of Production Research*, 50(12), 3211-3221.
- [10] Organ, A. (2012). Bulanık DEMATEL Yöntemiyle Makine Seçimini Etkileyen Kriterlerin Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, *Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 157-172.
- [11] Gök Kısa, A., C., Perçin, S. (2017). Application of Integrated Fuzzy DEMATEL-Fuzzy VIKOR Approach to Machine Selection Problem. *Journal of Yasar University*, 12(48), 249-256.
- [12] H. Li, W. Wang, L. Fan et al. (2020). A Novel Hybrid MCDM Model for Machine Tool Selection Using Fuzzy DEMATEL, Entropy Weighting And Later Defuzzification VIKOR. *Applied Soft Computing Journal*, 106207.
- [13] Ulutaş, A. (2017). EDAS Yöntemi Kullanılarak Bir Tekstil Atölyesi İçin Dikiş Makinesi Seçimi. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 169-183.
- [14] Sarıçalı, G. (2018). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden KEMIRA-M ve COPRAS Yöntemlerinin Mermer İşletme Makine Seçim Sürecine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı, Denizli, 92s.
- [15] Kabadayı, N., Dağ, S. (2017). Bulanık DEMATEL ve Bulanık PROMETHEE Yöntemleri ile Kablo Üretiminde Makine Seçimi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, *Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi*, (14),1-22.
- [16] Akın, N.G. (2019). Makine Seçimi Probleminde ENTROPİ-ROV ve CRITIC-ROV Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Dumlupınar Üniversitesi, *Sosyal Bilimler Dergisi*, (62), 20-39.
- [17] Dilip Kumar Sen Saurav Datta S.S. Mahapatra. (2016). Application of TODIM (Tomada De Decisión Inerativa Multicriterio) for Industrial Robot Selection. *Benchmarking, International Journal*,23(7),1818 – 1833.
- [18] Indap, S. (2018). Application Of The Analytic Hierarchy Process In The Selection of Storage Rack Systems For E-Commerce Clothing Industry. *Journal Of Management, Marketing and Logistics*, 5(4),255-266.
- [19] Prusa, P., Jovcic, S., Nemec. C. & Mrazek. P. (2018). Forklift Truck Selection Using TOPSIS Method. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 8(3), 390 – 398.
- [20] Kumru, M., & Kumru, P. Y. A. (2015). Fuzzy ANP Model for the Selection of 3D Coordinate-Measuring Machine. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(5),999-1010.
- [21] Koca, G., & Eğilmez, Ö. (2020). Makine Seçimi Probleminin Entropi Ağırlıklı TOPSIS Yöntemi ile Değerlendirilmesi: Bir Doğal Taş İşletmesi Örneği. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilgisi Dergisi*, 7(2), 714-729.
- [22] Faydalı, R., & Erkan, E. F. (2020). Makine Seçim Probleminin Bulanık VIKOR Yöntemiyle İncelenmesi. *Zeki Sistemler Teori ve Uygulamaları Dergisi*,3(1), 7-12.
- [23] Uzun, S., & Kazan, H. (2016). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden AHP TOPSIS ve PROMETHEE Karşılaştırılması: Gemi İnşada Ana Makine Seçimi Uygulaması. *Journal of Transportation and Logistics*, 1(1), 99-113.
- [24] Uzun, S., & Yıldırım, B. F. (2016). Equipment Selection in Ship Building Process: TOPSIS, MOORA, VIKOR Application. *Eurasian Academy of Sciences Eurasian Business & Economics Journal*, 2, 113-124.
- [25] Ertuğrul, İ. (2007). Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ve Bir Tekstil İşletmesinde Makine Seçim Problemine Uygulanması. Hacettepe Üniversitesi, *İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*,25(1), 171-192.
- [26] Akpınar, M. (2022). Machine Selection Application in a Hard Chrome Plating Industry Using Fuzzy SWARA and Fuzzy ARAS Methods, *Manisa Celal Bayar University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 29(1),107-119
- [27] Karakış, E. (2021). Machine Selection for a Textile Company with CRITIC and MAUT Methods. *European Journal of Science and Technology*, (27), 842-848.
- [28] Perçin, S. (2012). Bulanık AHS ve TOPSIS Yaklaşımının Makine Teçhizat Seçimine Uygulanması, *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 169-184
- [29] Yılmaz, B., & Dağdeviren, M. (2010). Ekipman Seçimi Probleminde PROMETHEE ve Bulanık PROMETHEE Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4), 811-826
- [30] Çetinkaya, Ç., Kabak, M., & Özceylan, E. (2017). 3D Printer Selection by Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and PROMETHEE, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, (10)4, 371-380
- [31] Palanisamy, M., Pugalendhi, A., & Ranganathan, R. (2020). Selection of Suitable Additive Manufacturing Machine And Materials Through Best–Worst Method (BWM), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107:2345–2362

- [32] Jahanshahloo, G.R., Hosseinzadeh, F., & Izadikhah, M. (2006). Extension of the TOPSIS Method for Decision Making Problems with Fuzzy Data. *Applied Mathematics and Computation*, 181,1544-1551.
- [33] Chen, Tung., Ching, Torng Lin., & Sue, Fn Hwang. (2006). A Fuzzy Spproach for Supplier Evaluation and Selection In Supply Chain Management. *International Journal of Production Economics*, (102) 289-301.
- [34] Negi, D.S. (1989). *Fuzzy Analysis and Optimization*, Ph.D. Thesis, Kansas State University.
- [35] Chen, T. (2001). A Fuzzy Approach To Select The Location of The Distribution Center. *Fuzzy Sets and Systems*, (118), 65-73.
- [36] Tiryaki, F., Ahlatçıolu, M. (2005). Fuzzy Stock Selection Using a New Fuzzy Ranking and Weighting Algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 170,144- 157.
- [37] Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an Application to Water Resources Planning. *Expert Systems with Applications*, (38), 12983–12990.
- [38] Opricovic, S. and Tzeng, G.H. (2007). Extended VIKOR Method In Comprasion with Outranking Methods. *European Journal of Operational Research*, (178), 514-529.
- [39] Özer, S. (2010). Uygulamalı İstatistik. Ezgi Kitapevi, Bursa.

Araştırma Makalesi - Research Article

Solution of Workforce Planning Problem of a Holding Enterprises with the Markov Chains Method

Bir Holding İşletmesinin İşgücü Planlama Probleminin Markov Zincirleri Metodu ile Çözümü

Medine Nur Türkoğlu Elitaş^{1*}, Muhammed Kır²

Geliş / Received: 30/01/2022

Revize / Revised: 13/06/2022

Kabul / Accepted: 15/08/2022

ABSTRACT

Stochastic processes are processes that involve randomness. Any process can be random for many reasons. A true physical process is stochastic as events are observed. Randomness may occur due to lack of information about the process. The models established for the process may not be able to represent the process. Changes in processes depending on human behavior may cause randomness. If there are parts of the processes that cannot be known, predicted and modeled, these processes are random. The random processes in which the previous state affects the next state are examined as Markov chains.

Markov chains can be applied to different areas such as education, health, accounting and manufacturing. In this study, Human Resources Planning study belonging to a holding has been discussed. Enterprises operating in different sectors of the holding can meet their personnel needs from other companies belonging to the holding within the scope of the holding's human resources policies. This situation not only enables employees to have different experiences by finding the opportunity to work in different businesses than their current ones, but also increases employee satisfaction. In the study, based on the previous years' personnel transfers between companies, the number of personnel who will transfer between enterprises in the coming years has been determined. This study supported the determination of workforce planning and human resources strategies that the holding companies will need in the coming years.

Keywords- *Stochastic Processes, Markov Chains, Workforce Planning, Human Resources*

ÖZ

Stokastik süreçler, rastgeleliği içeren süreçlerdir. Herhangi bir süreç birçok nedenden dolayı rastgele olabilir. Gerçek bir fiziksel süreç, olaylar gözlemlendiğinden stokastiktir. Süreç hakkında bilgi eksikliği nedeniyle rastgelelik oluşabilir. Süreç için kurulan modeller süreci temsil etmeyebilir. İnsan davranışına bağlı olarak süreçlerde meydana gelen değişiklikler rastgeleliğe neden olabilir. Bilinmeyen, tahmin edilemeyen ve modellenemeyen süreçlerin bölümleri varsa, bu süreçler rastgeledir. Bir önceki durumun bir sonraki durumu etkilediği rastgele süreçler Markov zincirleri olarak incelenir.

Markov zincirleri eğitim, sağlık, muhasebe ve imalat gibi farklı alanlara uygulanabilir. Bu çalışmada bir holdinge ait İnsan Kaynakları Planlama çalışması ele alınmıştır. Holdingin farklı sektörlerinde faaliyet gösteren işletmeler,

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: medine.elitas@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9889-4051>)

Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu Bilecik

²İletişim: muhammedkir@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-3143-4322>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Sakarya

personel ihtiyaçlarını holdingin insan kaynakları politikaları kapsamında holdinge ait diğer şirketlerden karşılayabilmektedir. Bu durum, çalışanların mevcut işyerlerinden farklı işletmelerde çalışma fırsatı bularak farklı deneyimler yaşamalarını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çalışan memnuniyetini de artırır. Çalışmada şirketler arası geçiş yapan personel sayısı baz alınarak önümüzdeki yıllar için işletmeler arası geçiş yapacak personel sayısı belirlenmiştir. Bu çalışma, holding şirketlerinin önümüzdeki yıllarda ihtiyaç duyacağı işgücü planlaması ve insan kaynakları stratejilerinin belirlenmesine destek olmuştur.

Anahtar Kelimeler- Stokastik Süreçler, Markov Zincirleri, İş Gücü Planlaması, İnsan Kaynakları

I. INTRODUCTION

In today's business world, all resources such as capital, labor, raw materials and information are on the move due to globalization. As competition is intense in every field, all disciplines are working to manage these resources in an optimum way. Businesses have competitive power to the extent they manage these on-the-go resources efficiently. For this reason, businesses that will exist in the future will be the ones that have managed all resources in the most optimum way. This study covers the most efficient use of human resources, which is the most important resource of enterprises, and the creation of human resources strategies that will carry the businesses of a holding to the future.

Employee satisfaction, efficiency and productivity are increased by evaluating the employees of enterprises belonging to a holding in open positions in different enterprises within the holding. In order for the holding to plan the workforce that it will need in the future as required by its growth strategies, it wants to determine the number of personnel that will switch between businesses in the future. The number of personnel who will transfer to each business for the next periods was determined by using the Markov chains method over the number of transition numbers pertaining to the current situation and the number of personnel that the enterprises will need for the next years was determined.

If the probability value for the states of the random variable processes depends on a learned condition, this model has Markov property. Markov is a stochastic approach, and its future behavior relates only to the current situation; it is not related to other situations. A batch stochastic process: It is called the Markov chain if it has no connection with previous states. [1]. Markov analysis is a probabilistic method used to evaluate stochastic processes. [2].

Markov processes are essentially a process where the possibility of transition between states depends only on the situation that is finished, regardless of other states. Therefore, these processes are different from other approaches that try to predict the future based on probabilities [3].

Markov Chains is a method commonly used in dynamic and stochastic systems. In Markov chains, besides determining the situation at a certain time, there is also the ability to predict the long-term situation of the system. For this reason, Markov chains are a prediction method like simulation models [4].

Markov Processes are applied in many areas. It is possible to find applications of Markov processes in all areas in general. Markov processes have found the opportunity to be applied in fields such as biology, astronomy, physics, chemistry, as well as business and economics. Markov processes are frequently used in revealing the status of a material in the future, in the probability of a machine failure, in determining which amount of receivables is impossible to collect in the receivables problem, and in determining what amount of receivables is possible to collect in different terms and in predicting the future situation of the workforce in an enterprise [4].

Bhowmik and Malathi (2019) developed a prediction model for spectrum detection in CR. This article proposed a hybrid prediction model based on the actor critic neural network and the latent Markov model called the krill swarm. A hybrid prediction model has been developed to detect the energy efficiency spectrum in CR. The chosen approach is useful for use in a variety of areas including wireless medical networks and authentication applications [5].

Mehmood et al. (2017) aimed to increase the knowledge level of the transformation potential of big data in city-based transportation models. This model is designed to show how sharing at load of transportation in a smart city can increase efficiency in meeting the demand for city services. The continuous time Markov chain defined by the Chapman-Kolmogorov equation is used. A model with various scenarios was developed to explore a theoretical framework focused on matching city transfer services with transfer demands using big data [6].

Tee et al. (2018) stated in their study that the condition of average living and highway infrastructures is very important for developing appropriate inspection and maintenance strategies to renew existing aging highway infrastructures. The study aimed to discuss them. The study proposes a Markov Chain based distortion modeling using the linear transition probability (LTP) matrix method and the average life expectancy (MLE) algorithm. The proposed work has been evaluated and implemented using status improvements between the two successful audits. [7].

Nwadinobi et al. (2019) aimed to propose a software used to estimate required equipment performance parameters used for maintenance planning. The article is developed from steady state probability models derived using algebraic substitution and calculation of total operating time, malfunctions, total downtime, mean time between failures, and mean repair time of equipment in preventive and corrective maintenance situations [8].

Wei et al. (2017) aim to solve the problem of information overload and reduce research costs. The study proposes a model of social e-commerce online reputation building and a model introduced by the community government. System dynamics trend simulation was conducted to capture the relationship between sellers, buyers, and social e-commerce [9].

Li et al. (2019) aimed to suggest whether the retail service supply chain is a "quality bridge" in the dynamic development process and to discuss the system role, steady state characteristics and the dynamic evolution mechanism of system quality in the dynamic evolution process. This article proposes the RSSC's power distribution system structure with a Markov chain model (MCM) covering the RSSC service quality, under the steady state quality constraint. The study tests the objective existence of the steady state distribution of service quality and the current characteristics of the quality bridge, modeling China's retail businesses [10].

Öz and Erpolat (2010) made an application on the multivariate Markov Chain model in their studies. In this study, the multivariate Markov chain model based on Markov chains is explained theoretically. As a practice, monthly differences in dollar rate prices and monthly changes in IMKB National 100 Index values are determined as two categorical series, and how these series affect each other is determined by the multivariate Markov chain model [11].

Alp and Öz (2009) analyzed their portable computer preferences using the Markov Chain method in their study. A questionnaire was conducted with 1068 people to analyze the preferences of portable computer brands. The people in the questionnaire were asked about the brands of portable computers they currently use and, if any, previously used. For analysis, a study was carried out to compute the transition probability matrix and equilibrium vectors, known as the basis of Markov Chains. Markov transition probability matrices are presented by considering the number of passes to portable computer brands [12].

Özdağoğlu et al. (2012) made an application that will contribute to existing methods. In this sense, the study aimed to deal with the price movements of gold and to make gains on the structure of price movements with the help of the Markov chain. The study period is between 2005-2009 and the study period was taken as 1 day, the Markov chain was calculated from the relative frequency values by coding the price ranges. The findings point to meaningful results in terms of the probability of transitions between price ranges [13].

Köse et al. (2015) examined a school that is responsible for training staff in a public institution and providing four-year education. In the study, future studies were examined to prevent the public institution from experiencing a shortage of trained personnel. Markov Analysis was used as a method in the study. The contribution of the study is to offer a solution to a real problem [3].

Kıral (2018) evaluated 750 people living in Adana according to the results of the survey conducted on mobile operator preferences for the last 7 years. In the study, mobile operator preferences of people living in Adana and operator preference probabilities in the long term were estimated. Markov chains were used to calculate the values [2].

Büyüktatlı et al. (2013) aimed to demonstrate the use of the Markov process as a forward-looking estimation tool. In the study, the initial payments of TAEK's investment program between 1998-2009 and the realization percentages of the expenses of the institution were used. With the Markov analysis, the percentage of realization of the 2011 investment program was estimated and the results were interpreted. [14].

In the study, open positions were evaluated with real data of a food business in Sakarya and growth strategies were examined. According to these strategies, it is aimed to increase employee satisfaction and contribute to the creation of human resources strategies. Planning studies have been carried out in different areas in the literature. In our study, it is aimed to make improvements for the personnel by examining a holding company. It is thought that the study is an original study that will contribute to the literature in terms of increasing personnel and, accordingly, customer satisfaction and optimizing service quality.

The aim of the study is to manage resources optimally and to determine the number of personnel required for future years. Thus, thanks to the study, it was ensured that the necessary strategies for the business were organized.

II. MATERIALS AND METHODS

Markov process is a stochastic process that states that all the information that can be known about the future is at current prices. Accordingly, when a stochastic process in the form of $X = \{X(t), t \geq 0\}$ defined in continuous time is the Markov process, it is expressed as follows in Eq. (1).

$$\text{Prob}(X(t) \leq x \setminus X(u), 0 \leq u \leq s) = \text{Prob}(X(t) \leq x \setminus X(s)) \quad (1)$$

In this definition, with $s < t$, $X(t)$ represents the random variable that occurs for each time, and X shows the actual values.

For a stochastic process expressed as the Markov Chain $\{S_t, t = 0, 1, \dots\}$, it is expressed as a finite or countable number of integers (i). The probability of occurrence of any S_{t+1} future value is denoted by j . The Markov Chain is defined as follows, S_t , which represents the current situation, only depending on the present and independent from its past values in Eq. (2).

$$P\{S_{t+1} = j \mid S_t = i, S_{t-1} = i_{t-1}, S_1 = i_1, S_0 = i_0\} = P\{S_{t+1} = j \mid S_t = i\} = p_{ij} \quad (2)$$

p_{ij} refers to the state change that occurs in the transition from the previous state i state to the next state j , in the "transition possibility" [15].

Transition Probability Matrix:

The transition probabilities of a Markov Chain with state space $S = \{0, 1, 2, \dots, s\}$ are shown with a $s \times s$ dimensional transition matrix as in Figure 1 [16].

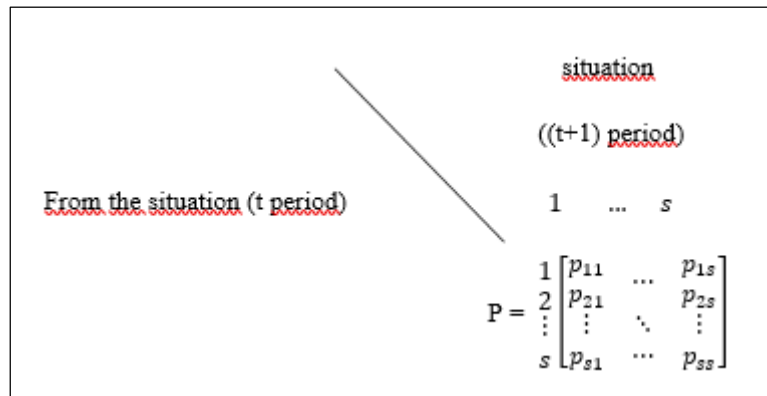


Figure 1. Transition probability matrix

A system in state i at time t will necessarily be in one of the state s at time $t + 1$. Accordingly, the rows of the transition matrix should satisfy the following conditions in Eq. (3) [17].

$$0 \leq p_{ij} \leq 1 \text{ (for all } i \text{ and } j \text{ values)} \quad \sum_{j=1}^s p_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, s. \quad (3)$$

The properties of Markov chains can be summarized as follows:

- Markov feature,
- Discrete and finite state space; $S = \{0, 1, 2, \dots, s\}$
- Transition possibilities that do not change with time (p_{ij})

Some of the states of a Markov chain are called engulfing and others are called engulfing chains. In engulfing chains, a temporary state is passed from a state of absorbing and the process ends.

In order to make the necessary calculations, the transition matrix must be rescheduled. If it is assumed that there are m swallowing states and $s-m$ transient states, the transition matrices can be written in Figure 2.

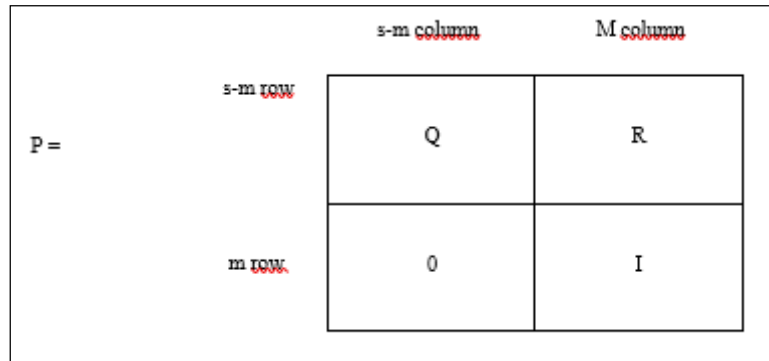


Figure 2. The transition matrix

Here Q is a $(s-m) \times (s-m)$ dimensional matrix showing the transition between transient states; R is a $(s-m) \times m$ dimensional matrix showing the transition from transient states to engulfing states; 0 is the $m \times (s-m)$ dimensional zero matrix showing that one cannot pass from an absorbing state to other states and all elements are zero, and I is the $m \times m$ -dimensional unit matrix, which shows that when a state is switched to an absorbing state, it will remain in that state. The next step is to find the base matrix (T) by inverting the matrix $(I-Q)$ in Eq. (4).

$$T=(I-Q)^{-1} \quad (4)$$

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

A Holding operating in various sectors has 7 different businesses. Some of these businesses operate in the food sector, some in the personal care and hygiene products sectors, and some in the retail and merchandising sectors. In order to increase employee satisfaction and to use the potential of internal dynamics efficiently, the Holding has a Human Resources system that enables employees to evaluate the opportunities in different businesses through intercompany internal announcements. With this system, employees can view open positions in other companies belonging to the holding through a portal and they can apply for positions they think are suitable for them. After the Human Resources Department evaluates the employee and decides on the suitability for the position, the employee leaves his current business and starts his new position in his new business.

The Holding Human Resources General Directorate wants to carry out a study in order to take the system one step further, increasing employee satisfaction, productivity gains by rotation and the most efficient use of the human resources of the Holding. This study covers the determination of personnel movements between enterprises, determination of personnel transfer rates between enterprises based on the determined rotations, and determination of the future Human Resources needs of the Holding. With this study, it is planned to create a Human Resources pool in accordance with the values and vision of the Holding, which will allow budget studies for the number of personnel that businesses will need in the future. The number of personnel transfers between enterprises is given in Table 1.

Table 1. Number of Personnel Who Switched Between Businesses Last Year

	Business 1	Business 2	Business 3	Business 4	Business 5	Business 6	Business 7
Business 1	100	25	10	5	15	30	15
Business 2	30	60	5	10	20	15	10
Business 3	5	5	40	10	5	5	5
Business 4	15	10	5	45	10	5	10
Business 5	20	15	5	10	50	10	5
Business 6	25	15	10	5	15	70	10
Business 7	5	10	5	15	10	20	65

When the Holding headquarters General Directorate of Human Resources initiated this work, the personnel numbers of 7 enterprises belonging to the holding are given in Table 2.

Table 2. Existing Staff Numbers of Businesses

Business 1	Business 2	Business 3	Business 4	Business 5	Business 6	Business 7
300	225	125	150	170	240	220

The Holding wants to determine the number of personnel that the enterprises at the end of the 3rd year and the 5th year will need by doing a study. For this reason, it wants to determine the number of personnel who will transfer to each business in the 3rd year and the 5th year. The Holding has determined the number of personnel it will need for each enterprise in line with its growth targets at the end of 3 years and at the end of 5 years, and it is given in Table 3. The Holding wants to create tables regarding the number of personnel it will need after personnel transfers between enterprises and to make Human Resources planning in this direction.

Table 3. Number of Personnel That Will Be Needed After 3 Years and 5 Years For Businesses

	Business 1	Business 2	Business 3	Business 4	Business 5	Business 6	Business 7
The number of personnel that will be needed after 3 years	340	250	140	160	220	275	235
The number of personnel that will be needed after 5 years	350	275	150	175	245	300	250

We find the transition probability matrix by using the density method with the number of personnel transferring between enterprises in Eq. (5) below.

$$P_{ij} = \frac{F_{ij}}{f_i} \quad (5)$$

F_{ij} : Number of personnel transferred from entity i to entity j

f_i : Total number of staff in business i

The transition probabilities matrix between enterprises is specified below as the P matrix in Table 4.

Table 4. The Transition Probabilities

0.5	0.125	0.05	0.025	0.075	0.15	0.075
0.2	0.4	0.033	0.067	0.133	0.1	0.067
0.067	0.067	0.533	0.133	0.067	0.066	0.067
0.15	0.1	0.05	0.45	0.1	0.05	0.1
0.174	0.13	0.043	0.087	0.435	0.088	0.043
0.167	0.1	0.067	0.033	0.1	0.466	0.067
0.038	0.077	0.038	0.115	0.077	0.155	0.5

In order to find the number of personnel who will transfer between companies at the end of the 3rd year, we need to find the probability matrix P^3 Transition probabilities. P^3 matrix is found as follows in Table 5.

Table 5. P³ Transition Probabilities

0.259	0.151	0.084	0.082	0.130	0.181	0.113
0.234	0.174	0.075	0.098	0.148	0.162	0.110
0.168	0.126	0.196	0.144	0.123	0.132	0.114
0.210	0.143	0.082	0.161	0.138	0.139	0.127
0.228	0.155	0.079	0.106	0.177	0.153	0.101
0.221	0.144	0.093	0.087	0.137	0.210	0.110
0.163	0.132	0.077	0.127	0.131	0.176	0.193

At the end of the 3rd year, a study will be made to determine the number of personnel in the enterprises and to determine the number of personnel that each enterprise will need.

From the formula $m = n.Pn$, the number of personnel that will occur as a result of the transitions in each enterprise at the end of the 3rd year are as follows.

n : It is the vector of the number of personnel available per period of enterprises.

m : It is the vector of the number of personnel available at the end of the period for the enterprises.

$$n = (300.225 \quad 125 \quad 150 \quad 170 \quad 240 \quad 220)$$

$$m = (310.423 \quad 211.650 \quad 131.406 \quad 155.518 \quad 199.989 \quad 243.104 \quad 177.866)$$

At the end of the 3rd year, the number of personnel belonging to each enterprise is found as in Table 6.

Table 6. Number of personnel at the end of the 3rd year of the enterprises

Enterprise 1	Enterprise 2	Enterprise 3	Enterprise 4	Enterprise 5	Enterprise 6	Enterprise 7
310	212	131	156	200	243	178

In order to find the number of personnel who will transfer between companies at the end of the 5th year, we need to find the probability matrix P⁵ Transition probabilities. P⁵ matrix is found as follows in Table 7.

Table 7. P⁵ Transition Probabilities

0.2254	0.1495	0.0909	0.1017	0.1393	0.1736	0.1197
0.2241	0.1518	0.0881	0.1049	0.1424	0.1694	0.119
0.2046	0.1425	0.1168	0.1222	0.1367	0.1575	0.1216
0.2174	0.1478	0.0896	0.1167	0.1406	0.1636	0.124
0.2235	0.1504	0.089	0.1066	0.1453	0.1667	0.1168
0.2209	0.1484	0.0936	0.1037	0.1406	0.1756	0.1189
0.2059	0.1445	0.0886	0.1145	0.1392	0.1704	0.1353

From the formula $m = n.P^n$, the number of personnel that will occur as a result of the transitions in each enterprise at the end of the 5th year is as follows.

n: It is the vector of the number of personnel available per period of enterprises.

m: The vector of the number of personnel available at the end of the period belonging to the enterprises.

$$n = (300 \ 225 \ 125 \ 150 \ 170 \ 240 \ 220)$$

$$m = (312.5429 \ 211.9671 \ 132.2484 \ 155.0882 \ 201.0593 \ 242.3867 \ 174.6582)$$

Since the number of personnel will be integers, the vector m is considered as

$$m = (313 \ 212 \ 132 \ 155 \ 201 \ 242 \ 175)$$

At the end of the 5th year, the number of personnel belonging to each enterprise is found as in Table 8.

Table 8. Personnel numbers of businesses at the end of the 5th year

Enterprise 1	Enterprise 2	Enterprise 3	Enterprise 4	Enterprise 5	Enterprise 6	Enterprise 7
313	212	132	155	201	242	175

IV. CONCLUSIONS

In this study, the changing number of personnel of enterprises due to personnel rotation between 7 different enterprises operating in different sectors of a holding was examined. The number of new personnel to be formed in each enterprise in the next years due to the rotation was calculated with the method of Markov chains. In addition, in line with the growth strategies of the enterprise, the number of new personnel that will be needed after the rotations have been determined since the number of personnel that will be needed for each enterprise after 3 and 5 years has been determined.

The number of new personnel that the holding will need for each enterprise after 3 and 5 years is shown in Table 9.

Table 9. Number of new personnel required at the end of the 3rd and 5th year of the enterprises

	Enterprise 1	Enterprise 2	Enterprise 3	Enterprise 4	Enterprise 5	Enterprise 6	Enterprise 7
The number of personnel that will be needed after 3 years	30	38	9	4	20	32	57
The number of personnel that will be needed after 5 years	37	63	18	20	44	58	75

In line with the studies carried out, the Holding's Human Resources Department will be able to make budget studies in line with the workforce needed by each enterprise, and plan for the timely employment of the required personnel.

The article aims to maximize the balance and efficiency between employers and employees. As a result of the implementation, the necessary budget planning is able to be made more accurately and labor productivity was increased. In this respect, the study provides positive returns to businesses and has been a useful application for the literature. In the next studies, optimum efficiency can be achieved in larger enterprises by making different stochastic process analyzes in the longer term:

- Businesses with more staff can be identified
- By examining the strategies of these businesses, deficiencies can be determined with diagrams suitable for the business.

- By investigating the suitability of the identified key points with Markov chains, improvements involving personnel and business lines can be aimed.
- Future planning can be done on a larger scale by aiming to ensure long-term efficiency of potential studies.
- In this way, the deficiencies of the companies that contribute to the field on a larger scale in terms of planning are determined and improvements are made in this direction
- Production and service optimization is also maximized by providing more efficiency on personnel.
- The output will be increased for both the company, the consumer and the employee.

REFERENCES

- [1] Akyurt, İ. Z. (2011). Ülke Derecelendirme Sisteminin Markov Zinciri ile Analizi. *İstanbul Management Journal*, 69, 45-60.
- [2] Kırıl, E. (2018). Markov Analizi ile Cep Telefonu Operatör Tercihlerinin Belirlenmesi: Adana İli Üzerine Bir Uygulama. *Cukurova University Journal of Social Sciences Institute*, 1, 35-47.
- [3] Köse, E., Genç, T., & Kabak, M. (2015). Markov Analizi ile İnsan Gücü Planlaması. *Cukurova University Journal of Economic and Administrative Sciences*, 16, 1-12.
- [4] Yavuz, S., & Karabulut, T. (2016). Markov Analizi ile Üniversite Öğrencilerinin Cep Telefonu Marka Tercihlerinin Belirlenmesi, *Dicle University Journal of Social Sciences Institute*, 17, 221-235.
- [5] Bhowmik, M., & Malathi, P. (2022). A Hybrid Model For Energy Efficient Spectrum Sensing in Cognitive Radio. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 15, 165-183.
- [6] Mehmood, R., Meriton, R., Graham, G., Hennelly, P., & Kumar, M. (2017). Exploring The Influence of Big Data on City Transport Operations: A Markovian Approach. *International Journal of Operations & Production Management*, 37, 75-104.
- [7] Tee, K.F., Ekpiwhre, E., & Yi, Z. (2018). Degradation Modelling and Life Expectancy Using Markov Chain Model for Carriageway. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 35, 1268-1288.
- [8] Nwadinobi, C.P., Nwankwojike, B.N., & Abam, F.I. (2019). Improved Markov Stable State Simulation for Maintenance Planning. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25, 199-212.
- [9] Wei, C., Yu, Z.J., & Chen, X.N. (2017). Research on Social E-Commerce Reputation Formation and State-Introduced Model. *Kybernetes*, 46, 1021-1038.
- [10] Li, J., Sun, M., Ren, L., & Li, B. (2019). Dynamic Evolution And Coordination Mechanism of RSSC Under The Steady-State Quality Constraints : Based on system dynamics and Markov chain model. *Kybernetes*, 49, 3019-3045.
- [11] Öz, E., & Erpolat, S. (2010). Çok Değişkenli Markov Zinciri Modeli ve Bir Uygulama. *Marmara University Journal of Economic and Administrative Sciences*, 2, 577-590.
- [12] Alp, S., & Öz, E. (2009). Markov Zinciri Yöntemi ile Taşınabilir Bilgisayar Tercihlerinin Analizi. *Academic Reviews*, 4, 37-55.
- [13] Özdağoğlu, A., Özdağoğlu, G. & Kurt Gümüş, G. (2012). Altın Fiyatındaki Dağılımların Markov Zinciri ile Analizi: Uzun Erimli Olasılıklar. *Erciyes University Journal of Economic and Administrative Sciences*, 40, 119-142.
- [14] Büyüktatlı, F., İşbilir, S. & İpekçi Çetin, E. (2013). Markov Analizi ile Yıllık Ödeneklere Bağlı Bir Tahmin Uygulaması, *International Alanya Faculty of Business Journal*, 5, 1-8.
- [15] Güzgör, G. (2012). Stokastik Süreçlerin Döviz Kuru Tahmininde Kullanımı: Gelişmiş ve Gelişmekte Olan Piyasalar İçin Performans Analizi. PhD Thesis, İstanbul University, Social Sciences Institute, İstanbul.
- [16] Taha, H. A. (2002). Yöneylem Araştırması 6th ed. Ş. Alp Baray-Şakir Esnaf, Literatür Pub. İstanbul.
- [17] Çınlar, E. (1975). Introduction to Stochastic Processes, 1th ed. New Jersey: Prentice-Hall.

Araştırma Makalesi – Research Article

Hastanelerde Yangınla Mücadelede Acil Durum Yönetimine İlişkin Kritik Başarı Faktörlerinin Belirlenmesi

Determination of Critical Success Factors for Emergency Management in Fire Fighting in Hospitals

Samet Tosun^{1*} İbrahim Yılmaz²

Geliş / Received: 01/02/2022

Revize / Revised: 24/07/2022

Kabul / Accepted: 25/07/2022

ÖZ

Günümüzde sağlıkta uygulanan politikalar ve insani gerekler sonucu olarak normal hastanelerin yanı sıra birçok entegre sağlık kampüsleri ve şehir hastaneleri inşa edilmeye başlanmıştır. Gerek nicelik, gerekse nitelik bakımından büyüyen bu sağlık kompleksleri beraberinde yangın riskini ve çıkabilecek yangınla mücadelede acil durum yönetimi üzerine mevcut düzenleme ve planlamaların yeterli olup olmadığı sorusunu da gündeme getirmiştir. Sağlık tesisleri ve hastanelerin tasarımları, bünyesinde yer alan hassas ve karışık üniteler ve hareket kabiliyeti kısıtlı olan kullanıcıların profili sebebiyle, mümkün oldukça en güvenli ve en verimli biçimde yapılmalıdır. Yapılan araştırmada hastanelerde yangın özelinde kapsamlı bir acil durum yönetimi çalışmasına rastlanmamıştır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla hastanelerin ve sağlık kurumlarının yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörlerinin literatür araştırması yapılarak tespit edilmesi ve AHP yöntemiyle ağırlıklandırılması amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda hastaneler için ayrı, özel bir yönetmelik gerektiği farkındalığının sağlanması, hastanelerde yangından korunmak için yapılacak bütçe çalışmalarında kritik başarı faktörlerinin (KBF) ağırlıklarına göre planlama yapılması tavsiye edilmiştir. AHP yöntemi sonucunda elde edilen KBF ağırlıkları incelendiğinde en önemli iki faktörün yönetmeliklerdeki eksiklikler ve mimari tasarım olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Hastane, Yangın, Acil Durum, Kritik Başarı Faktörleri

ABSTRACT

Today, as a result of the policies applied in health and humanitarian needs, many integrated health campuses and city hospitals have started to be built in addition to normal hospitals. These health complexes, which have grown and developed both in terms of quantity and quality, have also brought up the question of whether the current regulations and plans on emergency management in the fight against fire are sufficient. The designs of health facilities and hospitals should be done in the safest and most efficient way possible, due to the sensitive and complex units and the profile of users with limited mobility. In the study, no comprehensive emergency management study was found in hospitals specific to fire. In order to fill this gap in the literature, it is aimed to determine the critical success factors related to emergency management in firefighting of hospitals and health institutions by conducting literature research and to weight them with the AHP method. As a result of the study, it

^{1*}Sorumlu Yazar İletişim: samet.tosun@gop.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5454-3057>)

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²İletişim: iyilmaz@ybu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5959-7353>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara, Türkiye

was recommended to raise awareness of the need for a separate and special regulation for hospitals, and to plan according to the weights of critical success factors (CSF) in budget studies to be carried out for fire protection in hospitals. When the CSF weights obtained as a result of the AHP method were examined, it was seen that the two most important factors were the deficiencies in the regulations and the architectural design.

Keywords- Hospital, Fire, Emergency, Critical Success Factors

I. GİRİŞ

Ülkemizde “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik” ve standartlarda hastaneleri içerisinde bulunduran özel bir sınıflandırma yer almamaktadır. Hastane binaları; okul, otel, konutlar ve iş merkezleri ile aynı tehlike sınıfında yer almasına rağmen aynı yönetmeliğe tabi olduğu, kullanıcı profiline hareket edebilme kabiliyetleri itibariyle farklılık göstermesi ve binadaki ölümcül dumanlar yayabilecek ve yanıcı olan kimyasallar içermesi sebebiyle diğer yapılardan ayrı tutulması gerekmektedir. Örnek verecek olursak, hareketi kısıtlı hastaların tahliye yardımı ihtiyacı olurken, yangın esnasında operasyonda olan hastaların işlemlerinin kesintisiz devam etmesi hayati öneme sahiptir. Bir yapıda yangın esnasındaki temel amaç insanların yangın mahallinden hızla tahliye edilebilmesidir. Bu işlemden uygulanan temel metot sesli ve ışıklı uyarı cihazları ile tehlikelerin insanlara bildirilmesi ve kaçış rotasıyla insanların bölgeden uzaklaştırılmasıdır. Yangın sonucunda kayıpların çoğunluğunun, tasarımın dikey ve yatay tahliye için elverişsiz olması, tahliye için alınan önlemlerin yetersizliği, duman ve yangın yayılımının tasarım esnasında göz ardı edilmesi ve personelin yeterince bilinçlendirilip, eğitilmemesi gibi sebeplerden kaynaklandığı görülmektedir [1].

Hastane ve sağlık komplekslerinde yapılan risk değerlendirmeleri, hastane içinde yer alan bütün sağlık birimlerinin risk seviyesinin yaklaşık aynı düzeyde olduğunu göstermiştir. Hastanelerin yüksek derece tehlike sınıfında yer almalarının sebebi, içlerinde barındırdıkları yüksek risk içeren bölümlerden dolayı sürekli yangın riskine açık durumda olmalarıdır. Elektrik tesisatları, mutfaklar, kimyasal birimler, gaz depoları gibi potansiyel tehlikeler aynı ortamda yer almaktadır [2].

Yapılan araştırmada hastanelerde yangın özelinde kapsamlı bir acil durum yönetimi çalışmasına rastlanmamıştır. Bu sebeple çalışmada hastanelerin ve sağlık kurumlarının yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörlerinin literatür araştırması yapılarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada afet yönetiminin öneminden bahsedilmiş, hastanelerde afet ve acil durum yönetimi konusuna değinilmiştir. Ayrıca ülkemizde ve dünyada ilgili yönetmelik ve standartlara göz atılıp kıyaslama yapılmıştır. Daha sonraki süreçte konu ile ilgili literatür araştırması yapılmış kritik başarı faktörleri belirlenmiştir. Kritik başarı faktörleri, yönetim süreçlerinde başarılı olunabilmesi için vazgeçilmez faktörler olarak tanımlanmıştır. Kritik başarı faktörlerinin ağırlıklandırılmasında kullanılmış olan materyal anketten elde edilen verilerdir. Ankete katılan uzmanlar, hastanelerin iş sağlığı ve güvenliği biriminde çalışan iş sağlığı ve güvenliği uzmanlarıdır. Ankette elde edilmiş olan veriler kullanılarak AHP yöntemi ile hastanelerde yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörleri önceliklendirilmiştir ve sıralama oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda hastaneler için ayrı, özel bir yönetmelik gerektiği farkındalığının sağlanması, hastanelerde yangından korunmak için yapılacak bütçe çalışmalarında kritik başarı faktörlerinin (KBF) ağırlıklarına göre planlama yapılması tavsiye edilmiştir. AHP yöntemi sonucunda elde edilen KBF ağırlıkları incelendiğinde en önemli iki faktörün yönetmeliklerdeki eksiklikler ve mimari tasarım olduğu görülmüştür.

II. HASTANELERDE ACİL DURUM YÖNETİMİ

Afet yönetimi, afetlerin zararlarının azaltılabilmesi ve önlenmesi için, afet öncesinde, sırasında ve sonrasında yapılması gerekli yönetsel, yasal ve teknik çalışmaları tespit eden ve uygulamaya ileten, bir olayla karşı karşıya kalındığında etkili müdahaleyi ortaya koyan ve olaylardan edinilen deneyimlerle mevcut sistemi geliştiren bir uzmanlık alanı ve yönetim yaklaşımıdır [3].

Afet yönetimi, afetlerin zararlarının azaltılması ve önlenmesi, afete zemin hazırlayan olaylara erken, etkili ve hızlı biçimde müdahalenin edilebilmesi ve afetten etkilenmiş olan toplumlar için daha emniyetli ve modern bir yaşamın çevresinin oluşturulması için toplum olarak yapılması gerekli toptan bir mücadelenin sürecini ifade etmektedir. Diğer bir ifadeyle, afetlerin zararlarının azaltılması ve önlenmesi maksadıyla, afetin öncesinde, sırasında ve sonrasında süreçte alınması gerekli tedbirler ve yapılması gerekli çalışmaların yönlendirilmesi, planlanması, koordinasyonun sağlanması, desteklenmesi ve etkili olarak uygulanabiliyor olması için toplumun tüm kademeleriyle, kaynak ve imkânlarının belirlenmiş olan stratejik öncelikler ve hedefler doğrultusunda

kullanımını gerekli kılan çok disiplinli, çok aktörlü ve çok yönlü bir yönetimin süreci olarak da tanımlanabilmektedir. Bu sürecin içinde, hazırlık, iyileştirme, zarar azaltma, yeniden inşa ve müdahale gibi ana kademelere ayrılabilen faaliyetler sürekli olanlardır. Bir önceki kademede yapılanların başarıları bir sonraki kademede yapılması gereken faaliyetler dizininin başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu süreç iç içe geçmiş halkalar veya bir çemberle resmedilmektedir ve “Afet Yönetim Zinciri veya Döngüsü” olarak isimlendirilmektedir. Bu sebeple “Entegre veya Bütünleşik Afet Yönetimi” terimleri de kullanılmaktadır.

Hastaneler afet esnasında ve sonrası süreçte insanlara sağlık hizmetinin sunulmasında hayati öneme sahiptir. Bu sebeple hizmetleri tam zamanında ve kesintiye uğramadan sunabilmek için kendi hazırlık ve planlamalarını yapmaları önemlidir [4]. Afet esnasında hızla olaylara müdahale edebilen, belirli sistem içinde olaylara dâhil olan kişilerin görev tanımlarının çok iyi belirlendiği, sistemli kayıtların yer aldığı ve tüm alanlarda müşterek dilin kullanıldığı sistem “hastane afet planı” olarak tanımlanmaktadır [5].

Afet planının asıl gayesi; acil müdahale sistemlerinin geliştirilmesi, personelin eğitimleri ve gereken donanımların satın alınabilmesi vasıtasıyla hastanelerin o andaki mevcut hastaları için bakımın devam ettirilebilmesi, personelinin koruma altına alabilmesi ve ortaya çıkmış olan ihtiyaçlara hızlı şekilde yanıt verebilmesi için hazırlıklı durumda bulunmalarını sağlamaktır [6]. Afetlerin iktisadi maliyetleri çok fazladır ve bu durumlara hazırlıksız yakalanmanın duygusal, sosyal geri dönüşleri tahmin edilememektedir [7]. Afet yönetim planlarının gayesi, yaralanmalardan imtina ederek ya da onları minimum seviyeye indirerek yönetimdekilerin zaman kısıtlılığı altında kalitatif kararlar almasına imkan vermektir [8].

Bir afet planında yer alması gerekli nitelikler aşağıda sıralanmıştır [9]:

- Nitelikleri uygun olan kişiler planda yer alan uygun pozisyonlara getirilmeli ve yönetsel olan zincire tam uyumluluk sağlanmış olmalıdır.
- Afet planının her duruma uyum sağlayabilen esnek yapısı olmalıdır.
- Planın sistematik olması sağlanmalı ve net görev tanımları, sorumluluklar içermelidir.
- Afet yönetim sistemi çalışan kesimi tarafından iyi anlaşılmalı, herkesin bir sorumluluğu olmasının yanında, kimlere karşı mesul olduğu da bilinmelidir.
- Hastane afet yönetim sistemi, toplumun ve hastanelerin dışındaki kurumların beklentilerine cevap verebilmelidir.
- Belge ve kayıta önem vermeli, muhtemel felaket esnasında dahi hızlıca kayıt metotlarıyla tüm ayrıntılar belgelendirilmelidir.

Hastane afet hazırlığı bölgesel, yerel ve ulusal seviyede önem arz etmektedir [6]. Hastaneler sürekli karşı karşıya kalınabilecek muhtemel bir krizi yönetebilmek için hazır durumda bulunmak mecburiyetindedir. Afet planları hastanelerin kitlesel ölümler, doğal afetler ya da terör sebebiyle ortaya çıkabilecek olan herhangi bir büyük hadiseyi kontrol altında tutabilmek amacıyla hazırlanmaktadır. Afet planlarının etkili bir biçimde çalışabilmesi için çok sayıda sağlık personeline gerek vardır [10]. Hastane çalışanlarının afetlerin öncesinde, sırasında ve afetten sonraki süreçte yetecek sağlık bakım hizmetini sağlamak amacıyla kabiliyetlerini artırmaları gerekmektedir [11].

Hastane afet planlarının etkin olması için hastane personelinin özellikle kendi sorumluluk ve görevleri hakkında yeteri kadar bilgili olması gerekmektedir. Bu sebeple afet eğitiminin, hastanelerin afet hazırlık evresinde çok önem teşkil ettiği görülmektedir [12]. Kilit hastane çalışanına acil bir durumda personeli ve kaynakları yönetebilmek amacıyla oluşturulmuş resmi olay komuta sistemini uygulamak için eğitim verilmelidir. Hastaneler ayrıca yetecek kadar tehlikeli maddelerden negatif basınç izolasyon odaları, koruyan kıyafet ve dekontaminasyon ekipmanları kullanmaya hazır durumda bulundurulmalıdır. Bir hastanenin acil eylem planının bu konuları göz önünde bulundurup bulundurmadığı tespit edilmek zorundadır [6].

Afetler ortaya çıktığı zaman hastanelerde kaos ve karmaşanın yaşanması çok görülen bir durumdur. Doğru örgütlenmiş ve önceden planlaması yapılmış etkinliklerin hızlı biçimde gerçekleştirildiği etkin bir yönetim sistemi afetlerin olumsuz sonuçlarını en aza indirmekte ve sınırlı insan kaynaklarını doğru bir biçimde kullanılarak tıbbi hizmetlerden maksimum fayda sağlanabilmektedir [13]. Afet esnasında tıbbi kurumlar, özellikle hastaneler, insanlara sağlık hizmeti sağlamada önemli rol oynamaktadırlar. Planlama ve hazırlık olmadan bu önemli hizmetleri

zamanında sağlamak zordur. Bu sebeple hastanelerin afet durumlarında özel bir yere sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedenleri aşağıda sıralanmıştır [4]:

- Hastanelerin afet esnasında kurtulanlara veya hastalara acil hizmet sağlaması, hayatta kalabilmeleri için kaliteli, zamanında ve yeterli hizmet verebilmesi hayati öneme sahiptir.
- Hastaneler bünyesinde birçok farklı gruptaki insanı barındırmaktadır ve bu hastalar çocuk, bebek, yaşlı olmak üzere farklı farklı yaş gruplarında olabilmektedir. Bu kişilerin çoğunluğu, afet durumlarında olabildiğince savunmasızdır. Diğer yandan hemşire ve doktorlar gibi bazı stratejik personelin hizmetlerinin, kayıplar ve kurtarılanlar için hayati öneme sahip olduğu bilinmektedir.
- Hastaneler; tomografi, mr gibi çok değerli araçlara ve gereçlere sahiptir.

III. LİTERATÜR TARAMASI

A. İlgili Standartlar ve Yönetmelikler

Ülkemizdeki “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik” 2002 yılı itibariyle yürürlüğe konulmuş olup, yetki ve sorumluluklar, genel ilke, bina tehlike sınıflandırılması, genel şehircilik ilkeleri, binaların kullanım sınıfları, kompartıman özellikleri, bina stabilitesi, malzemeler, merdivenler, kaçış yolları, bina tesisleri ve bölümlerine ilişkin düzenlemeler, elektrik sistemleri ve tesisatları, duman kontrolü, tehlikeli maddelerin kullanılması ve depolanması, yangın söndürme sistemleri, yangın güvenliği eğitimleri ve sorumluluğu ve mevcut yapılarda uygulanması gereken yangın güvenlik düzenlemelerine ilişkin hükümlere yer verilmiştir. Yönetmelikte 2015, 2012, 2009 ve 2007 yıllarında revizeye gidilmiştir [1].

NFPA (Ulusal Yangından Korunma Kurumu) standartlarındaysa sağlık yapıları ile alakalı hükümler iki farklı kod içerisinde bulunmaktadır: NFPA 101 Can Güvenliği Standardı ve NFPA 99 Sağlık Tesisleri Standardı. Özellikle NFPA 101 standardının 18. ve 19. bölümlerinde mevcut sağlık hizmet binalarının gereksinimleri ve mevcut potansiyel risk faktörleri göz önünde bulundurularak ele alınmıştır [1].

Literatür incelendiğinde hastanelerde yangınla mücadele ile ilgili çeşitli çalışmalara rastlanmış olsa da, yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörlerini içeren bir çalışma bulunmamaktadır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla kritik başarı faktörleri literatürden tespit edilmiş, daha sonra AHP yöntemi kullanılarak faktörler arasında sıralama oluşturulmuştur.

B. Kritik Başarı Faktörleri

Kritik başarı faktörü (KBF), yönetimde sorumlu birinin dikkatini vermesi gereken, genelde az sayıdaki, gerçekten önem arz eden konulardır. KBF terimi ilk 1981 senesinde Massachusetts Teknoloji Enstitüsü’nden (MIT) Rockart ve Bullen (1981) aracılığıyla önerilmiş ve yöneticilerin üst düzeydeki yönetim için gerekli ve önem arz eden bilgilerin saptanmasına yardım etmek amacıyla geliştirilmiştir. Rapor kalabalığından usanmış olan yöneticiler, ortaya çıkmış olan rastgele bir sorunu düzeltebilmek ve gerekeni yapabilmek amacıyla en kritik bilgiyi tespit etmeye çalışmaktadırlar. Her yönetimden sorumlu kişinin iş hayatında dikkatini dağıtabilecek çok sayıda veri (raporlar, verilmesi gereken günlük kararlar vs.) bulunmaktadır. Çoğu yönetici için ise başarının yolu, zaman gibi kısıtlı kaynaklarını başarısızlık ve başarı arasındaki farkı gösteren “kritik faaliyetlere” yönelmekten geçmektedir [14].

Bu çalışmanın temel amacı, hastanelerde yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörlerinin literatür yardımıyla belirlenmesidir.

Hastanelerde yangın güvenliği üzerine yapılan araştırmada, yangınlarda acil durum yönetiminin daha kolay yürütülebilmesi için hastaneler ve sağlık kurumlarının tasarım şartlarına dikkat edilmesi faktörünün çok önemli olduğu, tasarımın eğer yangınların etkilerini azaltacak ya da önemli bölümlere geçmesini engelleyecek olursa, yangınların zararlarının en aza indirilmiş olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca yangının erken algılanması faktörünün de olası hasarları azaltacağına değinilmiştir [15].

Sağlık yapılarının yangından korunma yönetmelik hükümlerinin eksik yönleri ve öneriler üzerine gerçekleştirilen çalışma sonucunda ‘Türkiye’de Yapılarda Yangından Korunma Yönetmeliklerinde’ sağlık yapılarının hasta tahliyesi ve yangın riskli mekânları için yeterli yönetmelik hükümlerinin yer almadığı tespit edilmiştir. Amerika’da ve İngiltere’de bu konuya ilişkin yönetmelik maddelerinin yer aldığı, Türkiye’ye kıyasla hastane yangınlarının daha az yıkıcı olduğu, yangınla mücadele başarı faktörleri arasında yönetmeliklerimizin eksik yönlerinin tamamlanması olduğu vurgulanmıştır [16].

Sağlık afet ve acil durum planlarında genel yaklaşımlar ve ülkemizde kullanılan planlar üzerine yapılan çalışmada afet ve acil durum planlarının genel ilkeleri araştırılmış yangınla mücadelede acil durum planlarının işlevsel hazırlanması, güncellenmesi ve hastane yer alan tüm birimlerin bu plana ulaşımının kolay olmasının kritik önemli olduğu vurgulanmıştır [17].

Son yıllarda meydana gelen hastane yangınları ve nedenleri üzerine bir araştırma isimli çalışmada hastane yönetim sistemine uygun risk değerlendirmesi yapılması vurgulanmış, son yıllarda çıkan yangınları incelenip aktif ve pasif yangın güvenlik önlemlerinin uygulanması faktörünün önemine değinilmiştir [18].

Sağlık yapılarında yangın güvenliğinin ve duman kontrolünün sağlanmasına ilişkin modelleme yöntemi isimli tez çalışmasında yangın esnasında kitlelerin en kısa sürede güvenilir alanlara aktarılmasını sağlayacak kaçış yollarının tesisi ve güvenli mekânların tasarımı faktörlerinin hayati önem taşıdığına altını çizilmiştir. Ayrıca acil durum yönetiminin görev dağılımının iyi tesis edilmesi gerektiğine de değinilmiştir [19].

Hastanelerde yangın güvenliği ve tahliye gerekleri üzerine bir irdeleme başlıklı tez çalışmasında hastanelerin durumuna, acil durum yönetimi tahliye aşamasında ne tür sıkıntılar yaşandığına değinilmiştir. Hastanelerde en fazla yangınların elektrik kontağından çıktığı tespit edilmiştir. Kritik başarı faktörleri olarak ise senede en az bir kez tahliye tatbikatı yapılması, sağlık yapılarında duman tahliye sisteminin tesis edilmesi, otomatik yağmurlama sisteminin kullanıyor olması ve gazlı söndürme sistemlerinin yeterli bulunması olarak sıralanmıştır [20].

Hastanelerde yangın güvenliği ve yangından korunma planlaması çalışmasında Diyarbakır özelinde bir hastane incelenmiş, hastanedeki eksiklikler irdelenerek yangın güvenliğinin iyileştirilmesi için Fine Kinney metoduyla risk analizi yapılmıştır. Başarı faktörleri olarak ise acil durum yönetimi için gerekli olan risk değerlendirmelerinin gerekli aralıklarla yapılması, sesli ve ışıklı uyarı sistemlerinin tesisi ve yangın çıkma tehlikesi yüksek bölümlerde izolasyon gerekliliği tespit edilmiştir [1].

Afetlerde güvenli hastaneler isimli çalışmada hastanelerin tüm afet olaylarına karşı nasıl bir durumda olduklarının tespiti amaçlanmıştır. Acil durum yönetiminde kritik başarı faktörü olarak ise hastanenin büyüklüğü ve taşıdığı özel tehlikeler, personel sayısı ile binada bulunacak diğer kişileri göz önünde bulundurarak; koruma, önleme, yangınla mücadele, tahliye, ilk yardım v.b. konularda uygun donanımlara sahip ve bu konularda eğitilmiş yeterli sayıda çalışanın görevlendirilmesi ve hazır tutulması önerilmiştir. Ayrıca acil durumlar için sağlık çalışanlarının düzenli eğitilmelerinin önemi de vurgulanmıştır [21].

Ankara’da seçilen bazı hastanelerde afet yönetimine ilişkin mevcut durum değerlendirmesi isimli bilimsel çalışmada seçilmiş olan sağlık tesislerinin afet yönetimindeki durumlarının değerlendirilmesi ve hastanelerin aralarında mukayese yapmak suretiyle önerilerin sunulması amaçlanmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu özel hastanelerin devlet hastanelere kıyasla yangın gibi muhtemel afetlere daha hazır durumda bulunduğu saptanmıştır. Çalışmada acil durum yönetiminde kritik başarı faktörü olarak hastanelerin yangın gibi olağan bir afetin üstesinden gelmek için afet planlarında yer alan eksikliklerin tamamlanarak afet yönetimine ilişkin faaliyetlerin etkili bir biçimde koordine edilebilmesi ve denetleniyor olması olduğu tespit edilmiştir [22].

Hastane binalarının tasarımında yangın güvenliği isimli çalışmada sağlık yapılarının projelendirme aşamasında, gerek mimari düzenlemeler gerekse elektrik ve mekanik yangın korunum sistemlerinin tasarımı, yangınlarda acil durum yönetimi açısından özel olarak planlanması gerektiği saptanmıştır. Hastanelerde yangın durumunda ilk yapılacak insanların tahliyesi olduğu, gerekli yerlerde sesli ve ışıklı uyarı cihazlarının bulunması gerektiği, ama yatılan katlarda, ameliyathanelerde ve yoğun bakım odalarında bunun mümkün olmadığı tespit edilmiştir. Bu tip yerlere duman geçişinin önleyecek tedbirlerin alınması önerilmiştir. Gerekeceği ise en azından kısıtlıların tahliye edilemediği durumlarda izole alanlarda kalabilmelerinin sağlanmasıdır [23].

Yangın güvenlik önlemleri bağlamında bir hastane projesi ve ulusal yangın mevzuatına uygunluk analizi çalışmasında seçilmiş olan hastanenin projesi üzerinde iki farklı yöntem yardımı ile yangın güvenlik tedbirlerinin analizi yapılmıştır. Analizi yapılan hastane binasında yangın acil durum yönetiminde başarıya ulaşmak için binanın mimari tasarımının ‘Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğe’ uygun olması, tasarım esnasında bahsedilen hükümlerin uygulanması, düşünülmesi ve denetimlerin yapılması gerektiği vurgulanmıştır [24].

IV. MATERYAL VE METOT

A. Materyal

Çalışmada kullanılmış olan materyal anketten elde edilen verilerdir. Ankete katılan uzmanlar, hastanelerin iş sağlığı ve güvenliği biriminde çalışan iş sağlığı ve güvenliği uzmanlarıdır. Anketten elde edilmiş olan veriler kullanılarak AHP yöntemi ile hastanelerde yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörleri önceliklendirilmiştir ve sıralama oluşturulmuştur. Kritik başarı faktörleri, yönetim süreçlerinde başarılı olunabilmesi için vazgeçilmez faktörler olarak tanımlanmıştır. Çalışmada literatür araştırması neticesinde hastanelerde yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin 17 adet kritik başarı faktörü belirlenmiş olup tablo ile sunulmuştur (Tablo 1).

Tablo 1. Hastanelerde Yangınla Mücadelede Acil Durum Yönetimine İlişkin Kritik Başarı Faktörleri

Kritik Başarı Faktörü	Kaynak
F ₁ Mimari tasarım	Çakır (2017)
F ₂ Yangın algılama sistemleri	Çakır (2017)
F ₃ Yönetmeliklerdeki eksiklikler	Şimşek & Akıncıtürk (2016)
F ₄ Acil durum planlarının işlevselliği	Yeşil (2017)
F ₅ Acil durum planlarının ulaşılabilirliği	Yeşil (2017)
F ₆ Aktif ve pasif yangın güvenlik önlemleri	Yıldız & Çelik (2020)
F ₇ Güvenli kaçış yolları	Şimşek & Akıncıtürk (2013)
F ₈ Uygun görev dağılımı	Şimşek & Akıncıtürk (2013)
F ₉ Tatbikat	İnce (2016)
F ₁₀ Duman tahliye sistemi	İnce (2016)
F ₁₁ Otomatik yağmurlama sistemi	İnce (2016)
F ₁₂ Risk değerlendirilmesi	Çavuş (2019)
F ₁₃ Sesli ve ışıklı uyarı sistemleri	Çavuş (2019)
F ₁₄ Personelin eğitimi	Özmen & Türk & Çetin (2013)
F ₁₅ Faaliyetlerin denetimi	Balçık & Demir & Ürek (2014)
F ₁₆ Duman izolasyonu	Balık & Beceren (2016)
F ₁₇ Yönetmeliğe uygun tasarım	Demirel & Başdemir & İşeri (2012)

B. Metodoloji

Çalışmada kullanılmış olan metodoloji aşağıda yer alan adımlardan oluşmuştur;

Adım 1: Çalışmamızın amaçları doğrultusunda hastane, yangın, acil durum, hastanelerde acil durum yönetimi anahtar kelimeleri yardımıyla literatür araştırması yapıldı.

Adım 2: Literatürden bulunmuş olan bulgulara göre çalışmamızın amacını da göz önüne alarak, hazırlanacak olan sistemin kavramsal veri akış modeli oluşturuldu.

Adım 3: AHP, DEMATEL, TOPSIS gibi benzer uygulamalar incelendi.

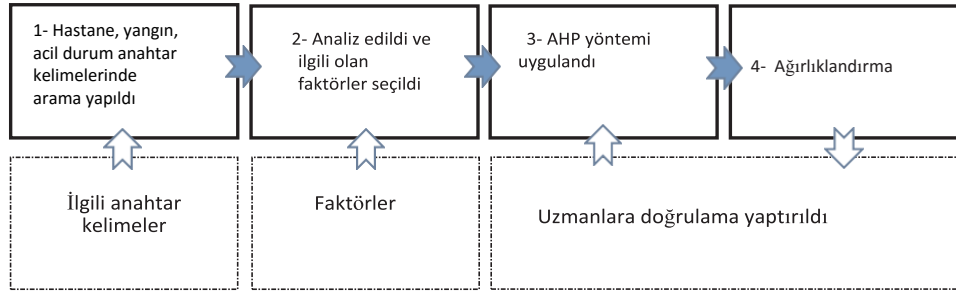
Adım 4: Hastanelerde yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörleri belirlendi.

Adım 5: Yeterli verimlilikte soruları kapsayan anket hazırlandı.

Adım 6: Seçilmiş olan 5 devlet hastanesinin iş sağlığı ve güvenliği biriminde çalışan 5 iş sağlığı ve güvenliği uzmanına anket uygulandı.

Adım 7: Anket sonuçları AHP metoduyla analiz edilerek çalışmada yer alan 17 KBF önceliklendirildi.

Adım 8: AHP uygulaması neticesinde elde edilmiş olan bulguların araştırılması, bulgulardan yola çıkılarak, sonuçlarının ve yapılacak çalışmalara yönelik önerilerin ortaya konulması, çalışmanın metodolojisini oluşturmaktadır.



Şekil 1. Metodolojik Adımlar

Bu çalışmada, KBF arasındaki bileşenlerin ikili karşılaştırma ve ağırlıklarının elde edilmesi yoluyla değerlendirilmesine izin verdiği için AHP yöntemi kullanılmıştır. Literatürden bulunmuş olan 17 kritik başarı faktörünün AHP yöntemi ile ağırlıkları belirlenecektir. AHP yöntemi seçilmesinin sebebi kriterler arasında etkileşimlerin olduğu durumlarda çoklu kriter analizi için basitliği ve esnekliği nedeniyle en çok uygulanan bilgi odaklı yaklaşımlardan biri olmasıdır. Ağırlıklar belirlendikten sonra seçilen 5 tane devlet hastanesinde iş güvenliği uzmanı olarak görev yapan uzman gruba doğrulama için tekrar başvurulacaktır.

C. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

AHP metodu, 1977 senesinde Thomas L. Saaty aracılığıyla geliştirilmiş olan çok kriterli karar vermenin aracıdır. Yöntem somut nicel faktörlere ek olarak soyut olan nitel kriterlerin de eklenmesine izin vermiştir [25]. AHP yönteminde kullanılan karar problemleri dört adımda çözüme kavuşmaktadır. Bunlar;

Adım 1: Birbirleriyle alakalı kriterlerin hiyerarşi içinde karar probleminin bölümlere ayırmak suretiyle karar hiyerarşisinin oluşturulması,

Adım 2: Kriterlerin ikili kıyaslamaları sonucuna göre giriş verilerinin toparlanması,

Adım 3: Kriterlerin bağıl ağırlıklarının tahmin edebilmek için özdeğer matrisi metodunun kullanılması,

Adım 4: Karar alternatiflerinin değerlendirmelerine ulaşabilmek için kriterlerin göreceli ağırlıkları gruplandırılmaktadır.

Kıyaslama yapılırken kriterlerin birbirlerine göre ne derece önemli olduklarını gösteren bir ölçeğe gereksinim vardır [26].

V. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

A. Karar Probleminin Tanımı

Karar problemi, hastanelerde yangınla mücadelede acil durum yönetimine ilişkin kritik başarı faktörlerinin öncelik seviyelerinin ortaya çıkmasına imkân veren bir sistem oluşturmaktır.

Tablo 2. AHP Önem Düzeyleri [27].

Önem Yoğunluğu	Tanım	Açıklama
1	Eşit Önem	İki faaliyet amaca eşit düzeyde katkıda bulunur.
3	Birinin diğerine göre çok az önemli olması	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine çok az tercih ettirir.
5	Kuvvetli derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine çok kuvvetli bir derecede tercih ettirir.
7	Çok kuvvetli düzeyde önemli	Bir faaliyet güçlü bir şekilde tercih edilir ve baskınlığı uygulamada rahatlıkla görülür.
9	Aşırı derecede önemli	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar çok büyük güvenilirliğe sahiptir.
2,4,6,8	Orta Değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanmak üzere yukarıda listelenen yargılar arasına düşen değerler.

B. AHP Yöntemi ile Faktörlerin Ağırlıklandırılması

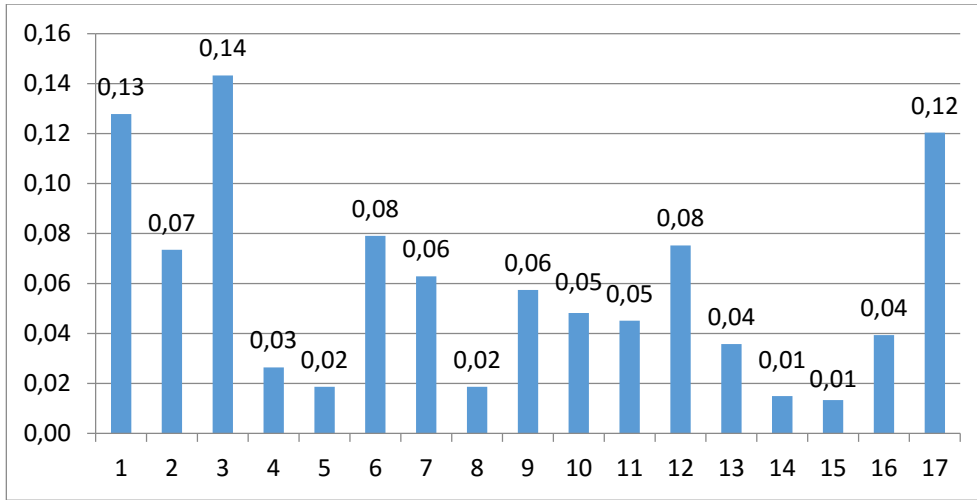
Kritik başarı faktörlerinin önemlilik seviyelerini tespit edebilmek için, ilk olarak faktörler kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sırasında Tablo 2' den yararlanılmış, birbirlerine göre önem yoğunluğu göz önünde bulundurularak puanlama yapılmıştır. AHP ikili karşılaştırma matrisi, 5 devlet hastanesinin iş sağlığı ve güvenliği biriminde çalışan 5 iş sağlığı ve güvenliği uzmanına uygulanan anketin geometrik ortalaması hesaplanarak oluşturulmuş ve karar matrisi Tablo 3'de verilmiştir. İkili karşılaştırma matrisinin birincil köşegeni 1 olarak alınmış ve köşegenin üzerindeki değerler $a_{ji}=(1/a_{ij})$ formülü yardımıyla hesaplanıp yerine yazılmıştır.

Tablo 3. AHP İkili Karşılaştırma Matrisi

KBF	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₅	F ₁₆	F ₁₇
F ₁	1	4,2	0,45	3,2	4,2	3,4	3,2	6,2	3,6	6,2	5,2	3,2	5,6	5,2	7,6	6,2	0,31
F ₂	0,23	1	0,19	6,6	6,2	2,2	3,4	5,6	2,2	7,2	3,2	4,4	7,2	7,4	7,2	5,4	0,71
F ₃	2,2	5,2	1	5,4	4,2	2,2	2,2	7,4	2,2	7,2	3,2	4,4	7,2	7,4	7,2	5,4	0,71
F ₄	0,31	0,15	0,18	1	1,4	0,19	0,31	2,2	0,31	2,4	0,45	0,19	2,2	3,4	2,2	0,19	0,12
F ₅	0,23	0,16	0,23	0,71	1	0,31	0,41	2,4	0,13	0,19	0,38	0,12	0,19	2,2	3,6	0,18	0,11
F ₆	0,29	0,45	0,45	5,2	3,2	1	7,4	5,2	2,2	1,2	3,2	2,4	2,2	3,6	5,2	2,4	0,41
F ₇	0,31	0,29	0,45	3,2	2,4	0,13	1	5,4	0,17	0,71	2,4	0,29	2,2	3,4	5,4	2,2	3,2
F ₈	0,16	0,17	0,13	0,45	0,41	0,19	0,18	1	0,31	0,18	0,31	0,10	3,4	2,2	1,4	0,19	0,29
F ₉	0,27	0,45	0,45	3,2	7,4	0,45	5,6	3,2	1	0,38	2,4	0,45	2,2	3,2	5,2	0,38	0,45
F ₁₀	0,16	2,4	0,13	0,41	5,2	0,83	1,4	5,4	2,6	1	0,27	0,41	0,45	5,4	3,2	1,4	0,38
F ₁₁	0,19	0,71	0,31	2,2	2,6	0,31	0,41	3,2	0,41	3,6	1	0,45	3,2	4,6	3,2	2,4	0,31
F ₁₂	0,31	0,45	0,22	5,2	8,2	0,41	3,4	9,4	2,2	2,4	2,2	1	3,2	4,4	2,2	5,4	0,41
F ₁₃	0,17	0,83	0,13	0,45	5,2	0,45	0,45	0,29	0,45	2,2	0,31	0,31	1	3,4	2,2	4,2	0,45
F ₁₄	0,19	0,19	0,13	0,29	0,45	0,27	0,29	0,45	0,31	0,18	0,21	0,22	0,29	1	2,6	0,45	0,38
F ₁₅	0,13	0,13	0,13	0,45	0,27	0,19	0,18	0,71	0,19	0,31	0,31	0,45	0,45	0,38	1	0,41	0,41
F ₁₆	0,16	0,45	0,18	5,2	5,4	0,41	0,45	5,2	2,6	0,71	0,41	0,18	0,23	2,2	2,4	1	0,31
F ₁₇	3,2	5,2	1,4	8,2	8,4	2,4	0,31	3,4	2,2	2,6	3,2	2,4	2,2	2,6	2,4	3,2	1

AHP yöntemi neticesinde tespit edilmiş olan faktörlerin sıralamaları ve ağırlıkları Şekil 2'de verilmiştir. Tutarlılık indeksi değeri hesaplanmıştır ve 0,1'den küçük olmasından dolayı bulunan sonuç tutarlı ve kabul edilebilirdir.

AHP yöntemi sonucunda elde edilen 17 kritik başarı faktörünün ağırlıkları Şekil 2'de verilmiş olup bu kriterlerden en önemlisi %14 ile yönetmeliklerdeki eksikliklerdir. Şekildeki ağırlıkların yüzdelik değerlerinin toplamı 100'ü vermektedir. Yönetmeliklerdeki eksikliklerden sonraki en önemli kriter ise %13 ile mimari tasarımıdır. Sıralamada son sıralarda ise sırayla %1 faaliyetlerin denetimi, %1 personelin eğitimi, %2 acil durum planlarının ulaşılabilirliği gelmektedir.



Şekil 2. AHP yöntemi sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları

VI. SONUÇ

İnsan popülasyonu açısından hastaneler, insan sirkülasyonunun yoğun olarak gerçekleştiği ortamlardır. Bu sebeple hastanelerde gerek sağlık personelinin, gerekse de hasta ve hasta yakınlarının karşılaşabileceği her türlü güvenlik açısından korunması gerekmektedir.

Hastanelerde hem fiziki koşullar, hem de çalışanların yeteri kadar bilgi sahibi olmamalarından kaynaklı risk faktörü yüksek seviyede olabilmektedir. Bu risk faktörlerinden en önemlisi yangındır. Yangın oluştuğunda personel, hasta ve hasta yakınlarının içinde bulunduğu durum karşısında yapabilecekleri hakkında yeteri kadar bilgi sahibi olmamaları ciddi tehlikelerle karşılaşma ihtimallerini yükseltmektedir.

Bu çalışmada, hastanelerde yangın acil durum yönetimine ilişkin KBF literatür yöntemiyle belirlenmiş, çok ölçütlü karar verme metoduyla ağırlıklandırılması yapılmaması sürecinde hangi faktörlerin dikkate alınması, daha çok önem verilmesi gerektiği, bu süreçte yaşanabilecek temel sorunlar incelenmiştir. Literatürden belirlenmiş 17 faktörün karşılaştırması için çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden AHP kullanılmıştır. Ağırlıklandırma yapabilmek için 1-9 skalası kullanılarak anket hazırlanmıştır. Seçilmiş olan hastanelerin iş sağlığı ve güvenliğinde çalışan 5 iş sağlığı ve güvenliği uzmanının anketlere verdiği yanıtların birleştirilip geometrik ortalaması alınarak faktörlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en önemli iki faktörün yönetmeliklerdeki eksikliklerin giderilmesi ve mimari tasarım olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmanın sonucunda AHP ağırlıklandırma sıralamasında ilk sırada olan yönetmeliklerdeki eksikliklere dikkat çekerek bir farkındalık oluşturmak, hastanelerin yangından daha etkili korunması, zararların en aza indirilmesi için belirlenen kritik başarı faktörlerine ağırlıklarına göre daha önem verilmesi, yangından korunma çalışmalarında bütçe belirlenirken çalışmamızın göz önünde bulundurulması ve gelecek çalışmalarda yol göstermesi hedeflenmiştir. Yapılan anket çalışmasında, seçilen denekler alanında yeterli tecrübeye sahip uzman profesyonellerden oluşmaktadır. Ancak, verilen yanıtlarda kişisel değerlendirmelerden kaynaklanan, yanlı cevapların oluşması muhtemeldir. Bu durumun en aza indirilebilmesi için ileride yapılacak çalışmalarda farklı bulanık mantık yöntemlerinin kullanılması planlanmaktadır. Bu sayede değerlendiricilerin fikirlerinin daha net ve yansız olarak alınması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Çavuş, E. (2019). *Hastanelerde yangın güvenliği ve yangından korunma planlaması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Rumeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Bozkırlı, K. (2004). *Afet ve felaketlerde hastane hizmetlerinin yönetimi: bir alan çalışması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] Akdağ, S. E. (2002). *Mali yapı ve denetim boyutlarıyla afet yönetimi*. Sayıştay Yayın İşleri Müdürlüğü, Ankara, 105.
- [4] Kavari, S. H., & Mobaraki, H. (2012). Survey of disaster preparedness of hospitals at Shiraz University of Medical Science, Iran. *HealthMed*, 6(6), 1987-1993.

- [5] Rodoplu, Ü., Ersoy, G. (2001). Hastane Afet Planı. İçinde: *4. Ulusal Sağlık ve Hastane Yönetimi Sempozyumu Bildiri Kitabı*, 27-28 Eylül 2001, Nobel Tıp Kitabevleri, İstanbul, s.167-175.
- [6] Mehta, S. (2006). Disaster and Mass Casualty Management in a Hospital: How Well Are We Prepared? *J Postgrad Med* 2006, 52:89-90.
- [7] Jarrell, J. D., Mayfield, M., Rappaport, E. N., & Landsea, C. (2001). The deadliest, costliest, and most intense United States hurricanes from 1900 to 2000: (and other frequently requested hurricane facts.)
- [8] Seyedin, H., Ryan, J., & Keshtgar, M. (2011) Disaster management planning for health organizations in a developing country. *Journal of Urban Planning and Development*, 137(1), 77-81.
- [9] Aytakin, T. (2003). *İstanbul Büyükşehir Belediyesi Sınırları İçinde Yer Alan Hastanelerde Afet Yönetimine İlişkin Mevcut Durum Değerlendirmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Burstein, J. L. (2006). The myths of disaster education. *Annals of emergency medicine*, 47(1), 50-52.
- [11] Hsu, E. B., Jenckes, M. W., Catlett, C. L., Robinson, K. A., Feuerstein, C., Cosgrove, S. E., ... & Bass, E. B. (2004). Effectiveness of hospital staff mass-casualty incident training methods: a systematic literature review. *Prehospital and disaster medicine*, 19(3), 191-199
- [12] Bistaraki, A., Waddington, K., & Galanis, P. (2011). The effectiveness of a disaster training programme for healthcare workers in Greece. *International nursing review*, 58(3), 341-346.
- [13] Moghaddam J.A., Nazhad S.A. and Naeini S.M. (2005) Study of Hospital Emergency Incident Command System and How Execute. *Journal of Military Medicine* 7(2):167-175.
- [14] Filizöz, B. (2010). *Stratejik planlamada kritik başarı faktörleri: THY örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [15] Çakır, A., (2017). Hastanelerde yangın güvenliği. *IV. Yapı Elektronik Sistemleri Sempozyumu Bildirileri*, İzmir, 2017.
- [16] Şimşek, Z., & Akıncıtürk, N. (2016) Sağlık yapılarının yangından korunma yönetmelik hükümlerinin eksik yönleri ve öneriler. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 283-298.
- [17] Yeşil, S. T. (2017). Sağlık afet ve acil durum planlarında genel yaklaşımlar ve ülkemizde kullanılan planlar. *Turkish Journal of Public Health*, 15(3), 233.
- [18] Yıldız, Z., & Çelik, G. (2020). Son Yıllarda Meydana Gelen Hastane Yangınları ve Nedenleri Üzerine Bir Araştırma. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 1-12.
- [19] Şimşek, Z. (2013). *Sağlık yapılarında yangın güvenliğinin ve duman kontrolünün sağlanmasına ilişkin modelleme yöntemi*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [20] İnce, A. (2016). *Hastanelerde yangın güvenliği ve tahliye gerekleri üzerine bir irdeleme*. Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] Özmen, P., Türk, Y. Z., & Çetin, M., (2013). Afetlerde Güvenli Hastaneler. *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 2(4), 547-561.
- [22] Balçık, P. Y., Demir, İ. B., & Duygu, Ü. R. E. K., (2016) Ankara'da Seçilen Bazı Hastanelerde Afet Yönetimine İlişkin Mevcut Durum Değerlendirilmesi. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 17(1): 45-58.
- [23] Balık, G. ve Beceren, K., (2016). Hastane Binalarının Tasarımında Yangın Güvenliği, TÜYAK.
- [24] Demirel, F., Başdemir, H., & İşeri, İ. (2012). Yangın Güvenlik Önlemleri Bağlamında Bir Hastane Projesi ve Ulusal Yangın Mevzuatına Uygunluk Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(4).
- [25] Badri, M. A. (2001). A combined AHP-GP model for quality control systems. *International Journal of Production Economics*, 72(1), 27-40.
- [26] Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- [27] Saaty, T. L. (2010). Mathematical principles of decision making (Principia mathematica decernendi). RWS publications.
- [28] İytemur, A. & Tekeli, Y.S. (2020). Bir Üniversite Hastanesinde Çalışan Hemşirelerin Hastane Afet ve Acil Durum Planları ile İlgili Görüşlerinin İncelenmesi. *Hacettepe Üniversitesi Hemşirelik Fakültesi Dergisi*, 7 (2), 138-148.
- [29] Sarık, M. E. & Cengiz, S. (2022). Hastane Afet ve Acil Durum Planı Eğitim, Hazırlık Düzeyi ve Çalışanların Bilgi Seviyelerinin Tespit Edilmesi: Antalya İli Örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 122-132.
- [30] Şahin Durgut, M. & Vapur, H. (2022). Determination of Emergency Self-Efficacy of Employees in a Public University. *OHS ACADEMY*, 5 (1), 13-22.

Araştırma Makalesi - Research Article

Atık Porselen Karonun (APK) Kil Zeminlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Effect of Waste Porcelain Tile (APK) on Physical and Mechanical Properties of Clay Soils

Semiha Poyraz^{1*}, Nazile Ural²

Geliş / Received: 04/02/2022

Revize / Revised: 15/05/2022

Kabul / Accepted: 22/07/2022

ÖZ

Atıkların geoteknik alanında değerlendirilerek tekrar kullanılması ekonomik ve etkili çözümler sağlayabilmenin yanı sıra tükenmekte olan kaynakların kullanımını azaltarak sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada %0, %5, %10, %15 ve %25 oranında atık porselen karonun (APK) kil zemine ilave edilmesiyle killi zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda APK, kil zeminin likit limit değerinin %25, plastik limit değerinin %22 ve plastisite indisi değerinin de %30'a yakın oranlarda azalmasını sağlamıştır. APK eklenmesiyle kuru birim hacim ağırlık değerinde 1,71 g/cm³ değerinden 1,74 g/cm³ değerine yükseliş, optimum su muhtevası değerinde %15 oranında gerileme görülmüştür. CBR oranı %4 değerinden %10 değerine yükselerek taşıma değerinde artış sağlanmıştır. Serbest basınç dayanımını %44 civarında arttırarak taşıma gücünü iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. APK katkısının kilinkonsolidasyon özelliklerini iyileştirdiği ve şişme-sıkışma davranışını kontrol altına almada olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Konsolidasyon katsayısı (c_v) değeri, APK oranının artmasıyla 3 kata ulaşan artış göstermiştir. Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) %90 oranında azalmıştır. Geçirimsizlik katsayısı (k) APK artışıyla yaklaşık 50 kat artmıştır. Bu çalışmada atık APK'nin killi zeminleri stabilize etmede kullanılabileceğinin mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Zeminlerin iyileştirilmesinde APK kullanılması teknik ve ekonomik yönden fayda sağlamanın yanı sıra atıkların çevrede birikmesi ve kirliliğe yol açması sorununa çözüm olmaktadır.

Anahtar Kelimeler- *Atık Porselen Karo, Zeminlerin İyileştirilmesi, Kil*

ABSTRACT

Evaluating and reusing wastes in the geotechnical field not only provides economical and effective solutions, but also contributes to sustainability by reducing the use of depleted resources. In this study, the effects of 0%, 5%, 10%, 15% and 25% waste porcelain tile (APK) on clay soils on the physical and mechanical properties of clay soils were investigated. APK reduced the liquid limit value of the clay soil by 25%, the plastic limit value by 22% and the plasticity index value by approximately 30%. With the addition of APK, the dry unit volume weight value increased from 1.71 g/cm³ to 1.74 g/cm³, and the optimum water content decreased by 15%. The CBR ratio increased from 4% to 10%, resulting in an increase in the transport value. It was concluded that by increasing the unconfined compressive strength by around 44%, it improved the bearing capacity. It was observed that the APK additive improved the consolidation properties of the clay and contributed positively to controlling the swelling-compression behavior. The consolidation coefficient value increased by 3 times with the increase in the APK ratio.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: semiha.poyraz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5449-7847>)

İnşaat Bölümü İnşaat Teknolojisi Programı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, MYO, Bilecik, Türkiye

²İletişim: nazile.ural@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2268-842X>)

İnşaat Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye

The volumetric compression coefficient decreased by 90%. The permeability coefficient increased approximately 50 times with the increase in APK. In this study, it was concluded that it is possible to use APK to stabilize clayey soils. In addition to providing technical and economic benefits, the use of APK in the improvement of soils is a solution to the problem of accumulation of wastes in the environment and causing pollution.

Keywords- Waste Porcelain Tile, Improvement of Soils, Clay

I. GİRİŞ

Atıklar ile ortaya çıkan kirliliğin çevre üzerine etkileri günümüzde aşırı boyutlara ulaşmış olup birçok olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Şekil 1). Nüfus oranındaki artış ve sanayileşmedeki hızlanma ile birlikte kaynaklarımız azalmakta ve azalan kaynakların etkili kullanıma ihtiyacı da bir o kadar önem arz etmektedir [1]. Yerleşim bölgelerinin artması ile beraber, gerekli olan proje çalışmalarının da her türlü zemin özelliklerine sahip yerlerde yapılması mecburi olmaktadır. Büyük şehirlerde ve sanayi yerleşimlerinde ortaya çıkan arsa problemi ve artan giderler sebebiyle düşük taşıma özelliği veya şişme-oturma açısından problemli zeminlerin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi üzerine atıkların kullanılması ile ilgili çok sayıda farklı çalışmalar başlamıştır. Bu çalışmalar sayesinde hem çevresel sorunların ortadan kaldırılmasına hem de geoteknik alanında zeminlerin iyileştirilmesine katkı sağlanmaktadır [2].



Şekil 1. Çevrede biriken çeşitli atıklar

Zayıf zeminlerin fiziksel, mekanik, hidrolik ve kimyasal yönden özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı birçok teknik kullanılarak (fiziksel, kimyasal veya biyolojik vb.) stabilizasyonu sağlanmaktadır [3]. Stabilizasyon çalışmalarının temel amacı taşıma gücünün artırılması ve stabilitenin sağlanmasına yöneliktir. Bu özelliklerin iyileştirilmesinin atıklarla sağlanabilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan oldukça etkili olmaktadır [4]. Günümüzde geoteknik alanında stabilizasyon çalışmalarında çeşitli sanayi atıkları kullanılmaktadır. Bu atıklara örnekler Şekil 2’de verilmiştir.



a) Pirinç kabuğu külü b) Mermer tozu c) Uçucu kül d) Çelik cürufu

Şekil 2. Çeşitli sanayi atıkları

Atıkların zeminlerin stabilizasyonunda kullanılması üzerine yapılmış çeşitli çalışmalara bakıldığında, şişme potansiyeline sahip kil zeminlerde şişmenin kontrol altına alınması ve zeminin iyileştirilmesi konusunda mermerlerin işlenmesi esnasında ortaya çıkan ve biriken mermer tozunun kullanılarak etkili çözüm sağladığı ortaya konmuştur [5]. Mermer kırığı atıklarının da özellikle yol dolgularında stabilizasyonu sağlamak amacıyla uygun bir çözüm olabileceği yapılan çalışmalar arasındadır. Mermer kırıklarının %8 oranında eklenmesiyle CBR değerinin %88 civarında arttığı görülmüştür [6]. Endüstriyel atıklardan uçucu kül yaygın olarak ortaya çıkan bir atık türüdür. Yapılan çalışmalarda zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanılması oldukça etkili sonuçlar ortaya çıkarmaktadır [7]. Pirinç kabuğu külünün zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmasıyla hem fiziksel hem de

mekanik özelliklerde iyileşmeler görülmekte olup killi zeminlerde hacimsel kontrolleri sağladığı sonucuna ulaşılmıştır [8]. Ayrıca CBR değerini ve serbest basınç dayanımını arttırdığı da yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir [9]. Başka bir çalışmada da pirinç kabuğu ile birlikte şeker fabrikası atıkları kullanılmış ve serbest basınç dayanımının artmasına olumlu katkılar yaptığı sonucuna ulaşılmıştır [10]. Çimentoya oranla daha az kirletici bir malzeme olan polietilen atıkların kullanılmasıyla bir zeminin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerinin artırılabilirdiği ortaya koyulmuştur [11]. Endüstriyel atıklardan olan çelik çürüğü ve atık ticari kirecin de özellikle killi zeminlerin stabilizasyonunda önemli faydalar sağladığı görülmüştür [12]. Atık kâğıt çamuru külü zayıf zemin katmanlarında iyileştirme amacıyla kullanılmış, olumlu iyileştirmeler sağlamıştır. Yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda kullanılarak zeminin kuru birim hacim ağırlık değerini arttırdığı ve plastisite özelliğini azalttığı görülmüştür [13]. Alçı atığı kullanılmasıyla ince daneli zeminlerin stabilizasyonu araştırılmış ve kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı özelliklerini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır [14]. Bir başka çalışmada ise atık plastik elyaf ile güçlendirilmiş killi/siltli zeminlere kireç ve pirinç kabuğu külü ilave edilmiştir. Bu doğrultuda basınç dayanımı ve kayma mukavemet özelliklerine olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür [15].

Seramik üretimi ülkemizde yıllık 550 bin ton civarında olmaktadır [16]. Yapılan araştırmalara göre üretilen seramiklerin üretim sürecinde ve sonrasında yaklaşık %30'u çöpe gitmektedir [17]. Bilecik-Kütahya-Eskişehir bölgesi seramik üretiminde %49,82'lik oranla Türkiye'nin en büyük dilimine sahiptir [16]. Bilecik ilinin seramik fabrikaları bakımından zengin bir sanayi bölgesi olması ve üretim sürecinde ve sonrasında ortaya çıkabilecek atıkların değerlendirilmesi çevre kirliliğinin önlenmesi ve geri dönüşüm açısından önem kazanmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Porselen üretimi sektöründe oluşan atıklar

Karo malzemeler seramik malzemelerden üretilen levhaların farklı ebatlarda boyutlandırılmasıyla zemin ve duvar kaplamalarında kullanılan bir yapı malzemesidir [18]. Dekoratif birçok faydası olmasına rağmen atıkları da çevreye fazlasıyla rahatsızlık vermektedir. Üretim sürecinde ve sonrasında ortaya çıkan Atık Porselen Karoların (APK) değerlendirilerek çevrede birikmesini önlemek ve aynı zamanda zeminlerin iyileştirilmesine katkıda bulunmak amacıyla killi zeminlerin stabilizasyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. APK malzemesinin kil zeminlerin hem fiziksel hem mukavemet özelliklerine etkileri çok yönlü incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Materyal

Bilecik ili Pazaryeri ilçesi bölgesinden kırmızı kil zemin örneği ve Bilecik sanayi bölgesinde bulunan Bien seramik fabrikasının seramik üretimi aşamalarında ortaya çıkan APK atık malzeme olarak seçilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. APK 105 °C'de kurutulduktan sonra Los Angeles aşındırma cihazında 3000 devirde öğütülmüş ve 425 µm çaplı elekten elendikten sonra kullanılmıştır (Şekil 4).



a) Kırmızı kil

b) APK parçaları

c) Öğütülmüş APK

Şekil 4. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler

Kilin içeriğinde demir oksit ($\%Fe_2O_3$) oranının $\%7$ 'nin üzerinde olmasından dolayı rengi kırmızıdır ve ismini buradan almaktadır [19]. Kırmızı kil örneği ve APK katkısının XRF kimyasal analizleri Tablo 1'de verilmiştir. Kırmızı kil ve APK katkısının özgül ağırlık (G_s) değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kil ve APK kimyasal içeriği

Bileşen	Kil (%)	APK Sırlı (%)
Al_2O_3	16,4	14,2
SiO_2	37	55,5
K_2O	6,3	6,81
CaO	4,8	6,14
TiO_2	4,3	3
Fe_2O_3	26	8,5
ZnO	1	1,7
ZrO_2	1,5	2,6
BaO	0,5	0,5
SrO	0,2	0,2
Rb_2O	0,2	0,2
MnO	0,3	0,3
P_2O_5	0,3	0,1
MgO	0,4	-

Tablo 2. Kil ve APK özgül ağırlık değerleri

Malzeme	Özgül ağırlık değerleri (G_s)
Kil	2,72
APK	2,60

B. Metot

APK katkısı $\%0$, $\%5$, $\%10$, $\%15$, $\%25$ olmak üzere değişen oranlarda kırmızı kil içerisinde kullanılarak kil zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda tüm deney numuneleri ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır.

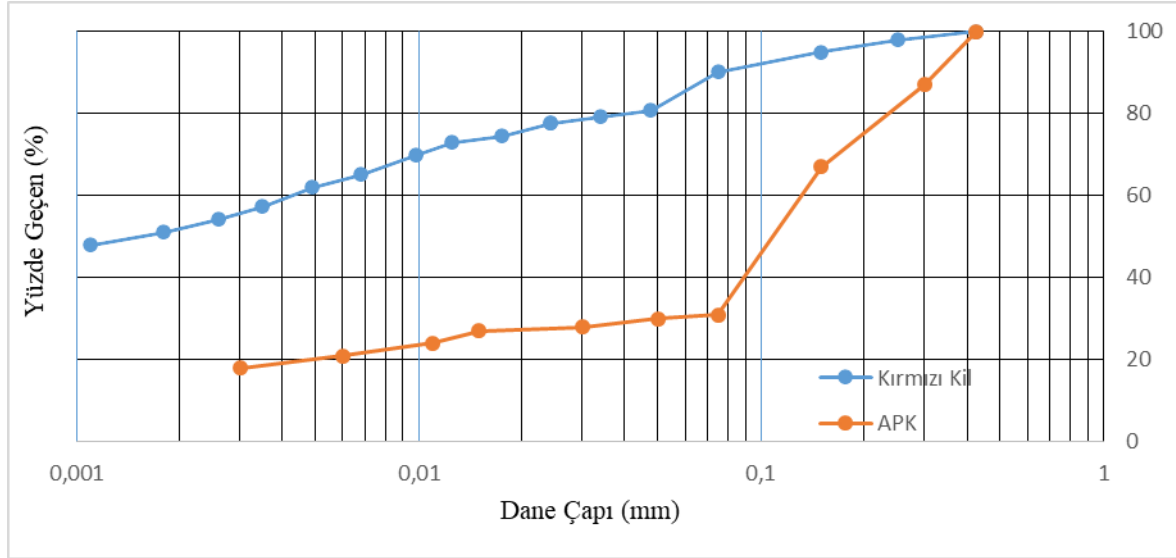
Çalışmada fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Elek analizi ASTM D422-63 ve Hidrometre deneyi ASTM D422-07 standardına göre kil zemin ve APK boyutlandırmasını elde etmek için yapılmıştır [20,21]. ASTM D854 standardına göre, kırmızı kilin ve APK katkısının özgül ağırlık değerleri Piknometre yöntemiyle elde edilmiştir [22]. Kıvam limitleri deneyleri ASTM D4318 standardı ile APK katkılı kil karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir [23]. Maksimum sıkışma ve optimum su içeriği arasındaki ilişkiyi elde etmek amacıyla ASTM D698 standardına uygun olarak standart proktor deneyi yapılmıştır [24]. ASTM D2166 standardına uygun olarak tek eksenli serbest basınç deneyi yapılmış ve serbest basınç dayanımı ile deformasyon

ilişkileri tespit edilmiştir [25]. Konsolidasyon deneyi çalışmaları ASTM D2435-02 standardına uygun olarak gerçekleştirilerek APK oranının kil zeminin sıkışma ve şişme davranışı üzerine etkileri bulunmuştur [26]. Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) deneyleri ASTM D1883-14 standardına uygun olarak yapılmıştır [27].

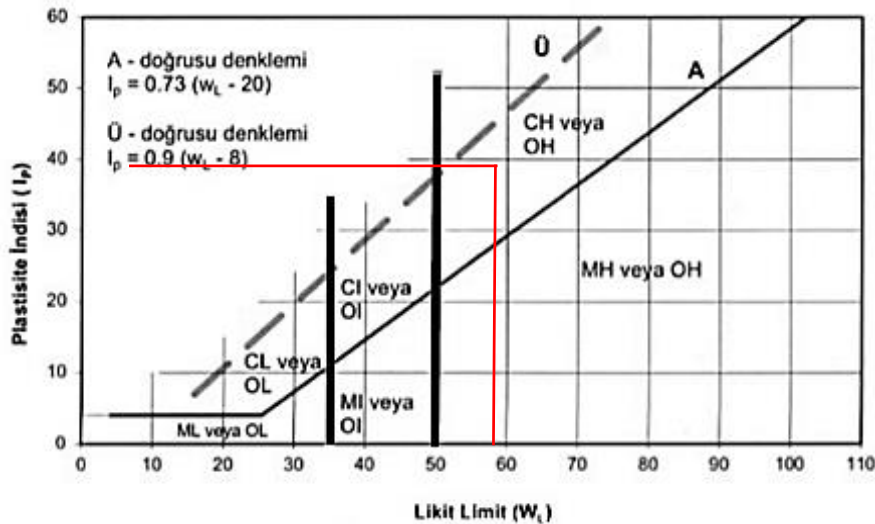
III. BULGULAR

A. Kırmızı Kil ve APK Boyut Özellikleri

Kırmızı kil ve APK üzerinde elek analizi ve hidrometre deney çalışmaları gerçekleştirilerek boyutlandırılma yapılmıştır (Şekil 5). TS1500-1 (2000) ve USCS zeminlerin sınıflandırılmasına göre kırmızı kil örneğinin zemin sınıfı CH (Yüksek Plastisiteli Kil) olarak bulunmuş ve Şekil 6'da gösterilmiştir [28].



Şekil 5. Kil ve APK dane dağılımı eğrisi

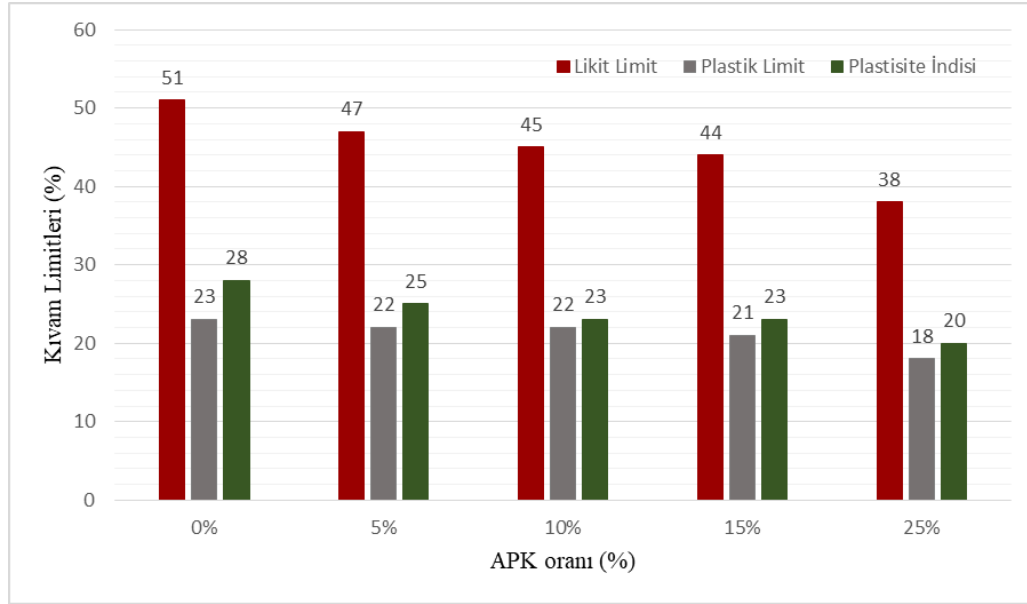


Şekil 6. Kilin sınıflandırılması

B. Kıvam Limitleri Deney Bulguları

Kıvam limitleri ince daneli zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan sayısal ifadelerdir ve aynı zamanda zemin davranışı hakkında birer işarettir [29]. Kırmızı kilin, Plastik limit (PL) ve Casagrande yöntemiyle belirlenmiş olan likit limit (LL) değerleri APK oranının (%) artmasıyla önemli bir azalış göstermiştir. Bu duruma bağlı olarak Plastisite İndisi (PI) değerinde de azalış olduğu görülmektedir (Şekil 7). Plastisite, kil zeminlerin en

önemli fiziksel özelliğidir [30]. APK oranındaki artışa bağlı olarak yüksek plastisiteli (CH) kırmızı kil, orta plastisiteli (CI) kile dönüşmüştür.

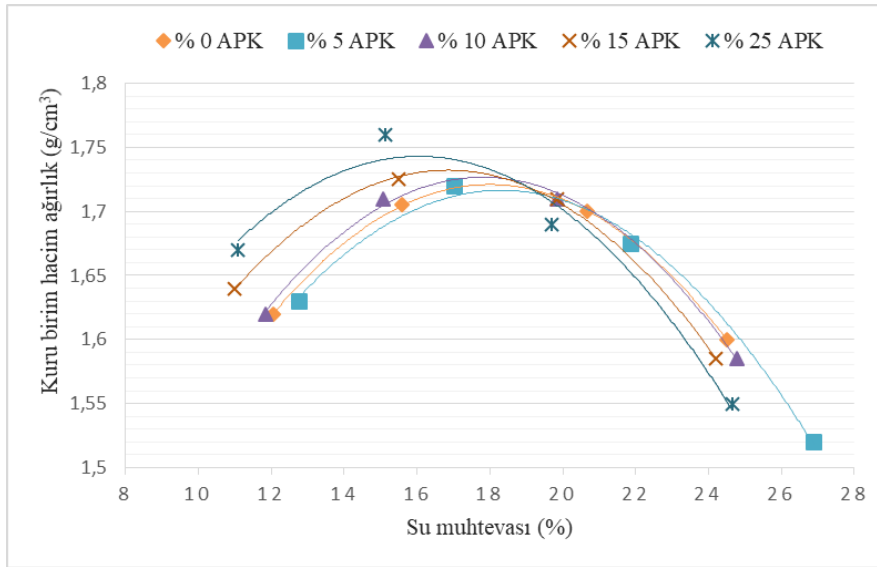


Şekil 7. Kıvam limitlerinin APK ile değişimi

Kıvam limitleri (likit limit, plastik limit) deney sonuçlarına göre APK oranının %25'e kadar artırılması ile likit limit değeri %25 civarında azalış göstermiştir. Plastik limit değeri ise %22 civarında azalmıştır. Plastisite indisi değeri de bu doğrultuda %28'den %20 değerine gerileyerek %30'a yakın bir azalma göstermiştir. Bu durum da kırmızı kil zeminin yüksek plastisite özelliğini azaltarak su karşısında daha kararlı bir davranış göstermesini sağlamaktadır.

C. Kompaksiyon (Standart Proktor) Deneyi Bulguları

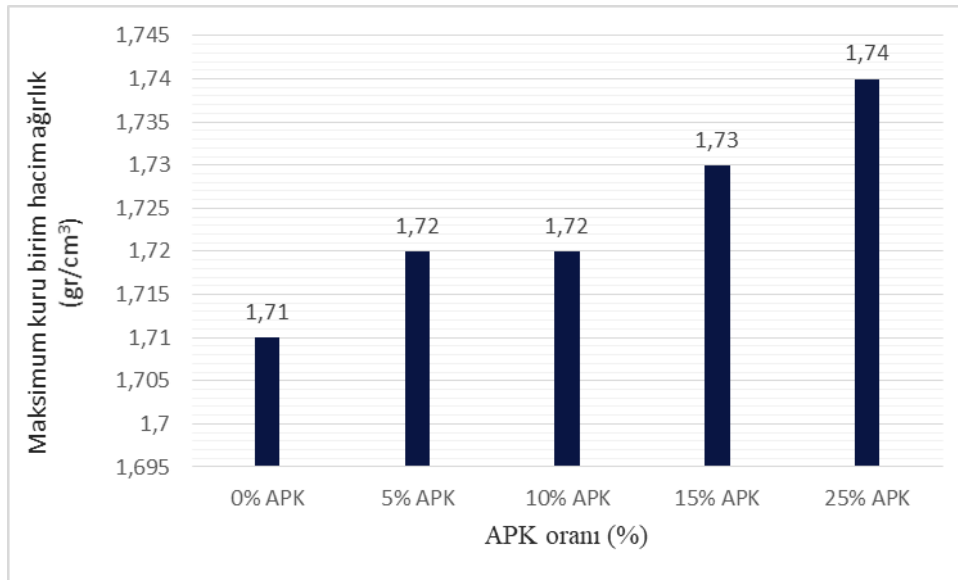
İnşaat mühendisliği uygulamalarında sahada karşılaşılan zeminlerin mühendislik parametreleri açısından istenilen özelliklerde olmadığı durumlarda (mukavemeti düşük, sıkışabilir özellikte yüksek hidrolik geçirgenlik vb.) sahadaki zemin tabakalarının stabilizasyonu uygun çözüm olabilmektedir [29]. Mekanik bir enerji ile zeminin sıkıştırılması işlemi olan kompaksiyon çalışmaları sayesinde zeminlerin mukavemetinin artması, hidrolik geçirgenliğinin azalması gibi faydalar sağlanabilir. Kırmızı kil zeminin APK katkısı ile kompaksiyon deneyleri karşısındaki davranışını belirlemek amacıyla standart proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çeşitli su içeriği yüzdelerinde su içeriği artırılarak numunelerin W_{opt} (optimum su içeriği değeri) ve ρ_{kmax} (maksimum kuru birim hacim ağırlık) ilişkisi elde edilmiştir. APK oranı artması ile W_{op} azalmış ve maksimum sıkışmayı gösteren ρ_{kmax} değeri yükselmiştir. %25 APK ile ρ_{kmax} 1,74 g/cm³ değerine ulaşmış ve W_{opt} %16,15 değerine gerilemiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Farklı APK oranlarındaki w_{opt} ile ρ_{kmax} grafiği değişimleri

APK oranı artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_k) artmıştır (Şekil 9).

Kompaksiyon (Standart Proktor) deneyi bulgularına göre kırmızı kilin içerisinde APK oranının artırılmasıyla birlikte optimum su muhtevası değerinde %15 oranında gerileme görülmektedir. Bununla birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri de artarak 1,71 g/cm³ değerinden APK oranının %25'e ulaşmasıyla 1,74 g/cm³ değerine yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumda zemin daha yoğun bir ortam olma özelliği kazanmıştır.

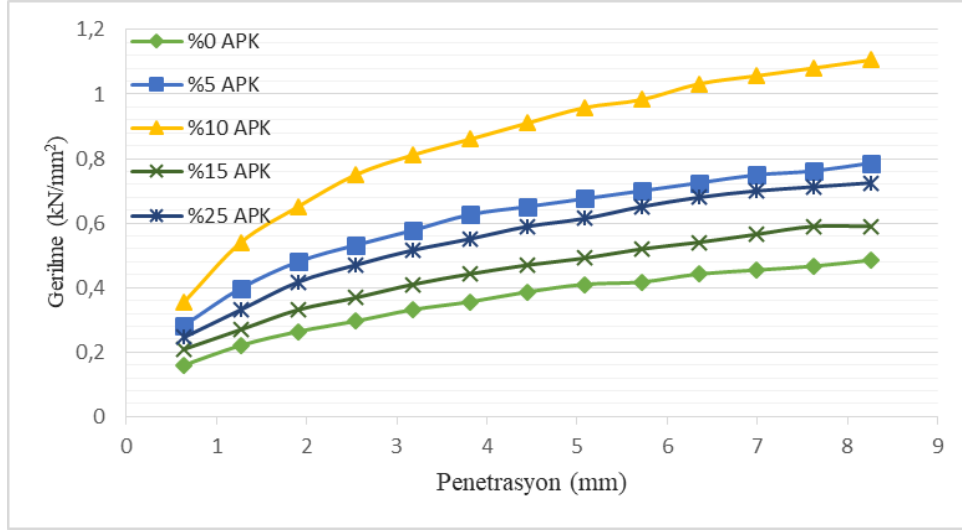


Şekil 9. APK ile maksimum kuru birim hacim ağırlık (ρ_{kmax}) ilişkisi

D. Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) Deneyi Bulguları

Karayolları temel zeminlerinde CH killeri taşıma gücü yönünden problemlere sebep olabilmektedir. Bu tür koşullarda problem teşkil edebilecek killi zeminlerin stabilizasyonlarının kontrolünde CBR deneyi prosedürü uygulanmaktadır. Kırmızı kile (CH) %0, %5, %10, %15 ve %25 oranlarında APK eklenerek CBR deneyi karşısındaki davranışı incelenmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler Şekil 10'da Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) deneyine göre elde edilmiş olan gerilme ve deformasyon ilişkisi verilmiştir. Aynı penetrasyon

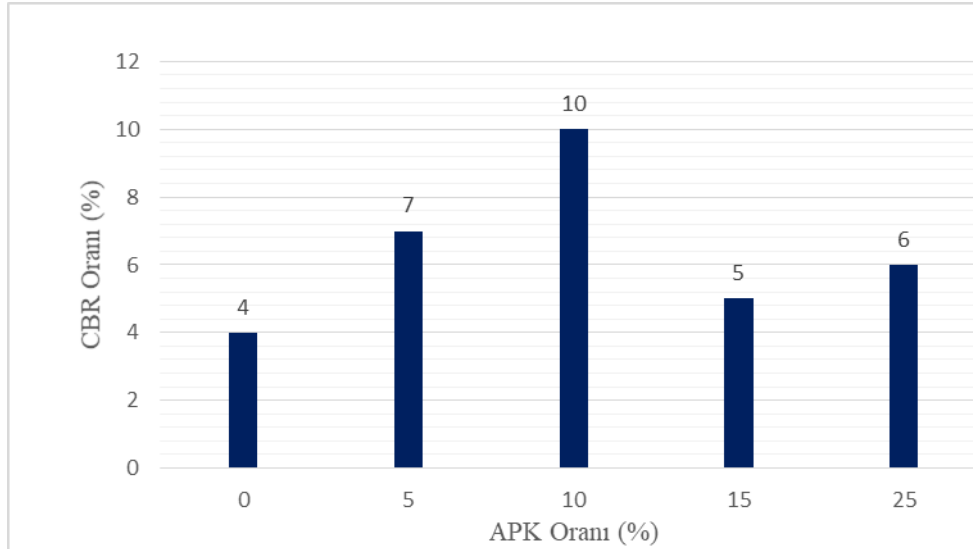
miktarları için en düşük gerilme değerinin %0 APK katkılı kilde olduğu görülmektedir. En büyük gerilme değeri tüm APK oranları arasında %10 APK oranı ile elde edilmiştir.



Şekil 10. Farklı APK oranlarının gerilme-penetrasyon ilişkisi üzerine etkisi

CBR oranının APK oranı ile değişimi Şekil 11’de görülmektedir. Buna göre katkısız kile oranla APK eklenmesi ile birlikte CBR oranı yükselmiştir. En yüksek değere %10 APK oranı ile ulaşılmıştır.

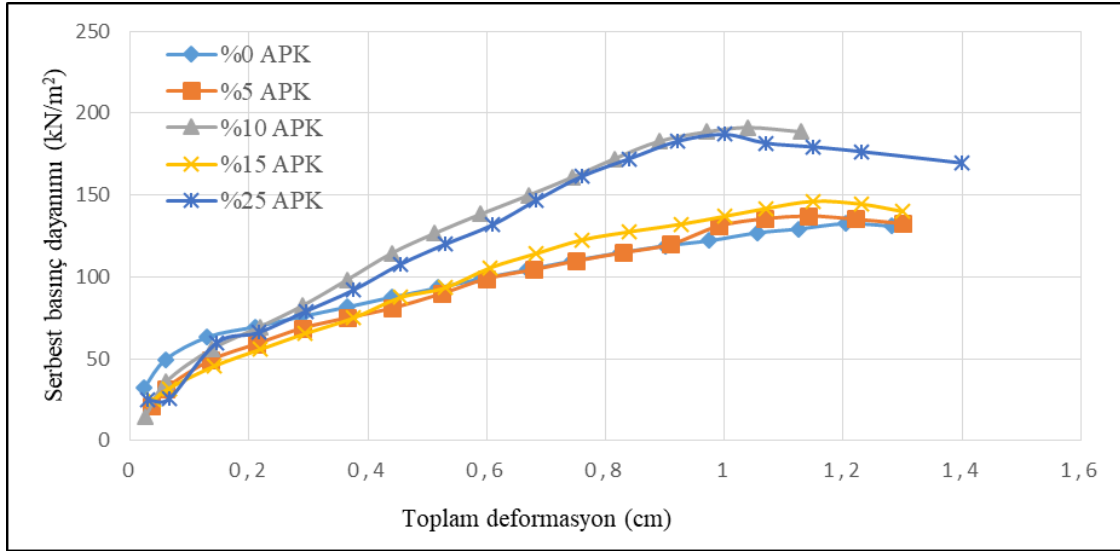
%10 APK ile aynı penetrasyon miktarlarında maksimum gerilme değerine ve CBR (%) oranına ulaşılmıştır. Bu durum karayolu altyapılarında kullanılan zeminlerin taşıma kapasitesini iyileştirdiği sonucuna ulaştırır. %10 APK’de maksimum değere ulaşılması ve sonrası tekrar azalma durumu kimyasal bir tepkime olmuş olabileceğine dikkat çekmektedir. Yapılan kimyasal analizler sonucunda elde edilen verilere dayanarak ve TS 25 ve ASTM C 618-19’a göre değerlendirildiğinde kil zeminin kimyasal içeriğinde $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ miktarının %79,4 oranında olması puzolanik özellik gösterme eğiliminde olabileceğini gösterir [31,32]. CaO miktarının %4,8 olması da çimentolaşma özelliği göstermesine az miktarda katkıda bulunacağını göstermektedir. APK kimyasal içeriğinde $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ miktarının %78,2 oranında olması puzolanik özelliğinin ortaya çıkmasının muhtemel olduğunu göstermektedir. Analizde APK’nin tek başına zeminde puzolanik (çimentolaşma) reaksiyonları başlatacak gerekli aktif CaO oranına ikincil düzeyde (%6.14) sahip olması nedeniyle reaksiyona belli seviyede etki gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 11. California Taşıma Oranının APK ile değişimi

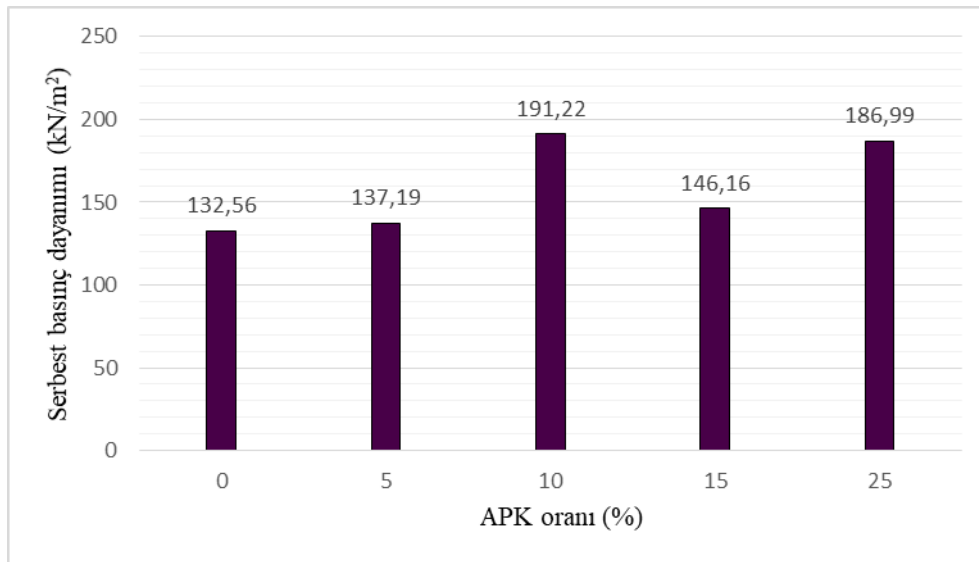
E. Tek Eksenli Drenajsız Serbest Basınç Deneyi Bulguları

Serbest basınç deneyi ile zeminlerin üzerlerine gelecek yükler karşısında gösterecekleri mukavemet değerleri belirlenir. APK katkısının CH kili mukavemeti üzerine etkisini incelemek amacıyla standart proktor deneyi ile optimum su içeriği oranında su eklenerek sıkıştırılmış ve bu sıkışmış zeminden elde edilmiş silindirik numuneler üzerinde serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Serbest basınç deneyi ile farklı APK oranlarına bağlı olarak serbest basınç dayanımı ve deformasyon ilişkisi elde edilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Farklı APK oranlarında elde edilen serbest basınç dayanımı deformasyon ilişkileri

CBR deneyinde olduğu gibi %10 APK oranı ile maksimum değere ulaşılmış ve zeminin dayanımı %44 oranında artmıştır. Killi zeminlerde karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan taşıma gücünün düşük olması APK kullanılmasıyla birlikte önemli oranda artmıştır.



Şekil 13. Farklı APK oranlarında serbest basınç dayanımı değişimi

F. Konsolidasyon Deneyi Bulguları

Çalışmada farklı APK oranlarında katkılar ile hazırlanan numuneler üzerinde tek boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. APK katkılı numuneler standart proktor deneyi ile optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Başlangıç boşluk oranı (e_0), sıkışma indisi (c_c), yeniden sıkışma indisi (c_r), konsolidasyon katsayısı (c_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) ve geçirimsizlik katsayısı (k) değerlerinin APK oranı ile değişimleri bulunmuştur (Tablo 3).

Başlangıç boşluk oranı (e_0) ve APK oranı (%) arasındaki ilişki incelendiğinde katkısız kilin e_0 değeri APK eklenmesiyle azalmıştır. Bu durum su ihtiyacının giderek azalmasına ve kil danelerinin özgül ağırlık değerinin APK danelerinden daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Sıkışma indisi (c_c) değeri 200-400 kPa ve 400-800 kPa aralıklarında incelendiğinde APK oranının %25'lere ulaşması ile birlikte yaklaşık ortalama %30 civarına kadar azaldığı görülmüştür. Bu durum kil zeminin oturma davranışını kontrol altına almada önemli bir sonuç olmaktadır. Kil zemine %25 APK eklenmesiyle 100-400 kPa gerilme değişimi durumunda, yeniden sıkışma indisi (c_r) değerinin %42 oranında azaldığı ve buna bağlı olarak APK'nin kil zeminin şişme davranışının kontrol altına alınmasına olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür. Konsolidasyon katsayısı (c_v) değeri zeminlerin oturma/sıkışma hesaplarında önemli bir parametredir. Zeminin geçirimsizlik ve sıkışabilirliğine bağlı bir parametredir. Elde edilen bulgulara göre konsolidasyon katsayısı (c_v) değeri APK oranının artmasıyla 3 kata ulaşan artış göstermiştir. Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) APK oranının artmasıyla %90 değerlerine ulaşan azalış göstermektedir. Geçirimsizlik katsayısı (k) APK oranının artmasıyla birlikte yaklaşık 50 kat artmıştır. Konsolidasyon deney sonuçlarına göre APK oranının artmasına bağlı olarak kil zeminin geçirimsizlik özelliği iyileşmekte ve oturma-şişme davranışı önemli ölçüde kontrol altına alınabilmektedir.

Tablo 3. APK oranının konsolidasyon deneyi sonuçlarına etkisi

APK Oranı (%)	Başlangıç boşluk oranı (e_0)	Sıkışma indisi (c_c)		Yeniden sıkışma indisi (c_r) 100-400 kPa	Konsolidasyon katsayısı (c_v)	Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v)	Geçirimsizlik katsayısı k (cm/dk) 400 kPa
		200-400 kPa	400-800 kPa				
0	0,58	0,298	0,242	0,019	0,0035	0,0005	0,00000175
5	0,56	0,288	0,240	0,016	0,011	0,00049	0,00000539
10	0,55	0,219	0,208	0,015	0,015	0,00048	0,0000072
15	0,53	0,202	0,189	0,012	0,021	0,00046	0,0000096
25	0,49	0,186	0,177	0,011	0,0439	0,00036	0,000016

IV. SONUÇLAR

Kırmızı kil zemin, yüksek plastisiteli kil (CH) özelliği taşımaktadır. Bu tür zeminlerde karşılaşılabilecek problemler stabilite problemleri, şişme-oturma potansiyeli davranışı, düşük taşıma gücü ve kayma dayanımı özelliği şeklinde sıralanabilir. %0, %5, %10, %15 ve %25 oranında atık porselen karonun (APK) kil zemine ilave edilmesiyle CH kil zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda APK katkısının CH kil zeminin kıvam limitleri değerini düşürerek plastisite özelliğini iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre daha az su içeriğinde daha yoğun bir zemin ortamı özelliği kazandırmıştır. CBR deneyi sonuçlarına göre ise karayollarında karşılaşılabilecek CH killerinde zeminin taşıma kapasitesini artırıcı yönde olumlu sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür. Serbest basınç deneyi karşısında APK katkılı zeminin katkısız zemine göre daha yüksek basınç dayanımı davranışı gösterdiği elde edilmiştir. Konsolidasyon deneyi ile APK katkısı eklenmesiyle kil zeminin şişme oturma davranışının kontrol altına alınabileceği ve geçirimsizlik özelliğinin iyileştirilebileceği başarılı bir şekilde ortaya koyulmuştur.

Atık Porselen Karonun (APK) killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği yapılan çalışmada gözlenmiştir. Geoteknik alanında teknik ve ekonomik çözümler sağlanması ve atıkların değerlendirilerek çevresel kirliliğin azaltılması amacıyla değerlendirilmesi sağlayacağı faydalar olarak sıralanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çağlar, G. (2007). *Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Girişken, M. (2010). *Gaziantep O.S.B. Atık Suyundan Kompostlaştırılarak elde Edilen Atık Madde ile Kil Karışımının Kesme ve Sıkıştırma Mukavemeti Parametreleri*. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [3] Çalık, Ü. (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç İle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [4] Çabalar, A. (2016). Kırık Atık Seramik Karoları Kullanarak Killi Toprak Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [5] Zorluer, İ., & Usta, M. (2003). Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi. *Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (Mersem '2003) Bildiriler Kitabı*, Afyon, 18-19.
- [6] Çimen, Ö., Dereli, B., Coşan, F. Ş., Aydın, A., & Coşar, H. V. (2014). Dolguda Kullanılabilecek Bir Zeminin Mühendislik Özelliklerine Mermer Kırığı Atıklarının Etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30 (1), 48-52.
- [7] Zorluer, İ., & Gücek, S. (2016). Zemin İyileştirmede Endüstriyel Atıkların Dayanıma Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2016 (16), 244-248.
- [8] Yadav, A., Gaurav, K., Kishor, R., & Suman, K. (2016). Stabilization of alluvial soil for subgrade using Rice Husk Ash, Sugarcane Bagasse Ash and Cow Dung Ash for rural Roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (1), 1-14.
- [9] Rahgozar, M., Sebarian, M., & Li, J. (2018). Soil Stabilization with Non-Conventional Eco-Friendly Agricultural Waste Materials: An Experimental Study. *Transportation Geotechnics*, 14 (March), 52-60.
- [10] Lall, E. (2016). Effect of Rice Husk Ash and Sugar Müll Waste as Admixture on Clay Soil. *Grenze Scientific Society, Proc. of International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, IETET*. 161-166.
- [11] Ilieş, M., Circu, A., Nagy, A., Ciubotaru, V., & Bak, Z. (2017). Comparative Study on Soil Stabilization with Polyethylene Waste Materials and Binders. *10. International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG*, 444-451.
- [12] Sanchez, M., Castro, J., Urena, C., & Azanon, J. (2015). Stabilisation of Clayey and Marly Soils Using Industrial Wastes: Ph and Laser Granulometry Indicators. *Engineering Geology*, 200, 10-17.
- [13] Khalid, N., Mukri, M., Awang, H., Kamarudin, F., Ghani, A., & Hashim, S. (2016). Compaction Characteristics of Banting Soft Soil Subgrade Stabilized Using Waste Paper Sludge Ash (WPSA). *American Institute of Physics*, 1774, 030008: 1- 6.
- [14] Tülek, M., Okucu, A., & Değirmenci, N. (2014). Kimyasal Atık Alçıların Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (2), 101-108.
- [15] Muntohar, A., Widiandi, A., Hartono, E., & Diana, W. (2013). Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013 (25), 1260-1270.
- [16] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2020). Seramik Sektörü Raporu, <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sector-raporlari/mu2812011410>, (Erişim Tarihi: 01.02.2022).
- [17] Awoyera, P. O., Ndambuki, J. M., Akinmusuru, J. O., & Omole, D. O. (2018). Characterization of Ceramic Waste Aggregate Concrete. *Housing and Building National Research Center HBRC Journal*, 2018 (14), 282-287.
- [18] Poyraz, M., & Yılmaz, Z. (2018). Seramik Karo Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 2018 (8), 256-270.
- [19] Serinsu, B. A., & Erden, B. C. (2018). Kınık ve Avanos Kırmızı Çömlek Killerinin Seramik Ham Sır Bileşiminde Yarattığı Değişikliklerin İncelenmesi. *İdil Dergisi*, 7 (48), 957-984.
- [20] ASTM D422-63 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [21] ASTM D422-07. (2007). Standard Test Methods for Particle-Size Analysis of Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [22] ASTM D854-02 (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [23] ASTM D4318 (2008). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.

- [24] ASTM D698-12e2 (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [25] ASTM D2166M-13 (2013). Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [26] ASTM D2435M-11 (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM D1883-14 (2014). Standard Test Methods for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [28] TS 1500, 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, TSE, Ankara, 25-57.
- [29] Sheahan T. C. , Kovacs W. D., & Holtz R. D. (2015). Geoteknik Mühendisliğine Giriş. Nobel Akademik Yayıncılık, Türkiye, 864.
- [30] Casagrande (1932). Research on the Atterberg Limits of Soils” Public Roads, vol. 13, no.8, pp. 121-136.
- [31] TS 25, 2008. Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- [32] ASTM C618-19 (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.

Araştırma Makalesi - Research Article

Benzimidazol-Tiyadiazol Türevlerinin Sentezi, Karakterizasyonu, Antioksidan ve Antikanser Çalışmaları

Synthesis, Characterization, Antioxidant, and Anticancer Studies of Benzimidazole-Thiadiazole Derivatives

Hayrani Eren Bostancı¹, Ulviye Acar Çevik^{2*}

Geliş / Received: 08/02/2022

Revize / Revised: 23/06/2022

Kabul / Accepted: 01/07/2022

ÖZ

Çalışmamızda yeni antikanser ilaçlar geliştirmek üzere bazı benzimidazol-tiyadiazol türevi bileşikler tasarlanmış ve yapıları ¹H-NMR, ¹³C-NMR ve elemental analiz spektral verileriyle kanıtlanmıştır. Bileşiklerin sitotoksik aktiviteleri HT29 hücre hattı üzerinde MTT yöntemi kullanılarak referans bileşik fluorourasil ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, bileşiklerin seçiciliklerini tespit etmek amacıyla L929 (sağlıklı fare fibroblast hücresi) hücre hattına karşı sitotoksik etkisi değerlendirilmiştir. Bileşiklerin IC₅₀ değerleri incelendiğinde, 5-(2-(2,6-dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-sikloheksil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin yapısına sahip BT-2 bileşiği 34,13±2,48 µM IC₅₀ değeri ile referans ilaç fluorourasil (12,84 ± 3,66 µM) ile kıyaslanabilir etki göstermiştir. BT-2 bileşiğinin L929 sağlıklı hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkisinin referans ilaçtan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, BT-2 bileşiğinin antikanser etkisinin geliştirilebilmesi konusunda umut vericidir. Ayrıca, TAS ve TOS ile bileşiklerin antioksidan özellikleri değerlendirilmiştir. BT-2 bileşiğinin TOS değerinin kontrol ilaçla karşılaştırılabilir düzeyde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Benzimidazol, Tiyadiazol, Anticancer, Antioksidan*

ABSTRACT

In our study, some benzimidazole-thiadiazole derivative compounds were designed to develop new anticancer drugs, and their structures were proven by ¹H-NMR, ¹³C-NMR, and elemental analysis spectral data. The cytotoxic activities of the compounds were evaluated by comparing the reference compound fluorouracil using the MTT method on the HT29 cell line. In addition, the cytotoxic effect of the compounds against the L929 (healthy mouse fibroblast cell) cell line was evaluated in order to determine the selectivity of the compounds. When the IC₅₀ values of the compounds are examined, the structure of 5-(2-(2,6-dimethoxyphenyl)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-yl)-N-cyclohexyl-1,3,4-thiadiazol-2-amine (BT-2) compound with an IC₅₀ value of 34.13±2.48 µM showed comparable efficacy to the reference drug fluorouracil (12.84 ± 3.66 µM). It was determined that the cytotoxic effect of BT-2 compound on L929 healthy cell line was lower than the reference drug. These results are promising in terms of improving the anticancer effect of BT-2 compound. In addition, TAS and TOS of the compounds and antioxidant properties of the compounds were evaluated. The TOS value of the BT-2 compound appears to be comparable to the control drug.

Keywords: *Benzimidazole, Thiadiazole, Anticancer, Antioxidant*

¹İletişim: erenbostanci@cumhuriyet.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8511-2316>)

Eczacılık Fakültesi, Biyokimya Anabilim Dalı, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişimi: uacar@anadolu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-1879-1034>)

Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Kimya Anabilim Dalı, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

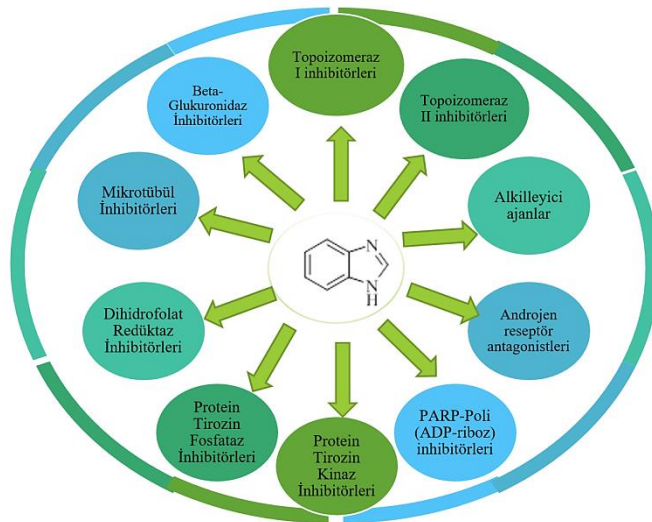
I. GİRİŞ

Kanser; bir takım mutasyonlar sonucu hücrenin kontrolsüz büyümesi, farklılaşması ve normal olmayan bir şekilde yayılması şeklinde oluşan ölümcül bir hastalık olarak tarif edilebilir [1]. Dünya Sağlık Örgütü tarafından yayınlanan dünya kanser raporunda, kansere bağlı ölüm oranının önümüzdeki yıllarda neredeyse ikiye katlanacağı bildirilmektedir [2]. Günümüzde terapötik kanser tedavisindeki en büyük engel, antikanser ilaçların normal hücreler için de toksik olması ve bunun birçok yan etkiye neden olmasıdır [3]. Bu durum mevcut tedavinin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle, yeni tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesinde, minimal yan etkileri olan yeni ve güçlü kemoterapötiklerin keşfine büyük ihtiyaç vardır [4].

Kanser tedavisinde cerrahi, kemoterapi ve radyoterapi tedavi seçenekleri arasındadır. Kemoterapi, kanser hücrelerini öldürmek için kimyasalların veya ilaçların kullanıldığı tedavi şeklidir. Antikanser bileşikler farklı mekanizmalar içerirler; Alkilyeyici ajanlar (ör. sisplatin), mitotik inhibitörler (ör., paklitaksel), epidermal büyüme faktörü reseptörü (EGFR) inhibitörleri (örn., gefitinib), VEGF (vasküler endotelial büyüme faktörü) reseptör inhibitörleri (örneğin bevacizumab), topoizomeraz inhibitörleri (örn. kaptopresinler) yaygın olarak kullanılan antikanser ilaçlardır [5].

Antioksidan bileşiklerin son zamanlarda daha fazla ilgi görmesinin ve öneminin artmasının nedenlerinden birisi de reaktif oksijen türlerinin canlılardaki etki mekanizmasının ve hasarlarının ortaya konduğu çalışmaların artmış olmasıdır. Reaktif oksijenlerin canlılarda çeşitli hastalıklara neden olduğunu gösteren bu çalışmalar hücre onarım sistemi ve savunma mekanizmalarının oksidatif yıkımla ilgili olduğunu göstermiştir. Reaktif oksijen türleri pek çok metabolik olayda görev alan oksijenin metabolik yollarda radikal özellik kazanması ile oluşmaktadır. Reaktif oksijenlerin DNA mutasyonuna neden olmalarının yanı sıra lipit peroksidasyonu sonucu hedef hücre ve dokuların membran yapılarının bozulmasına da neden oldukları bilinmektedir [6].

Yukarıdaki gelişmelere dayanarak yeni, etkili antikanser ve antioksidan terapötik ajanların geliştirilmesinin ilaç kimyasında kritik bir öneme sahip olduğunu söyleyebiliriz. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, heterosiklik bileşiklerin insan biyolojik sisteminde önemli bir rol oynadığı kabul edilmiş ve aynı zamanda hem biyolojik aktivitede hem de ilaç endüstrisinde çok çeşitli biyolojik aktivitelere sahip heterosiklik bileşiklerin yerini almıştır [7]. Benzimidazol sahip olduğu farklı biyolojik ve farmakolojik etkilerinden dolayı ilaç geliştirmede çok sık kullanılan heterosiklik halkadır. Benzimidazol halkasının pürin bazına olan benzerliğinden dolayı daha az toksik olabileceği düşünülmüştür. Bundan dolayı biyolojik olarak aktif olan birçok bileşiğin yapısında yer almakta ve yeni geliştirilecek olan ilaç adaylarında anahtar rol oynayan önemli bir yapıdır. Benzimidazol antitümör/antiproliferatif/antikanser [8-18], anti-HIV de içeren antimikrobiyal [19-22] antioksidan [23-25] gibi geniş bir aktivite yelpazesine sahiptir. Ayrıca, benzimidazol halkasının kanser oluşumundaki farklı mekanizmalar üzerinde hedefleri bulunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Benzimidazolün farklı kanser hedefleri [26]

Benzimidazol yapısı taşıyan çok az sayıda antikanser ilaç bulunmaktadır (Bendamustin, Karbendazim, Nokodazol). Ancak literatürde benzimidazolün antikanser etkinliği üzerine yapılan birçok çalışma bulunmaktadır [27-33].

Bu amaçla bu çalışmada benzimidazol-tiyadiazol halkası içeren yeni iki bileşik sentezlenmiştir. Bileşiklerin yapıları ¹H-NMR, ¹³C-NMR ve elemental analiz yöntemleri ile aydınlatılmıştır. Bileşiklerin antikanser etkinlikleri HT-29 hücre hattı üzerinde MTT yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, L929 (sağlıklı fare fibroblast hücresi) hücre hattı üzerinde de bileşiklerin sitotoksik etkileri değerlendirilmiştir. Bileşiklerin, toplam oksidatif stresi (TOS) ve toplam antioksidan seviyeleri (TAS)de belirlenmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Sentez Çalışmaları

2,6-Dimetoksibenzaldehitin sodyum bisülfid tuzu sentezi (1):

2,6-Dimetoksibenzaldehit (0.05 mol) etanol içerisinde çözünür. Sodyum metabisülfid (0.05 mol) etanol içerisinde çözülerek damla damla benzaldehit çözeltisine damlatılır. Damlatma tamamlandıktan sonra reaksiyon içeriği oda sıcaklığında bir saat karıştırılır. Çöken ürün süzülerek alınır.

2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karboksilik asit sentezi (2):

3,4-diamino benzoik asit (0.03 mol) ve 2,6-dimetoksibenzaldehitin sodyum bisülfid tuzu DMF içerisinde çözündürülür ve geri çeviren soğutucu altında 4 saat karıştırılır. İTK ile kontrol edildikten sonra reaksiyon içeriği buzlu suya dökülür ve süzülerek alınır.

Metil 2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karboksilat sentezi (3):

2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karboksilik asit (2) türevi bileşik (0.025 mol) metanol ve birkaç damla sülfürik asit ile esterleşme reaksiyonu gerçekleştirilir. Reaksiyonu bitiminde çöken ürün süzülür.

2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbohidrazit (4):

Metil 2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karboksilat (3) (0.018 mol), etanol (15 mL) ve hidrazin hidrat (5 mL) geri çeviren soğutucu altında 5 saat karıştırılır. İTK ile kontrol edildikten sonra reaksiyon içeriği buzlu suya dökülür ve süzülerek alınır.

2-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbonil)-N-etilhidrazine-1-karbotiyamid (5) ve 2-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbonil)-N-sikloheksilhidrazine-1-karbotiyamid (6) sentezi:

2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbohidrazit (4), etil/sikloheksil izotiyosiyanat etanol içerisinde çözülerek geri çeviren soğutucu altında 3 saat karıştırılır. Çöken ürün süzülerek alınır.

5-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-etil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-1) ve 5-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-sikloheksil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-2) sentezi:

2-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbonil)-N-etilhidrazin-1-karbotiyamid (5) ve 2-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbonil)-N-sikloheksilhidrazin-1-karbotiyamid (6) bileşikleri 10 mL der. H₂SO₄ içerisinde buz banyosunda karıştırılır. Daha sonra oda sıcaklığında 10 dk daha karıştırılır, süre sonunda yavaşça buz üzerine dökülüp, sulu amonyak ile pH=8'e ayarlanır ve süzülür. Su ile yıkanır ve etanolden kristallendirilir.

B. Antikanser Aktivite

HT-29 insan kolorektal karsinom hücreleri ATCC'den elde edildi ve hücre hatlarına uygun koşullarda büyütüldü. Çalışmamızda DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) (yüksek glukozlu) içinde %1 L-glutamin, %10 FBS, 10 mg/mL streptomisin ve 100 IU/mL penisilin kullanıldı. Oluşturulan besi yeri içerisindeki hücre hatları 37°C'de %95 nem ve %5 CO₂ altında büyütülmüştür. Hücre yoğunluğu %80'lik bir birleşme düzeyine ulaştığında hücreler pasajlandı. Hücreler, her deney tasarımı için belirli hücre yoğunluklarında deneylerden 24 saat önce 96 oyuklu plakalara ekildi. Ön tarama için, sentezlenen bileşiklerin sitotoksik biyoaktivitesi, MTT tahlili ile HT-29 hücre hattına karşı in vitro olarak değerlendirildi. BT1 ve BT2 bileşikleri DMSO içinde çözüldü ve stok çözeltiler DMEM ile seyreltildi, DMSO'nun nihai konsantrasyonu %0.5'i geçmedi. Hedef bileşiklerin antikanser

potansiyelini değerlendirmek için kanser hücreleri, farklı konsantrasyonda BT1 ve BT2 çözeltilerine maruz bırakıldı. Bileşiklerin IC₅₀ değerleri hesaplanmıştır.

C. Antioksidan/Oksidan Aktivite

Toplam antioksidan statüsü (TAS), Rel Assay Diagnostic tarafından üretilen ticari kit ile belirlendi. Bu yöntemle göre, numunedeki potansiyel antioksidan yapılar, koyu mavi-yeşil ABTS ((2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolin-6-sülfonat)) radikal formunu renksiz ABTS formuna dönüştürür. 660 nm'de ölçülen absorban değışimi, numunenin toplam antioksidan kapasitesi ile ilgilidir. Test, TROLOX eşdeğeri olarak adlandırılan E vitamini analogu olan stabil standart antioksidan çözelti olarak kullanılan referans madde ile kalibre edilmiştir. TAS ölçümü, kit prosedürüne göre yapılmıştır. Absorbans değerleri arasındaki fark hesaplandıktan sonra, aşağıda verilen denkleme göre antioksidan düzeyler belirlenmiştir

$$A2 - A1 = \Delta Abs \text{ örnek, standart veya su}$$

$$Sonuç = \frac{[\Delta Abs H_2O - \Delta Abs \text{ Örnek}]}{[\Delta Abs H_2O - \Delta Abs \text{ Standart}]} \quad (1)$$

Toplam oksidan statüsü (TOS), Rel Assay Diagnostic tarafından üretilen ticari kit ile belirlendi. Numune içinde bulunan oksidanlar, demir iyon şelatör kompleksini ferrik iyon oksitler. Reaksiyon ortamında çok miktarda bulunan arttırıcı moleküller ile oksidasyon reaksiyonu uzatılmaktadır. Asidik ortamda ferrik iyonu, kromojen renkli bir kompleks oluşturmaktadır. Numunede bulunan toplam oksidan molekül miktarıyla orantılı olan renk yoğunluğu spektrofotometrik olarak ölçülmektedir. Test, hidrojen peroksit ile kalibre edilmekte ve sonuçlar litre başına mikromolar hidrojen peroksit eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (µmol H₂O₂ Eşdeğer./L). Kit prosedürüne göre TOS ölçümü yapılmıştır. Absorbans değerleri arasındaki fark hesaplandıktan sonra, aşağıda verilen denkleme göre antioksidan düzeyler belirlenmiştir.

$$A2 - A1 = \Delta Abs \text{ of standart or sample}$$

$$Results = \frac{\Delta Abs \text{ Sample}}{\Delta Abs \text{ Standart}} * 20 \quad (2)$$

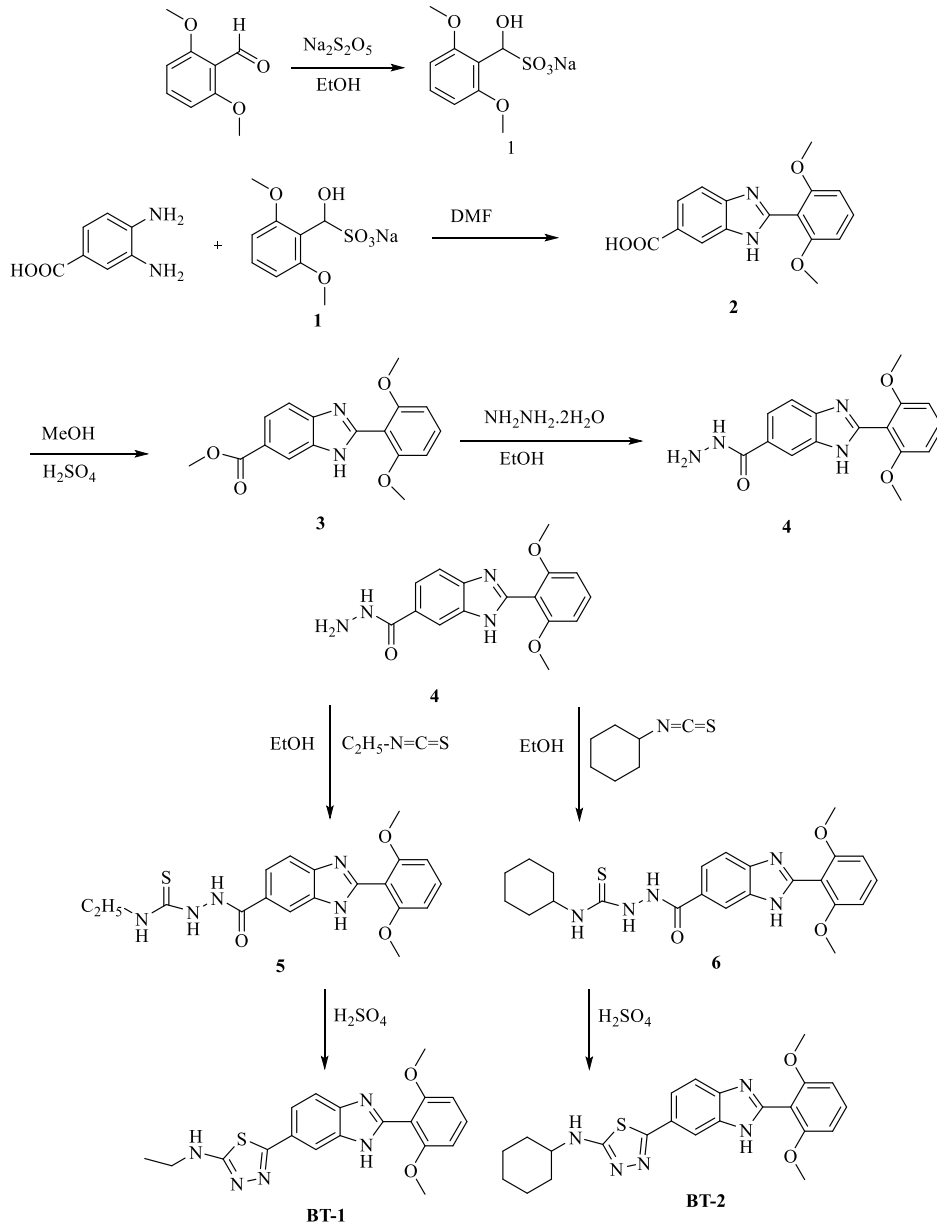
III.BULGULAR VE TARTIŞMA

5-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-etil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-1):

Verim: % 72. ¹H-NMR (300 MHz, DMSO-d₆): δ= 1.22 (3H, t, J=7.20 Hz, CH₃), 3.37 (2H, q, J=6.99 Hz, CH₂), 3.85 (3H, s, OCH₃), 4.05 (3H, s, OCH₃), 6.93 (2H, s, Aromatik CH), 7.10 (2H, s, Aromatik CH), 7.72-7.74 (2H, m, Aromatik CH). ¹³C-NMR (75 MHz, DMSO-d₆): δ=14.66, 56.41, 57.03, 57.08, 112.25, 114.18, 114.69, 115.75, 121.35, 124.13, 128.09, 133.62, 148.33, 152.52, 153.74, 155.75, 168.78. C₁₉H₁₉N₃O₂S, C, 59.82; H, 5.02; N, 18.36. Bulunan: C, 59.96; H, 5.03; N, 18.30.

5-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-sikloheksil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-2):

Verim: % 76. ¹H-NMR (300 MHz, DMSO-d₆): δ= 1.28- 1.37 (5H, m, sikloheksil CH), 1.57-1.62 (1H, m, sikloheksil CH), 1.72 (2H, s, sikloheksil CH), 2.02-2.09 (3H, m, sikloheksil CH), 3.86 (3H, s, OCH₃), 4.05 (3H, s, OCH₃), 6.92 (2H, s, Aromatik CH), 7.10 (2H, s, Aromatik CH), 7.36-7.37 (2H, m, Aromatik CH). ¹³C-NMR (75 MHz, DMSO-d₆): δ=24.67, 25.59, 26.34, 32.40, 51.88, 54.41, 111.59, 114.31, 115.59, 118.66, 121.98, 124.68, 132.14, 135.18, 136.17, 142.35, 152.67, 161.05, 167.96. C₂₃H₂₅N₃O₂S, C, 63.43; H, 5.79; N, 16.08. Bulunan: C, 63.57; H, 5.77; N, 16.12.



Şekil 2. Hedef bileşiklerinin sentezi

Hedef bileşiklerin sentezi Şekil 2’de gösterilmiştir. Benzimidazol halkasının sentezi için ilk olarak 2,6-dimetoksibenzaldehitin $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ile muamelesi sonucu benzaldehit tuzu elde edilmiş ve bu tuz o-fenilendiamin ile reaksiyona sokularak benzimidazol halkası kapatılmıştır. Daha sonra karboksilik asit fonksiyonel grubu metanol ile esterleştirme reaksiyonu gerçekleştirilir. Ester fonksiyonel grubu hidrazin hidrat ile reaksiyona sokularak hidrazit türevi elde edilmiştir. Hidrazit bileşiği etil/sikloheksil izotiyosiyanat ile reaksiyonu sonucunda tiyosemikarbazit türevleri elde edilmiştir. 2-(2-(2,6-dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbonil)-N-etilhidrazine-1-karbotiyamid (5) ve 2-(2-(2,6-dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-karbonil)-N-sikloheksilhidrazine-1-karbotiyamid (6) bileşiklerinin asit ortamda siklizasyonları sonucunda tiyadiazol türevleri elde edilmiştir.

Sentezi gerçekleştirilen orjinal bileşiklerin yapıları $^1\text{H-NMR}$, $^{13}\text{C-NMR}$ ve elemental analiz spektroskopisi yöntem verileri ile aydınlatılmıştır. Bileşiklerin yapılarında ortak olarak bulunan metoksi grupları 3.85-4.05 ppm de singlet olarak gözlenmiştir. 5-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-etil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-1) bileşiğindeki C_2H_5 süstitüentine ait protonlardan $-\text{CH}_3$ protonları 1.22 ppm de triplet olarak

gözlenmiştir. $-CH_2$ protonları 3.37 ppm de quartet şeklinde gözlenmiştir. 5-(2-(2,6-Dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6-yl)-N-sikloheksil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-2) bileşiğinde yer alan sikloheksil protonları 1.28-2.09 ppm aralığında gözlenmiştir. Bileşiklere ait aromatik protonlar ise 6.92-7.37 ppm aralığında gözlenmiştir.

BT1 ve BT2 bileşiklerinin HT-29 hücre hattındaki IC_{50} değerleri, MTT tahlili ile analiz edildi. Elde edilen değerler ile bileşiklerin standart sapmaları hesaplanmış ve **Tablo 1**'de gösterilmiştir. Bileşiklerin IC_{50} değerleri incelendiğinde $34,13 \pm 2,48 \mu M$ değeri ile BT-2 bileşiğinin referans ilaç ile kıyaslanabilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir. BT-2 bileşiğinin sağlıklı hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkisinin florourasilinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bileşiklerin yapısında yer alan tiyadiazol halkasının 5. konumunda amine bağlı sikloheksil grubunun olması aktiviteyi önemli derecede arttırmıştır.

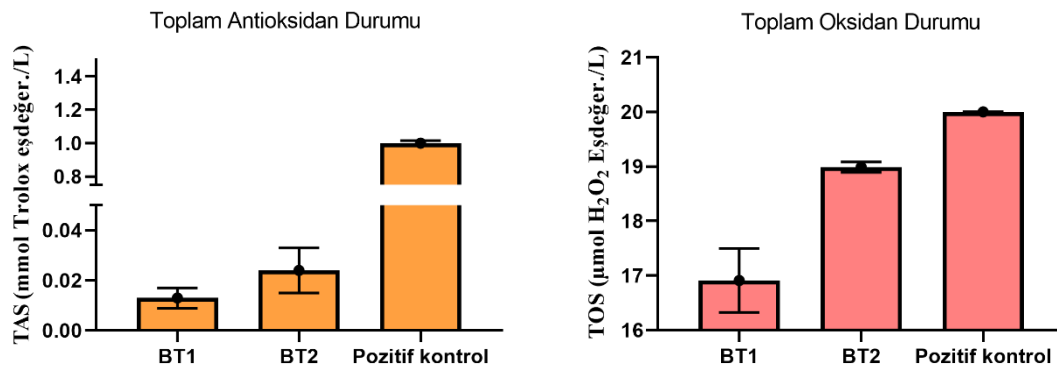
Tablo 1. BT-1, BT-2 bileşiklerinin ve fluorourasilin HT-29 ve L929'a karşı IC_{50} değerleri (μM)

Bileşik	IC_{50} (μM)	
	Ht-29	L929
BT1	$46,51 \pm 1,09$	>100
BT2	$34,13 \pm 2,48$	$88,19 \pm 1,08$
Fluorourasil	$12,84 \pm 3,66$	$73,45 \pm 2,69$

1.0 mmol Trolox Eşdeğer./L'den büyük veya buna eşit toplam antioksidan kapasite değerleri yüksek olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışma sonucu BT1 ve BT2 yapılarının antioksidan düzeylerinin yeterli düzeyde olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, antikanser özellikler göstermesi beklenen bir yapının oksidatif özelliklere sahip olması beklenmektedir. 20 $\mu mol H_2O_2$ Eşdeğer./L ve üzeri aktiviteye sahip yapıların oksidatif etkileri güçlü kabul edilmektedir. Şekil 4'de gösterildiği gibi BT1 ve BT2 oksidan özellik göstermekte olup bununla birlikte bu özelliklere rağmen istenen antikanser özelliklerini HT-29 hücre hattında gösterememiştir. Elde edilen veriler ışığında BT1 ve BT2 yapılarının farklı kanser hücre hatlarında istenilen antikanser özelliği gösterme potansiyeli olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 2. Bileşiklerin toplam antioksidan durumu (TAS) ve toplam oksidatif durum (TOS) değerleri (mmol Trolox eşdeğer./L)

	TAS (mmol Trolox eşdeğer./L)	TOS ($\mu mol H_2O_2$ eşdeğer./L)
BT1	$0,013 \pm 0,004$	$16,91 \pm 0,59$
BT2	$0,024 \pm 0,009$	$18,99 \pm 0,10$
Pozitif Kontrol	$1,000 \pm 0,015$	$20,00 \pm 0,01$



Şekil 3. Bileşiklerin toplam antioksidan durumu (TAS) ve toplam oksidatif durum (TOS) değerleri

IV.SONUÇLAR

Bu çalışmada, 5-(2-(2,6-dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-etil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-1) ve 5-(2-(2,6-dimetoksifenil)-1H-benz[d]imidazol-5(6)-il)-N-sikloheksil-1,3,4-tiyadiazol-2-amin (BT-2) bileşikleri sentezlenmiş ve yapıları aydınlatılmıştır. Bileşiklerin antikanser etkinlikleri HT-29 hücre hattı üzerinde incelenmiştir. MTT deneyine göre, BT-1 ve BT-2 maddelerinin sırasıyla IC₅₀ değerleri 46,51 ± 1,09 µM ve 34,13 ± 2,48 µM'dir. Referans ilaç fluorourasilin IC₅₀ değeri ise 12,84 ± 3,66 µM'dir. Bileşiklerden BT-2'nin referans ilaca yakın antikanser özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, bileşiklerin antioksidan özellikleri belirlenmiştir. Bileşiklerin TOS değerlerinin kontrol ilaca yakın değerde oldukları belirlenmiştir. Bu çalışmanın devamı olarak nitelendirilebilecek ileriki çalışmalarda yapı-etki ilişkilerinde bahsedilen bulgulardan faydalanarak benzer kimyasal yapılara sahip daha etkili olabileceği düşünülen yeni bileşiklerin sentezleri planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Bagi, C.M. (2002). Summary-Cancer cell metastasis session. *Journal of Musculoskeletal And Neuronal Interactions*, 2, 579-580.
- [2] Parkin, D. M. (2001). Global cancer statistics in the year 2000. *Lancet Oncology*, 2(10), 596-596.
- [3] Aydemir, N., & Bilaloğlu, R. (2003). Genotoxicity of two anticancer drugs, gemcitabine and topotecan, in mouse bone marrow in vivo. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 537(1), 43-51.
- [4] Klevens, R. M., Morrison, M. A., Nadle, J., Petit, S., Gershman, K., Ray, S., ... & Active Bacterial Core surveillance (ABCs) MRSA Investigators. (2007). Invasive methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infections in the United States. *Jama*, 298(15), 1763-1771.
- [5] El-Kalyoubi, S., Agili, F., Adel, I., & Tantawy, M. A. (2021). Novel Uracil Derivatives Depicted Potential Anticancer Agents: In Vitro, Molecular Docking, and ADME Study. *Arabian Journal of Chemistry*, 103669.
- [6] Nazir, A., Mustafa, R., & Iqbal, M. (2021). In vitro & In vivo Phytochemical Evaluation of Bioactive Components Against Hyperglycemic-induced Oxidative Stress in Streptozocin Rat Model: A histopathological investigation. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 20, 7321-7341.
- [7] Mousavi, S. M., Zarei, M., Hashemi, S. A., Babapoor, A., & Amani, A. M. (2019). A conceptual review of rhodanine: current applications of antiviral drugs, anticancer and antimicrobial activities. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 47(1), 1132-1148.
- [8] Penning, T. D., Zhu, G. D., Gandhi, V. B., Gong, J., Liu, X., Shi, Y., ... & Giranda, V. L. (2009). Discovery of the poly (ADP-ribose) polymerase (PARP) inhibitor 2-[(R)-2-methylpyrrolidin-2-yl]-1H-benzimidazole-4-carboxamide (ABT-888) for the treatment of cancer. *Journal of Medicinal Chemistry*, 52(2), 514-523.
- [9] Romero-Castro, A., León-Rivera, I., Ávila-Rojas, L. C., Navarrete-Vázquez, G., & Nieto-Rodríguez, A. (2011). Synthesis and preliminary evaluation of selected 2-aryl-5 (6)-nitro-1H-benzimidazole derivatives as potential anticancer agents. *Archives of pharmacal research*, 34(2), 181-189.
- [10] Abdel-Mohsen, H. T., Ragab, F. A., Ramla, M. M., & El Diwani, H. I. (2010). Novel benzimidazole-pyrimidine conjugates as potent antitumor agents. *European journal of medicinal chemistry*, 45(6), 2336-2344.
- [11] Demirayak, Ş., Mohsen, U. A., & Karaburun, A. Ç. (2002). Synthesis and anticancer and anti-HIV testing of some pyrazino [1, 2-a] benzimidazole derivatives. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 37(3), 255-260.
- [12] Demirayak, S., Kayagil, I., & Yurttaş, L. (2011). Microwave supported synthesis of some novel 1, 3-Diarylpyrazino [1,2-a] benzimidazole derivatives and investigation of their anticancer activities. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 46(1), 411-416.
- [13] Galal, S. A., Hegab, K. H., Hashem, A. M., & Youssef, N. S. (2010). Synthesis and antitumor activity of novel benzimidazole-5-carboxylic acid derivatives and their transition metal complexes as topoisomerase II inhibitors. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 45(12), 5685-5691.
- [14] Moriarty, E., Carr, M., Bonham, S., Carty, M. P., & Aldabbagh, F. (2010). Synthesis and toxicity towards normal and cancer cell lines of benzimidazolequinones containing fused aromatic rings and 2-aromatic ring substituents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 45(9), 3762-3769.
- [15] Yılmaz, Ü., Apohan, E., Küçükbaş, H., Yılmaz, Ö., Tatlıcı, E., Yeşilada, Ö. (2022). Synthesis a Group of 5(6)-Substituted Benzimidazole Zn(II) and Co(II) Complexes and Investigation Their Cytotoxic and Antimicrobial Activities. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 1-6.
- [16] Küçükbaş, H., Uçkun, M., Apohan, E., & Yeşilada, Ö. (2021). Cytotoxic and Antimicrobial Potential of Benzimidazole Derivatives. *Archiv Der Pharmazie*, 354 (8), 1-8.

- [17] Yılmaz, Ü., Tekin, S., Buğday, N., Yavuz, K., Küçükbay, H., & Sandal, S. (2019). Synthesis and evaluation of anticancer properties of novel benzimidazole ligand and their cobalt(II) and zinc(II) complexes against cancer cell lines A-2780 and DU-145. *Inorganica Chimica Acta*, 495, 118977.
- [18] Apohan, E., Yılmaz, Ü., Yılmaz, Ö., Serindağ, A., Küçükbay, H., Yeşilada, Ö., & Baran, Y. (2017). Synthesis, cytotoxic and antimicrobial activities of novel cobalt and zinc complexes of benzimidazole derivatives. *Journal of Organometallic Chemistry*, 828, 52-58.
- [19] Kumar, B. V. S., Vaidya, S. D., Kumar, R. V., Bhirud, S. B., & Mane, R. B. (2006). Synthesis and antibacterial activity of some novel 2-(6-fluorochroman-2-yl)-1-alkyl/acyl/aroyl-1H-benzimidazoles. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 41(5), 599-604.
- [20] Kilcigil, G.A., & Altanlar, N. (2006). Synthesis and antifungal properties of some benzimidazole derivatives. *Turkish Journal of Chemistry*, 30(2), 223-228.
- [21] Kerimov, I., Ayhan-Kilcigil, G., Can-Eke, B., Altanlar, N., & İscan, M. (2007). Synthesis, antifungal and antioxidant screening of some novel benzimidazole derivatives. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 22(6), 696-701.
- [22] Sharma, D., Narasimhan, B., Kumar, P., Judge, V., Narang, R., De Clercq, E., & Balzarini, J. (2009). Synthesis, antimicrobial and antiviral activity of substituted benzimidazoles. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 24(5), 1161-1168.
- [23] Kus, C., Ayhan-Kilcigil, G., & Eke, B. C. (2004). Synthesis and antioxidant properties of some novel benzimidazole derivatives on lipid peroxidation in the rat liver. *Archives of Pharmacal Research*, 27(2), 156-163.
- [24] Kuş, C., Ayhan-Kilcigil, G., Özbey, S., Kaynak, F. B., Kaya, M., Çoban, T., & Can-Eke, B. (2008). Synthesis and antioxidant properties of novel N-methyl-1, 3, 4-thiadiazol-2-amine and 4-methyl-2H-1,2,4-triazole-3 (4H)-thione derivatives of benzimidazole class. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 16(8), 4294-4303.
- [25] Buğday, N., Küçükbay, F., Apohan, E., Küçükbay, H., Serindağ, A., & Yeşilada, Ö. (2017). Synthesis and Evaluation of Novel Benzimidazole Conjugates Incorporating Amino Acids and Dipeptide Moieties. *Letters in Organic Chemistry*, 14, 198-206.
- [26] Shrivastava, N., Naim, M.J., Alam, M.J., Nawaz, F., Ahmed, S., & Alam, O. (2017). Benzimidazole scaffold as anticancer agent: synthetic approaches and structure– activity relationship. *Archiv der Pharmazie*, 350 (6), e201700040.
- [27] Gryshchenko, A.A., Tarnavskiy, S.S., Levchenko, K.V., Bdzholo, V.G., Volynets, G.P., Golub, A.G., Ruban, T.P., Vygranenko, K.V., Lukash, L.L., & Yarmoluk, S.M. (2016). Design, synthesis and biological evaluation of 5-amino-4-(1Hbenzoimidazol-2-yl)-phenyl-1, 2-dihydro-pyrrol-3-ones as inhibitors of protein kinase FGFR1. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 24 (9), 2053-2059.
- [28] Abdullaziz, M.A., Abdel-Mohsen, H.T., El Kerdawy, A.M., Ragab, F.A., Ali, M. M., Abu-bakr, S.M., Girgis, A.S., & El Diwani, H. I. (2017). Design, synthesis, molecular docking and cytotoxic evaluation of novel 2-furybenzimidazoles as VEGFR-2 inhibitors. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 136, 315-329.
- [29] El-Gohary, N.S., & Shaaban, M.I. (2017). Synthesis and biological evaluation of a new series of benzimidazole derivatives as antimicrobial, anti-quorum-sensing and antitumor agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 131, 255-262.
- [30] El-Gohary, N.S. & Shaaban, M.I. (2017). Synthesis, antimicrobial, anti-quorum-sensing and antitumor activities of new benzimidazole analogs. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 137, 439-449.
- [31] Chojnacki, K., Wińska, P., Skierka, K., Wielechowska, M., & Bretner, M. (2017). Synthesis, in vitro antiproliferative activity and kinase profile of new benzimidazole and benzotriazole derivatives. *Bioorganic Chemistry*, 72, 1-10.
- [32] Abdelgawad, M.A., Bakr, R.B., & Omar, H.A. (2017). Design, synthesis and biological evaluation of some novel benzothiazole/benzoxazole and/or benzimidazole derivatives incorporating a pyrazole scaffold as antiproliferative agents. *Bioorganic Chemistry*, 74, 82-90.
- [33] Çevik, U.A., Sağlık, B.N., Korkut, B., Özkay, Y., & İlgin, S. (2018). Antiproliferative, cytotoxic, and apoptotic effects of new benzimidazole derivatives bearing hydrazone moiety. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 55 (1), 138-148.

Araştırma Makalesi- Research Article

CW724R Pirinç Malzemenin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörlerin Deneysel Optimizasyonu

CW724R Experimental Optimization of Factors Affecting Surface Roughness in Brass Turning

Damla Çakmak^{1*}, Birol Akyüz²

Geliş / Received: 15/02/2022

Revize / Revised: 23/05/2022

Kabul / Accepted: 30/02/2022

ÖZ

Bu çalışmada, CW724R pirinç malzemesinin tornalamasında yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörlerin deneysel optimizasyonu incelenmiştir. Çalışmada kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme parametreleri göz önünde bulundurularak Taguchi L9 deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde S-N değerleri esas alınmıştır. Çalışmada üç farklı kesme hızı, üç farklı talaş derinliği ve üç farklı ilerleme hızı seçilmiştir. Deneyler CNC torna tezgâhında dik ve kuru kesme şartlarında ve karbür uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ölçülmüştür ve Taguchi tasarımında sinyal gürültü değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ilerlemenin yüzey pürüzlük değeri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. En yüksek yüzey kalitesi değeri (en düşük Ra) 181 m/dak kesme hızında, 0,025 talaş derinliğinde ve 0,08 mm/dev ilerleme şartlarında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- CW725R, Pirinç, Taguchi, Tornalama, Yüzey Pürüzlülüğü

ABSTRACT

In this study, experimental optimization of factors affecting surface roughness in turning of CW724R brass material was investigated. In the study, Taguchi L9 test was carried out considering cutting speed, depth of cut and feed parameters. S-N values were taken as basis in the evaluation of the test results. Three different cutting speeds, three different depths of cut, and three different feed rates were selected in the study. The experiments were carried out on a CNC lathe under vertical and dry cutting conditions and using carbide inserts. In the study, the average surface roughness (Ra) values were measured and the signal noise values were determined in the Taguchi design. According to the results obtained, it was observed that the feed rate was effective on the surface roughness value. The highest surface quality value (the lowest Ra) was obtained at 181 m/min cutting speed, 0.025 depth of cut and 0.08 mm/rev feed conditions.

Keywords- CW725R, Brass, Taguchi, Turning, Surface Roughness

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: damlatorunn@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-9523-099X>)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye
²İletişim: birol.akyuz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4462-3288>)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye

I. GİRİŞ

Pirinç, bakır elementine ve çinko ilave edilmesi ile elde edilmiş alaşımlardır [1]. Mühendislik çalışmalarında demir dışı malzemelerden en yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir [2]. Pirinç alaşımları yaygın olarak; su boruları, civatalar, pimler, vidalar, musluk vanaları ve bazı bağlantı parçalarının imalatı başta olmak üzere otomotiv, beyaz eşya ve armatür sanayinde kullanılmaktadır [3]. En yaygın olarak bilinen pirinç alaşımları CW614N (CuZn39Pb3), CW617N (CuZn40Pb2), CW612N (CuZn39Pb2) alaşımlarıdır [4]. Bazı alaşım elementleri, pirinç alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesinde ve belirlenmesinde (mekanik özellikler, sertlik, mukavemet, işlenebilirlik, korozyon vb.) önemlidir. Örneğin, alüminyum ile alaşımlandırma yapılarak, deniz suyu korozyonuna karşı dayanımı artırılabilir, %1-2 kurşun ilavesi ile işlenebilirliği artırılabilir [5,6]. Pirinç alaşımının yüksek dayanıklılık, mükemmel korozyon direnci, iyi şekillendirilebilirlik ve dövülebilirlik gibi özelliklerinin yanı sıra geri dönüştürülebilir özellikleri nedeni ile oldukça yaygın kullanım alanı bulunmaktadır [7].

CW724R (CuZn21Si3P) pirinç alaşımı birçok sektör için önemli alaşımlardan birisidir. Bu alaşımda kurşun içeriği çok düşük olduğundan (eco-brass) sağlık açısından oldukça önemli alanlarda (su armatürleri, içme suyu boruları, ocaklar, mutfak kullanım araç-gereçleri, müzik aletleri yapımı, kilit mekanizmaları, otomotiv bağlantı elemanları vb.) tercih edilmektedir. CW724R, yüksek yüke dayanabilen ve iyi işlenebilirlik ve iyi korozyon direnci gösteren özel bir pirinç alaşımıdır. Bu alaşım işleme ve dövme işlemi için ve içme suyu ile temas eden ürünler için, REACH ve RoHS II direktiflerine uygundur [8]. Fakat bu alaşım içerisinde maksimum % 0,09 oranında kurşun içerdiğinden işlenebilirliği kurşun içeren pirinçlere nazaran daha zordur [5].

Birçok alanda kullanım alanı bulan pirinç alaşımları ile ilgili çeşitli işlenebilirlik araştırmaları yapılmaktadır. İşlenebilirlik üzerine yapılan deneysel çalışmalarda az sayıda numune ile ve kısa sürede, en uygun değer şartlarının ve en uygun işleme parametrelerinin belirlenmesinde Taguchi metodu yaygın olarak kullanılmaktadır [9-12]. Taguchi metodu ile deney sayısı azaltılarak zamandan tasarruf edilerek üretim ve test maliyetlerinin düşürülmesi sağlanmaktadır. Taguchi metodu kullanılarak optimum işleme şartlarının belirlendiği talaşlı imalat ile ilgili çok sayıda akademik çalışma bulunmaktadır [12-18].

Yadu Krishnan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, pirinç alaşımlarının tormalamasında Taguchi yöntemi kullanılarak, daha yüksek kesme hızında daha düşük kesme kuvveti elde edilmiş, bununla birlikte yüksek yüzey kalitesi sağlamıştır. Tormalama sırasında kesme derinliğinin artması ile yüzey kalitesi düşmüştür. Minimum kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için optimize edilmiş değerler için kesme hızı (s) 900 rpm, kesme derinliği (d) 0,15 mm ve ilerleme hızı (f) 0,3 için 9,4 kgf, 1,9 µm ve 59 °C'dir [19]. Singh'in yapmış olduğu çalışmada, Pirinç 63/37(C27400) malzemesinin farklı kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametreleri incelenmiş ve kesme hızının Yüzey pürüzlülüğü üzerinde %65,81 ile en çok etkileyen faktör olduğu tespit edilmiştir. %31,38 ile ilerleme ve %0,95 ile kesme derinliği kesme hızını izlemektedir [20]. M. Venkata Ramanaa ve arkadaşlarının Demir bazlı Nikel A286 alaşımının kuru tormalamada yüzey pürüzlülüğü için farklı kesme hızı ilerleme ve kesme derinliği parametreleri altında Taguchi yöntemi kullanılarak yapmış olduğu bir çalışmada PVD kaplamalı takım, kaplamasız takıma göre daha düşük işleme koşullarında daha az yüzey pürüzlülüğü ve orta işleme koşullarında daha az takım aşınma oranı sergilemiştir [21]. Mamedov'un kalıp çeliğinden imal edilen parçaların üç farklı ilerleme hızı, İş mili devri, Kesme derinliği ve Radyal dalma oranı altında Taguchi kullanarak yaptığı çalışmasında yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen parametrenin radyal dalma oranı parametresi olduğu görülmüştür. En iyi yüzey kalitesini veren ilerleme hızı 16 mm/dak, iş mili devri 200 devir/dak, kesme derinliği 0.35 mm ve radyal dalma oranı %50 değerlerinde elde edilmiştir [22]. Yaka'nın Taguchi Yöntemi ile talaş artıklarını döküm yöntemi geri dönüştürülmüş ve normal alüminyum 5000 alaşımı üzerinde yaptığı çalışmasında yüzey pürüzlülüğüne en çok ilerleme parametresi etkilemiştir. Tüm deneylerde kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliğinin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü de artmıştır [23]. Çifti ve Gökçenin gerçekleştirmiş olduğu bir diğer çalışmada üç farklı molibden alaşımı olan saf molibden, TZM ve MHC malzemeleri üzerinde dört farklı kesici takım ilerleme ve kesme hızı için Taguchi metodu kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. İlerleme miktarının artması ile kesme kuvvetleri de artmıştır Kesme hızının artması ile 3 malzeme üzerinde yapılan denemelerde yüzey pürüzlülük değerleri azalmıştır fakat ilerleme miktarının kayda değer bir etkisi görülmemiştir [24]. Gürbüz ve Badayın gerçekleştirmiş olduğu bir çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliği kullanılmıştır ve en düşük yüzey pürüzlülük değerini 18 bar ayna basıncı ve 5 bar punta basıncında elde etmişlerdir [25]. Debnath ve arkadaşlarının yapmış olduğu farklı bir çalışmada Taguchi yöntemi ile gerçekleştirilen tormalama işlemi ile kesme sıvısı şartlarının ve kesme parametrelerinin etkisinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. %34,3 ile ilerleme hızı yüzey pürüzlülüğü için en etkili faktör olmuştur. Takım aşınmasına en

fazla %43,1 ile kesme hızı takım aşınmasına en fazla katkı sağlamıştır. Kesme sıvısı %33,1 ile ayrıca yüzey pürüzlülüğüne ve %13,7 ile takım aşınmasına önemli bir katkı sağlamıştır [26]. Bir diğer çalışmada Şeremet ve Kam tormalama işleminde parametrelerin AISI 4140 çeliği üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ile ilgili yaptıkları literatür araştırması sonucu genel bir değerlendirme yaparak deneylerde kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin en etkili parametreler olduğunu tespit etmişlerdir [27].

Literatür ışığında bu çalışmada seçilen parametre değerlerine en uygun dizinin Taguchi L9 ortogonal dizini olduğu belirlenmiştir [28-29]. Bu deneysel çalışmada, Taguchi L9 Ortogonal dizini kullanılarak kurşunsuz bir pirinç olan CW724R (CuZn21Si3P) pirinç alaşımının tormalama işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak için kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme değerleri için optimizasyon işlemi yapılmıştır. Çalışmada en uygun işleme şartlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

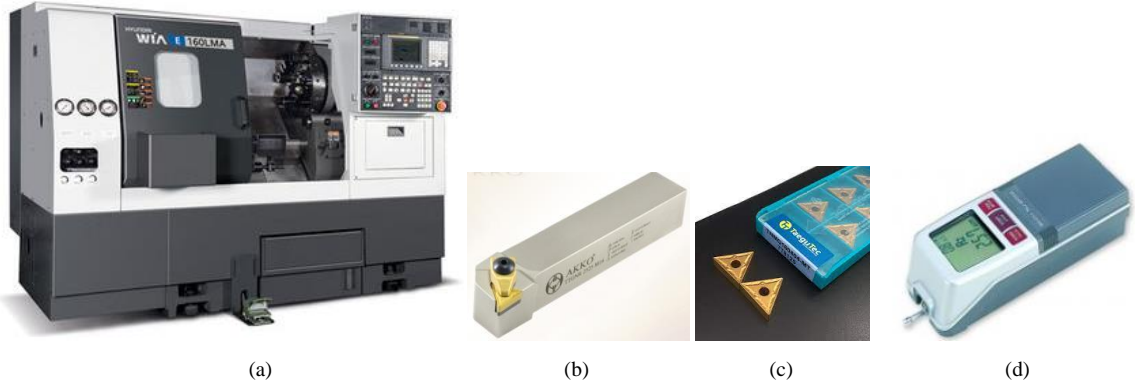
II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneysel çalışmada, CW724R (CuZn21Si3P) kurşunsuz pirinç alaşımı kullanılmıştır. Deneyler, CNC torna tezgâhında dik ve kuru işleme koşullarında (soğutucu kullanılmadan) üç farklı kesme hızında, kesme derinliğinde ve ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Buna göre deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğüne etki eden kesme parametreleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan deney numuneleri Ø23 x 50 mm ölçülerinde imal edilmiştir ve işleme boyu 30 mm olarak alınmıştır. Deneyde kullanılan CW724R pirinç alaşımının kimyasal bileşimi Tablo.1 de görülmektedir.

Tablo 1. CW724R Pirinç Alaşımının Kimyasal Bileşimi (%)

Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	P	Ni	Al	Si	Ag
75,69	21,19	0,089	0,057	0,055	0,054	0,007	<0,001	2,839	0,0026

Deneyler, Hyundai WIA E160LC CNC Torna Tezgâhında yapılmıştır (Şekil 1a). Deneylerde TaeguTec TNMG160404 R VF TiCN-Al₂O₃-TiN karbür uçlar ve AKKO TTG NR 2020 K16 takım tutucu kullanılmıştır (Şekil 1b-c). Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Mitutoyo SurfTest SJ-201P Yüzey Pürüzlülük ölçüm cihazı (Şekil 1d) kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) her numunede en az beş ölçüm yapılarak elde edilen bu değerlerin ortalaması alınarak (Ra) belirlenmiştir. Minitab kullanılarak elde edilen sinyal gürültü (S-N) tablosundan elde edilen yeni parametre değerlerine göre doğrulama deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada seçilen işleme parametreleri aşağıda görülmektedir (Tablo 2).



Şekil 1. Deneylerde kullanılan CNC Torna Tezgâhı(a), Takım Tutucu(b), Kesici Uçlar(c) ve Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı (d)

Tablo 2. İşleme Parametreleri

Sembol	Kontrol Faktörleri	Birim	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
X	Kesme Hızı	m/dak	72	181	289
Y	İlerleme	mm/dev	0,08	0,16	0,24
Z	Kesme derinliği	mm	0,25	0,50	0,75

Tablo 2’de tüm kontrol faktörlerinin üç seviyesi olduğu yapılan araştırmalar göz önünde bulundurularak bu deneysel çalışmada Taguchi L9 Ortogonal dizini kullanılmıştır [28, 29]. Tablo 3’te Taguchi L9 Ortogonal dizilimi verilmiştir.

Tablo 3.Taguchi L9 Ortogonal Dizilimi

Deney No	X	Y	Z
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu deneysel çalışmada, CW724R kurşunsuz pirinç alaşımının farklı işleme parametrelerine göre (üç farklı kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızında) tornalanması ile oluşan yüzey pürüzlük değerleri (Ra) elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, ilerleme hızı artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan her bir kesme hızı parametresinde en düşük ilerleme hızında (0,08 mm/dev) en düşük yüzey pürüzlük değeri (Ra) (yüksek yüzey kalitesi) elde edilmiştir (Tablo 4). Deneysel çalışmada kullanılan işleme parametreleri Taguchi L9 dizilimine yerleştirilmiş ayrıca elde edilen Ra değerleri de bu tabloda görülmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Taguchi L9 Ortogonal diziliminde işleme parametreleri ve Ra değerlerinin gösterimi

Deney No	X Kesme Hızı (m/dak)	Y İlerleme (mm/dev)	Z Kesme derinliği (mm)	Ra Yüzey pürüzlüğü (µm)
1	72	0,08	0,25	0,58
2	72	0,16	0,50	2,18
3	72	0,24	0,75	7,03
4	181	0,08	0,50	0,64
5	181	0,16	0,75	1,83
6	181	0,24	0,25	3,53
7	289	0,08	0,75	0,76
8	289	0,16	0,25	2,12
9	289	0,24	0,50	3,82

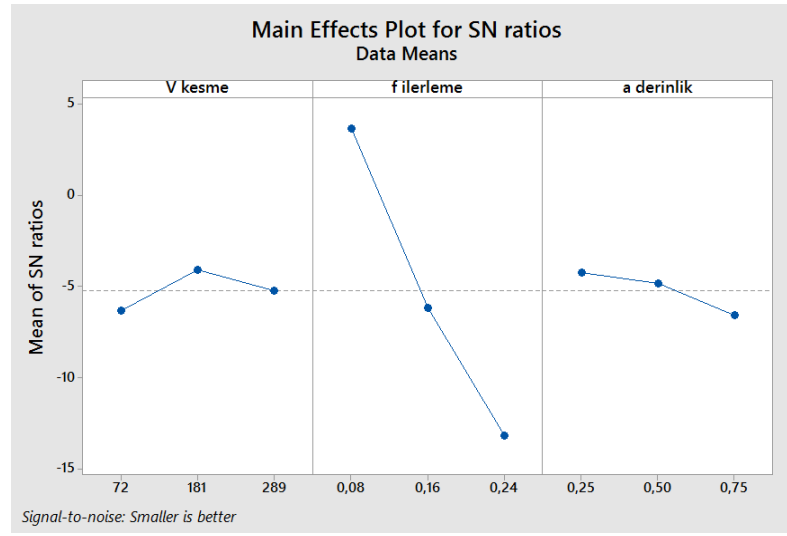
DeneySEL çalışmada Taguchi L9'a göre elde edilen S-N (Sinyal – Gürültü) tablosu, Tablo 5.'de görülmektedir. S-N tablosunda çıkan en yüksek değerler, o işleme parametresi için en uygun seviyeyi göstermektedir [30].

En yüksek S-N değerleri incelendiğinde; kesme hızı değeri 181 m/dak, ilerleme değeri 0.08 mm/dev ve kesme derinliği 0.25 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. S-N (Signal-Noise) tablosu

Seviyeler	X Kesme Hızı (m/dak)	Y İlerleme (mm/dev)	Z Kesme derinliği (mm)
1	-6,326	3,664	-4,250
2	-4,109	-6,182	-4,845
3	-5,261	-13,179	-6,601
Delta	2,216	16,842	2,351
Doğrulama değerleri	3	1	1

DeneySEL çalışmada elde edilen S-N grafiği Şekil 2'de görülmektedir. İşleme parametrelerinin en uygun (en yüksek) değerlerini gösteren S-N grafiği verilmiştir [31-32]. CW724R pirinç malzemesi için yapılan deneyler sonucunda ilerleme parametreleri düştükçe sinyal gürültü değeri artmıştır. Bu yapılan bu deneye göre ilerleme diğer parametrelere nazaran işlenebilirlikte daha etkili olmuştur.



Şekil 2. S-N (Signal-Noise) grafiği

Tablo 5. ve Şekil 2. bize Taguchi L9 diziliminde yer almayan ve bu sebeple deneyi yapılmamış olan farklı bir işleme parametresi dizilimi vermektedir. Bu parametrelere uygun olarak deneyi gerçekleştirdiğimizde en iyi yüzey değerini elde edebileceğimizi ifade etmektedir. [30-32]

Tablo 5 de S-N tablosundan doğrulama değerleri olarak belirtilen (2,1,1) değerleri ile (181 m/dak kesme hızı, 0.08 mm/dev ilerleme ve 0.25 mm kesme derinliği) aynı işleme şartlarında parça işlenmiştir. Yapılan doğrulama deneyleri sonucunda 2.1.1 deneyinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü Ra değeri 0.52 μm çıkmıştır. Böylece Taguchi metodu ile gerçekleştirmiş olan, L9 dizilimindeki deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerinden daha düşük bir Ra değeri elde edilmiştir.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada; CW724R pirinç alaşımının tornalamasında; kesme hızı, kesme derinliği ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Taguchi L9 ortogonal dizini kullanılarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri optimizasyon çalışması gerçekleştirilerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

CW724R kurşunsuz pirinç malzemesi üç farklı işleme parametrelerine göre elde edilen Ra yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri de artmıştır. Bütün kesme hızları için en düşük ilerleme hızında (0,08 mm/dev), en düşük yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir.

Taguchi metodu ile yüzey pürüzlülüğü üzerine çalışan Yaka [23] ile Çifçi ve Gökçe [24] ve Debnath ve arkadaşlarının [26] yapmış olduğu çalışmada benzer ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. L9 deneyleri sonucunda S-N (sinyal-gürültü) grafiğini/tablosu incelendiğinde düşük ilerleme ve düşük kesme derinliği ile daha iyi yüzeyler elde edilebileceği ve özellikle ilerleme parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür [23,24,26].

Kesme hızı 181 m/dak, ilerleme değeri, 0.08 mm/dev ve kesme derinliği 0.25 mm parametreleri altında üretilen numunedan alınmış olan ve 5 ölçüm ortalamasına göre Ra yüzey pürüzlülük ölçüm değeri 0,52 μm elde edilmiştir. Bu değer L9 diziliminde görülen; en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri olan 1 numaralı deney numunesi değerinden daha düşük değer elde edilmiştir ve yapılan optimizasyon çalışması başarılı olmuştur. Taguchi metodunun elde edilen sonuçlar neticesinde, talaşlı imalat uygulama ve araştırmalarında başarılı bir deney tasarımı olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Birgören, B., & Sakallı, Ü.S. (2021). Kalite ve maliyet perspektiflerinden pirinç alaşımı harmanlama problemi: Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 36:1 433-445.

- [2] Kalaycıoğlu, H., & Yalçınkaya, S. (2020). *Mühendislik Alanında Teknolojik Gelişmeler*. Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları., İstanbul, 714-739.
- [3] Sapaz, M., Özbek, O., & Kara, F. (2021). CW511L Pirinç Alaşımının İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü Ve Takım Aşınmasının Deneysel Olarak İncelenmesi. *II. International Halich Congress On Multidisciplinary Scientific Research 15-16 Ağustos*, İstanbul, 525-533.
- [4] Duzman, M.E. (2010). *Kurşunlu Pirinçlerin Sürekli Dökümünde Döküm Özelliklerinin İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Atay, G. (2021). *Farklı Koşullarda Dövülmüş Kurşunsuz Pirinç Malzemelerin İşlenebilirliğinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Sarbak metal (2022). *Sarı metal Pirinç*, <https://sarbak.com.tr/dokuman/1-kitap-sari-metal-pirinc.pdf> (15.06.2022).
- [7] Catalgöl, Z., & Geçmen, İ. (2021). Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği ile Birleştirilen Pirinç (CuZn63) Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* 8(1), 533-543.
- [8] Sarbak metal (2022) *Technical data sheet CW724R CuZn21Si3P Ecobrass*, <https://sarbak.com.tr/dokuman/alasimlar/en/ekobrass.pdf> (15.06.2022).
- [9] Gupta, M.K., & Sood, P.K. (2016). Optimizing Multi Characterstics in Machining of AISI 4340 Steel Using Taguchi's Approach and Utility Concept. *Journal of The Institution of Engineers Series C*. India 97, 63-69.
- [10] Özel, T., & Karpaz, Y. (2005). Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 45, 467-479.
- [11] Kopac, J., Bahor, M., & Soković, M. (2002). Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold pre-formed steel workpieces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 42, 707-716.
- [12] Patel, R., Patel, S., Patel, P., Parmar, P., & Vohra, J. (2021). Optimization of machining parameters for EN8D carbon steel by Taguchi's orthogonal array experiments in CNC turning. *Materials Today: Proceedings*. 44, 2325-2329.
- [13] Soorya Prakash, K., Gopal, P.M., S. & Karthik, S. (2020). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis in turning of Rock dust reinforced Aluminum MMC. *Measurement*. 157, 107664.
- [14] Tzeng, C.J., Lin, Y.H., Yang, Y.K., & Jeng, M.C. (2009). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of material sprocessing technology*. 209, 2753-2759.
- [15] Göloğlu C. & Arslan Y. (2009). "Zig zag machining surface roughness modelling using evolutionary approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20, 203-210.
- [16] Kasman Ş. (2011). Lazerle derin oyma tekniğinde EN 7075 alüminyum alaşımı için işlem parametrelerinin etkilerinin Taguchi methodu kullanılarak incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2), 41-54.
- [17] Pınar A. M., Fırat K., Pınar A. F. & Filiz S. (2012). Kanal torna kaleminin yüzey pürüzlülük performansının optimizasyonu", 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 240-250.
- [18] Günay M., & Yücel E. (2013) Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. *Measurement*, 46, 913-919.
- [19] Yadu Krishnan, J., Poorna Sundar, S., Karthikeyan, L., Veera Ajay, C., & Manisekar, K. (2021). Experimental optimization of cutting parameters in turning of brassalloy using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings* 42, 377-382.
- [20] Singh, R. (2021). Application of Taguchi method to optimize CNC parameters on brass63/37(C27400). *Materials Today: Proceedings* 45, 4424-4430.
- [21] Venkata Ramana, M., Krishna Mohana Rao, G., Sagar, B., Kumar Panthangi, R., & Ravi Kumar, R. (2021). Optimization of surface roughness and tool wear in sustainable dry turning of Iron based Nickel A286 alloy using Taguchi's method. *Cleaner Engineering and Technology*. 2, 100034.
- [22] Mamedov, A. (2021). Taguchi Yöntemleri Kullanılarak Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Araştırılması. *Mühendis ve Makina*. 62, 321-331.
- [23] Yaka, H. (2021). Tornalama Sonrası Çıkan Talaşlardan Elde Edilen Alüminyum 5000 Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Yöntemi ile Analizi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11, 464-473.
- [24] Çiftçi, İ., & Gökçe, H. (2019). Molibden alaşımlarının işlenmesinde kesici takım ve kesme parametrelerinin Taguchi Metodu ile optimizasyonu, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34.1, 201-213.

- [25] Gürbüz, H., & Baday, Ş. (2019). CNC Torna Tezgâhlarında Ayna ve Punta Basıncının Yüzey Pürüzlülüğü ve Titreşim Üzerine Etkisinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu, *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi* 6 (2), 119-134.
- [26] Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2016). Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method. *Measurement*, 78, 111-119.
- [27] Şeremet, M., & Kam, M. (2019). AISI 4140 İslah Çeliğinin Tornalama İşleminde Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğü Ve Takım Aşınmasına Etkisi Üzerine Bir Değerlendirme, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*. 3-5 Kasım, Kocaeli, 2202-2209.
- [28] Serencam, H., & Uçurum, M. (2018). Taguchi Deney Tasarımı Kullanılarak Uçucu Kül İle Ni (II) Gideriminde Bazı Adsorpsiyon Parametrelerinin Etkinliğinin İrdelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1, 336-344.
- [29] Baynal, K., & Gencil, İ. (2015). Taguchi Yönteminin Gıda Sektöründe Çok Yanıtlı Problemin Eniyilemesinde Uygulanması. *SAÜ Fen Bil Dergisi*, 19. Cilt, 1. Sayı, s. 107-121.
- [30] Arıcı, E., Çelik, E., & Keleştemur, O. (2021). An analysis of the engineering properties of mortars containing corn cob ash and polypropylene fiber using the Taguchi and Taguchi-based Grey Relational Analysis methods. *Case Studies in Construction Materials*. 15 (2021) e00652.
- [31] Kuntoğlu, M., Aslan, A., & Sağlam, H. (2020). AISI 5140 Çeliğinin Tornalanması Esnasında Yaklaşma Açısı ve Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi ISSN: 1302-0900*.
- [32] Mia, M., Dey, P. R., Hossain, M. S., Arafat, M. T., Asaduzzaman, M., Ullah, M. S., & Zobaer, S. M. T. (2019). Taguchi S/N based optimization of machining parameters for surface roughness, tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition, *Measurement*, 122:380-391.

Araştırma Makalesi - Research Article

Görece Narin Betonarme Perde Duvarlarda Mevcut Beton Malzeme Modellerinin Etkilerinin İrdelenmesi

Investigating the Effects of Existing Concrete Material Models on Relatively Slender Reinforced Concrete Walls

Emrah Kılıç¹, Muhammet Fethi Güllü^{2*}

Geliş / Received: 20/01/2022

Revize / Revised: 06/10/2022

Kabul / Accepted: 31/10/2022

ÖZ

Betonarme elemanların doğrusal olmayan analizleri gelişen teknoloji ve mevcut yönetmeliklerin geliştirilerek bu teknolojiyi kullanması ile birlikte günümüzde önem kazanmaktadır. Betonarme yapıların doğru bir şekilde modellenmesi ve doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi için uygun beton ve donatı malzeme modellerine ihtiyaç vardır. Literatürde bu konuda birçok çalışma mevcuttur. Özellikle yüksek bina tasarımında betonarme perde duvarların yayılı plastisite teorisine göre modellenmesi ile birlikte kullanılan beton ve donatı modelinin doğruluğunun önemi artmıştır. Bu çalışma kapsamında betonarme elemanlar için geliştirilmiş olan ve betonun doğrusal olmayan davranışını öngören üç farklı beton malzeme modelleri kullanılarak görece narin betonarme perde duvarların doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Bu malzeme modellerinin teorilerine uygun olarak farklı beton sınıflarının (örn: C30 ve C40) parabolik eğrileri bahsi geçen modeller kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen beton parabolik malzeme modelleri, Perform 3D yapısal analiz programında tanımlanmak için doğrusal parçacıklardan oluşan eğriler şeklinde basitleştirilmiştir. Paket programda beton malzemeleri, beton sınıfları ve tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları değiştirilerek görece narin betonarme perde duvarların analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları birbiriyle ve deneysel sonuçlarla kıyaslanarak değerlendirilmiş ve farklı malzeme modellerinin boy/en oranı 3.0 olan betonarme perde duvarların doğrusal olmayan analiz sonuçlarında birbiriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak boy/en oranı 2.0 ve 1.5 olan betonarme perde duvarların doğrusal olmayan analizlerinde beton modeli seçiminin ve farklı beton dayanımları kullanılmasının sonuçları etkilediği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Beton Malzeme Modelleri, Betonarme Perde Duvar, Tersinir-Tekrarlanır Yükleme*

ABSTRACT

Nonlinear analysis of reinforced concrete elements becomes significant in nowadays with the developing technology and current design codes using this technology. Precise concrete and reinforcement material models are required for accurate modeling of reinforced concrete structures and performing nonlinear analysis. There are many studies on this subject in the literature. Especially in high-rise building design, the importance of the accuracy of the concrete and reinforcing bar model used with the modeling of reinforced concrete shear walls according to the distributed plasticity theory has increased. In this study, the nonlinear behavior of relatively slender reinforced concrete shear walls was investigated by using three different concrete models that predict the nonlinear behavior of concrete material developed for reinforced concrete elements. In accordance with the theories of these material

¹İletişim: emrahkili3463@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0914-6925>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Harran Üniversitesi, Osmanbey Yerleşkesi, Şanlıurfa, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişimi: fethigullu@harran.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6064-4719>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Harran Üniversitesi, Osmanbey Yerleşkesi, Şanlıurfa, Türkiye

models, parabolic curves of different concrete classes (e.g. C30 and C40) were obtained using the aforementioned models. The obtained concrete parabolic material models were simplified as curves consisting of linear branches to be defined in the Perform 3D structural analysis program. In the package program, the relatively slender reinforced concrete shear walls were analyzed by changing concrete materials, concrete classes and reduction coefficients due to strain under cyclic loads. The analysis results were scrutinized by comparing with each other and experimental results, and it was determined that the different material models were in agreement with each other in the nonlinear analysis results of reinforced concrete wall with an aspect ratio of 3.0. However, in the nonlinear analysis of reinforced concrete shear walls with aspect ratios of 2.0 and 1.5, it was revealed that the selection of concrete material models and the use of different concrete strengths affected the results.

Keywords- Concrete Material Models, Reinforced Concrete Walls, Reversed-Cyclic Loading

I. GİRİŞ

Betonun basınç dayanımı, yapısında kullanılan malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri, üretim ve taşıma esnasından yapılan hatalar ile küp ve bakımındaki eksiklikler gibi birçok değişkenden etkilenmektedir. Bu değişkenlere bağlı parametrelerden etkilenen beton malzemesinin davranışını kesin olarak belirlemek oldukça zor bir durumdur. Her ne kadar günümüzde betonun davranışını kesin olarak ifade etmek mümkün olmasa da betonarme yapıların davranışının ifade edilebilmesi ve uygulamada gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için betonun davranışının yaklaşık olarak ifade edilebilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle betonun malzeme davranışı birçok çalışmaya konu olmuştur. Sheikh-Üzümeri Modeli [1], Saatçioğlu-Razvi Modeli [2], Hognestad Modeli [3], Geliştirilmiş Kent-Park Modeli [4], Roy-Sozen Modeli [5], Sargin-Handa Modeli [6], Mandevd. [7] modeli ve benzeri birçok beton gerilme-şekil değiştirme teorik modelleri geliştirilmiş ve betonun davranışı ifade edilmeye çalışılmıştır. Betonun karmaşık yapısı ve çok sayıda parametreye bağlı olarak davranışının değişmesi nedeniyle bazı değişkenler göz ardı edilmiş ve modellerin geliştirilmesinde birtakım kabullere gidilmiştir. Yapılan kabullere bağlı olarak elde edilen modeller birbirlerine kıyasla farklı avantaj ve dezavantajlar barındırmakla birlikte, bazı modellerde daha karmaşık ifadeler yer alabilmektedir. Bu durum geliştirilen modellerin yapı elemanlarının davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır.

Öncelikli olarak Hognestad [3] tarafından yapılan çalışmada eksenel yük ve bileşik eğilme etkisindeki betonarme elemanların davranışı irdelenmiştir. Eksenel yüklü tüm numunelerde göçme yaklaşık 0.0038 birim şekil değiştirme oranında gerçekleşmiştir. Kesit boyunca oldukça doğrusal bir şekil değiştirme dağılımının, en küçük yüklerden kırılmaya kadar var olduğu gözlemlenmiştir. Mander vd. [7], enine sargılı veya sargısız betonarme elemanların tek eksenli basınç altındaki davranışını ifade eden bir beton modeli geliştirmiştir. Geliştirilen beton modelinden tekrarlı yükler ve yükleme hızı dikkate alınarak gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilebilmektedir. Sargı donatısı konfigürasyonuna bağlı olarak yanal basınç değeri hesaplanmaktadır. Sargılı numunelerde yanal basınçtan yararlanarak enine donatının gerilme enerjisi hesaplanmaktadır. Enerji korunumu kanunundan yararlanarak sargı donatısının koptuğu andaki çekirdek betonu basınç değeri elde edilmiştir. Saatçioğlu ve Razvi [2], sargılı beton davranışını ifade eden, ilk kısmı parabolik ve ikinci kısmı azalan bir doğru ile temsil edilen beton modeli geliştirmiştir. Betonarme elemanlarda yaygın olarak tercih edilen sargı konfigürasyonlarına göre oluşan yanal basınç değerleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmada sargı etkisinden dolayı oluşan yanal basınç için ortalama bir değer alınarak düzgün yayılı yanal basınç değeri hesaplanmaktadır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde azalan kısım, eğri tepe noktasından ve en yüksek gerilme değerinin %85'ine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerinden geçen bir doğru ile ifade edilmektedir. Bu doğru, en yüksek gerilmenin %20 değerine karşılık gelen gerilme seviyesine kadar düştükten sonra sabit kalmaktadır. Razvi ve Saatçioğlu [8], sargılı yüksek dayanımlı beton için analitik bir model önermiştir. Normal dayanımlı beton için Saatçioğlu ve Razvi [2] tarafından önerilen önceki model geliştirilmiştir. Model, 30 MPa normal dayanımlı betondan 130 MPa yüksek dayanımlı betona kadar olan beton sınıflarını kapsamaktadır ve sargı etkisinin tüm ilgili parametrelerini içermektedir. Model deneysel verilerle karşılaştırılarak kapsamlı bir şekilde doğrulanmıştır ve deneysel olarak kurulan gerilme-şekil değiştirme ilişkileriyle makul korelasyonlar göstermektedir. Cusson ve Paultre [9], sargılı yüksek dayanımlı beton için bir gerilme-şekil değiştirme modeli geliştirmiş ve eksenel yükleme altında test edilen 50 büyük ölçekli yüksek dayanımlı betonarme kolondan elde edilen test sonuçlarına göre kalibre etmiştir. Beton basınç dayanımı, etriye akma dayanımı, etriye konfigürasyonu, enine donatı oranı, etriye aralığı ve boyuna donatı oranının etkileri önerilen gerilme-şekil değiştirme modelinde dikkate alınmıştır. Bu modelde sargılı betonun dayanım ve sünekliğinin

belirlenmesi; sarılmış betonun maksimum dayanımında enine donatıdaki gerilme ve etkin bir şekilde sarılmış beton alanına bağlı olan, etkin sargı basıncının hesaplanmasına dayanır.

Sönmez ve Dönmez [10], OpenSees açık kaynak yazılımı bünyesinde bulunan beton malzeme modellerinin betonarme elemanların davranışını ne düzeyde doğru temsil ettiğini araştırmıştır. Farklı malzeme modellerinin sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisinin olmamasına rağmen, bu malzeme modellerinin analiz süreleri açısından farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bedirhanoglu ve İlki [11], farklı sargılı beton modelleri kullanılarak fiber eleman yaklaşımı ile analitik moment-eğrilik ilişkileri elde etmiştir. Daha sonra analitik sonuçlar deneysel moment-eğrilik ilişkileri ile karşılaştırılmış ve dikkate alınan tüm sargılı beton modelleri için analitik ve deneysel moment-eğrilik ilişkilerinin makul bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Özmen vd. [12], Mander vd. [7], geliştirilmiş Kent-Park [4] ve Saatcioğlu-Ravzi [2] beton teorilerinin yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkisini irdelemiştir. Değişik beton sınıfları ve donatı aralıkları dikkate alınarak dört katlı yapılar üzerinde doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiş ve malzeme teorilerinin sistem ve yapı elemanları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Uzbaş [13], betonun davranışı için geliştirilen malzeme teorileri ve bu teorilerde göz önüne alınan parametreleri araştırmıştır. Bu teorilerin birbirinden farklı olumlu ve olumsuz özellikler barındırdıklarını tespit ederek sonuçları karşılaştırmıştır. Araştırma sonucunda, betonun davranışını güvenilir şekilde temsil edecek modelin oluşturulmasında gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırmanın önemine değinilmektedir. Işık vd. [14], Seismo Struct yazılımını kullanarak farklı beton ve donatı modellerinin birbirleri ile uyumunu ve bu modeller arasındaki farkları irdelemektedir. Her model için farklı doğrultularda ayrı ayrı taban kesme kuvveti-deplasman grafikleri elde edilerek bu modellerin birbirine yakınlığı tespit edilmiştir. Foroughi ve Yüksel[15] tarafından malzeme modeli, eksenel yük, boyuna donatı oranı, enine donatı oranı ve enine donatı aralığının betonarme kesitlerin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Betonarme elemanların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışlarını dikkate alan SAP2000 programı kullanılarak moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilip, süneklik ve mukavemet yönünden değerlendirilmiştir. Foroughi vd. [16] tarafından Mandervd. [7] beton modeline göre beton basınç dayanımı hesaplanarak betonarme kolon elemanlarının gerilme-şekil değiştirme ilişkisi irdelenmiştir. Değişik çap ve aralıkta enine donatı kullanılarak kare kolon elemanlarda gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiş ve enine donatının bu elemanlar üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Enine donatının çap ve sıklığı arttıkça çekirdek bölgesinin basınç dayanımı ve yanal basıncın arttığı gözlemlenmiştir.

Yapıların kullanım ömrü boyunca maruz kalacakları yükleri güvenle taşıyacak en ekonomik şekilde imal edilmesi inşaat mühendisliğinin temel amaçlarından biridir. Bu nedenle yapıların maruz kalacakları yüklere karşı doğru bir şekilde temsil edilmesi önem kazanmaktadır. Özellikle, yapılarda sıkça tercih edilen betonun heterojen yapıda olması ve üretiminde yapılan hatalardan dolayı davranışının belirlenmesi son derece zor bir durumdur. Bu nedenle betonun davranışını anlamak için birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve bu davranışı temsil eden birçok malzeme teorisi geliştirilmiştir. Ancak betonun karakteristik özellikleri, betonun üretiminde kullanılan agreganın mekanik ve kimyasal özelliği, üretim ve taşıma esnasında yapılan hatalar gibi birçok faktöre bağlı olması nedeniyle geliştirilen bu malzeme modellerinde bir takım kabullere gidilmektedir. Yapılan kabullerin farklılık göstermesi nedeniyle bu teoriler arasında farklılıkların olması betonarme eleman simülasyonu üzerine farklılıklar gösterecektir. Bu çalışma kapsamında, Hognestad [3], Mandervd. [7] ve Saatcioğlu-Ravzi [2] tarafından geliştirilen beton modelleri betonarme perde duvar numuneleri üzerine Perform 3D [17] paket programı kullanılarak uygulanacak ve bu farklı beton modellerinin beton sınıfları ile tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları parametrik olarak değiştirilerek sonuçlar üzerindeki etkileri irdelenecektir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Malzeme Modelleri

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan ve Hognestad [3], Mandervd. [7] ve Saatcioğlu-Ravzi [2] tarafından geliştirilen beton malzeme modelleri hakkında kısa bilgi sunulmaktadır.

Hognestad [3] tarafından sargısız beton için geliştirilen model farklı iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım standart silindirik basınç gerilmesi değerinin 0.85 katına kadar artan parabolik bir eğriyle ifade edilmiştir ve ikinci kısım hesaplanan eğrinin maksimum değerinin %85 ine kadar azalan bir doğru ile ifade edilmiştir (Şekil 1). Hognestad [3] yaptığı deneysel çalışmalar ile modelini kalibre etmiş ve modelinin deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Hognestad [3] betonun gerilme şekil değiştirme davranışını 1-4 denklemleri ile ifade etmiştir. Bu model sadece sargısız beton davranışını temsil edebilmektedir.

Standart silindir basınç değerinin %85'i kadar olan maksimum gerilme (f_c) değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri (ε_0) maksimum gerilme kuvveti ve elastisite modülüne (E_c) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 1).

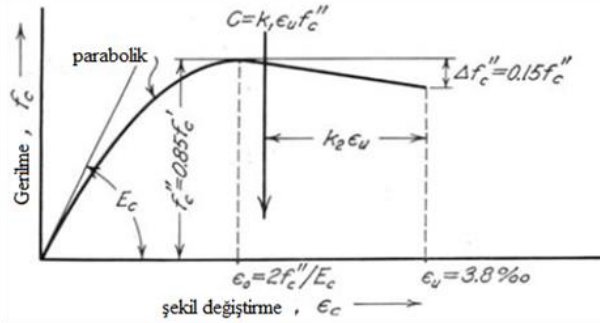
$$\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{E_c} \quad (1)$$

$$E_c = 12680 + 460f_c \quad (2)$$

Birim şekil değiştirme değerinin (ε_c) maksimum gerilme değerine karşılık gelen şekil değiştirme (ε_0) değerinden, küçük olması halinde ilgili gerilme değeri Denklem 3 ile elde edilmektedir. Maksimum gerilme anındaki birim şekil değiştirme (ε_0) değerinden daha büyük şekil değiştirmelere karşılık gelen gerilme değerleri ise Denklem 4 kullanılarak elde edilmektedir.

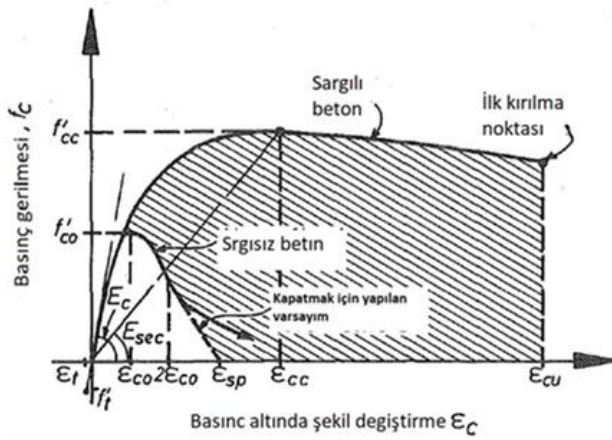
$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \text{ ise } \sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \text{ ise } \sigma_c = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{0.0039 - \varepsilon_0} \right] \quad (4)$$



Şekil 1. Hognestad beton modeli için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [3]

Mander vd. [7] tarafından geliştirilen model 2007 Deprem Yönetmeliğinde uygulanmıştır. Ülkemizde 2018 yılında yürürlüğü giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde uygulanan yöntem de genel hatlarıyla Mander vd. [7] modelinin aynısıdır. Mander vd. [7] sargılı ve sargısız beton davranışı için iki farklı model geliştirmiştir (Şekil 2). Bu çalışmada sargısız beton modellerinde maksimum gerilme değerinde birim şekil değiştirmenin (ε_{co}) 0.002 alınmasını önerilmiştir. Sargılı beton modeli betonun karakteristik basınç gerilmesi, enine donatı oranı, etriye aralığı, boyuna donatı aralığı gibi birçok parametreyi dikkate almaktadır. Mander vd. [7] yükleme hızının ve tekrarlı yüklerin betonarme üzerindeki etkilerini de dikkate almıştır.



Şekil 2. Mander vd. beton modeli için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [7]

Mander vd. [7] sargısız beton modeli, başlangıçtan en büyük gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerinin iki katına kadar devam eden parabolik bir eğri (Denklem 7) ve bu eğriyi $\varepsilon_{sp} = 0.005$ birim şekil değiştirme değerine kadar yaklaşık olarak doğrusal devam eden (Denklem 8) iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2). Başlangıç noktasını maksimum gerilme noktasıyla birleştiren doğrunun eğimi, Denklem 5'te verilen sekant elastisite modülü (E_{sec}) ile elde edilmektedir.

$$E_{sec} = \frac{f_c}{\varepsilon_{co}} \quad (5)$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \quad (6)$$

$$0 \leq \varepsilon_{ci} \leq 2\varepsilon_{co} \text{ ise } \sigma = \frac{f_c \chi^r}{r-1 + \chi^r} \quad (7)$$

$$2\varepsilon_{co} \leq \varepsilon_{ci} \leq \varepsilon_{sp} \text{ ise } \sigma = f_c \left(\frac{2r}{r-1+2^r} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_{ci} - 2\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{sp} - 2\varepsilon_{co}} \right) \quad (8)$$

Mander vd. [7] sargılı beton modelinde, dış etriyelerin merkezinden merkezine etkin olarak sarılmış bölge (A_e) Denklem 9 ile hesaplanır. Bu denklemde b_c ve d_c betonu saran etriyelerin merkezinden merkezine olan uzaklıklarını, s iki etriyenin merkezinden merkezine dikey mesafeyi ve s' ise iki etriye arasındaki net açıklığı ifade eder. W_i' bir etriye veya çiroz tarafından sabitlenen boyuna donatılar arasındaki net mesafedir.

$$A_e = \left(b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (9)$$

Etriye donatısı tarafından sarılmış kesit alanının (A_e), eleman kesitinin net alanına (A_{cc}) oranı olarak ifade edilen k_e Denklem 10 ile hesaplanmaktadır. Burada k_e sargı etki katsayısıdır.

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \quad (10)$$

Sargı donatısının hacminin, etriye donatısı ile sarılmış çekirdek betonunun hacmine oranı (ρ_s) Denklem 11 ile hesaplanmaktadır. Burada A_{sx} ile A_{sy} sırasıyla x ve y doğrultularındaki sargı donatısının alanını ρ_x ve ρ_y ise sırasıyla x ve y doğrultularındaki sargı donatısının oranını vermektedir.

$$\rho_s = \rho_x + \rho_y = \frac{A_{sx}}{s d_c} + \frac{A_{sy}}{s b_c} \quad (11)$$

Sargı etkisinden dolayı çekirdek betonu üzerinde oluşan yanal basınç kuvveti (f_l') Denklem 12 ile hesaplanmaktadır. Burada kullanılan f_{yh} sargı donatısının akma dayanımıdır.

$$f_l' = \frac{1}{2} k_e f_{yh} \left(\frac{A_{sx}}{s' d_c} + \frac{A_{sy}}{s' b_c} \right) \quad (12)$$

Betonun sargılı basınç dayanımı, sargısız beton dayanımı f_c ve yanal basınç kuvveti f_l' değerlerine bağlı olarak Denklem 13 ile elde edilmektedir.

$$f'_{cc} = f_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l'}{f_c}} - 2 \frac{f_l'}{f_c} \right) \quad (13)$$

Sargılı beton basınç gerilmesi olan σ_c basınç birim şekil değiştirilmesi ε_{cc} (Denklem 15) ve idealleştirilmiş beton birim şekil değiştirme değeri χ (Denklem 16) ve r (Denklem 17)'ye bağlı olarak Denklem 14'den elde edilmektedir. Denklem 18 kullanılarak sargılı beton nihai birim şekil değiştirme değeri hesaplanır. Denklem 18'de geçen ε_{su} değeri donatı kopma şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} \chi r}{r - 1 + \chi^r} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (15)$$

$$\chi = \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{cc}} \quad (16)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}; E_c = 5000 \sqrt{f_c}; E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (18)$$

Saatçioğlu ve Razvi [2] beton modeli, parabolik artan bir eğri ve ardından doğrusal bir şekilde azalan kısımdan oluşur (Şekil 3). Dairesel ve dikdörtgen sargı donatısı tarafından oluşturulan yanal basınçının hesaplanmasına ve buna bağlı olarak betonun dayanım ve süneklığında meydana gelen gelişmelere dayanır. Analitik modelin parametreleri, seyrek ve sıkılaştırılmış enine donatılı beton modelleri dâhil olmak üzere çok sayıda test verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sargılı beton dayanımı ve karşılık gelen birim şekil değiştirme, etriye donatısı tarafından sağlanan eşdeğer düzgün yayılı sargı basıncı cinsinden ifade edilir. Eşdeğer düzgün yayılı sargı basıncı, kesit ve malzeme özelliklerinden hesaplanan ortalama yanal basınçtan elde edilir. Azalan kısım, tepe gerilmesinin %85'ine karşılık gelen birim şekil değiştirme tanımlanarak oluşturulur. Bu birim şekil değiştirme değeri, sargı parametreleri cinsinden ifade edilir. Azalan kısmın sonunda, %20 dayanım seviyesinde sabit bir artık dayanım olduğu varsayılır. Sargılı basınç dayanımı f_{cc} yanal basınç gerilmesi f_l dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Dikdörtgen etriyeli elemanlarda boyuna doğrultudaki donatılar tarafından tutulan noktalar arasında kalan bölgede, oluşan basınç etkisiyle etriye dışarı doğru bükülür. Dışarı doğru bükülen kısımda sargı etkisi zayıflar ve bu bölgede daha düşük yanal basınç oluşur. Bu basınç değişiminin etkisi dikkate alınarak Saatçioğlu ve Razvi [2] modelinde eşdeğer bir yanal basınç değeri hesaplanmaktadır. Saatçioğlu ve Razvi [2] basınç dağılımındaki bu değişimi dikkate alabilmek için f_l yerine, eşdeğer düzgün yayılı basınç f_{le} kullanılmasını önermektedir.

Saatçioğlu ve Razvi [2] modelinde sargılı beton basıncı olan f_{cc} , Denklem 19 ile hesaplanmaktadır. Burada k_3 standart silindirik numune ile gerçek eleman arasındaki dayanım farkını yansıtan bir katsayıdır (standart dayanımlı betonlar için $k_3 = 0.85 \sim 1$ arasındadır).

$$f_{cc} = k_3 f_c + k_n f_{le} \quad (19)$$

$$k_n = \frac{6.7}{(f_i)^{0.17}} \quad (20)$$

Burada geçen k_n katsayısı sargı etkisi olan f_i 'ye bağlı olarak Denklem 20 ile hesaplanmaktadır. Eşdeğer sargı basıncı olan f_{le} ise denklem 21-27 arasında verilen ifadelerden elde edilmektedir.

$$f_{le} = \frac{f_{lex} b_{kx} + f_{ley} b_{ky}}{b_{kx} + b_{ky}} \quad (21)$$

$$f_{lx} = \frac{\sum A_{sx} f_{yw} \sin \alpha}{s b_{kx}} \quad (22)$$

$$f_{ly} = \frac{\sum A_{sy} f_{yw} \sin \alpha}{s b_{ky}} \quad (23)$$

$$k_{2x} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{kx}}{a_x}\right) \left(\frac{b_{kx}}{s}\right) \left(\frac{1}{f_{lx}}\right)} \leq 1.0 \quad (24)$$

$$k_{2y} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{ky}}{a_y}\right) \left(\frac{b_{ky}}{s}\right) \left(\frac{1}{f_{ly}}\right)} \leq 1.0 \quad (25)$$

$$f_{lex} = k_{2x} f_{lx} \quad (26)$$

$$f_{ley} = k_{2y} f_{ly} \quad (27)$$

Saatçioğlu ve Razvi [2], sargılı betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerini (ε_{coc}) Denklem 28 ile ifade etmiştir.

$$\varepsilon_{coc} = \varepsilon_{co} (1 + 5\lambda); \lambda = \frac{k_n f_{le}}{k_3 f_c} \quad (28)$$

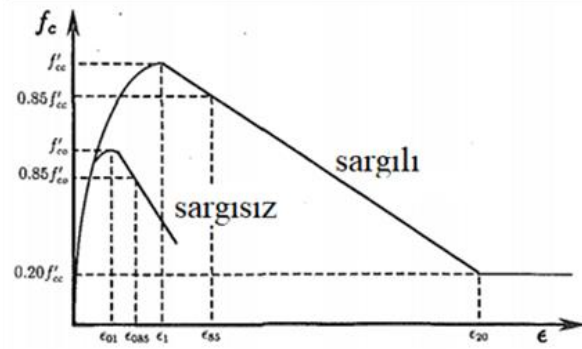
Azalan kısım, tepe gerilmesinin %85'ine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri (Denklem 29) ve tepe noktasından geçen doğru ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_{c85} = 260 \rho_s \varepsilon_{coc} + \varepsilon_{u85}; \varepsilon_{u85} = 0.0038 \quad (29)$$

İki farklı kısımdan oluşan modelin Birinci (parabolik) kısmı ($0 \leq \varepsilon_{ci} \leq \varepsilon_{coc}$) Denklem 30 ile elde edilir. İkinci (doğrusal) kısmı ($\varepsilon_{ci} \geq \varepsilon_{coc}$) ise Denklem 31 ile elde edilmektedir.

$$\sigma_c = f_{cc} \left[\frac{2\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{coc}} - \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right]^{1+2\lambda} \quad (30)$$

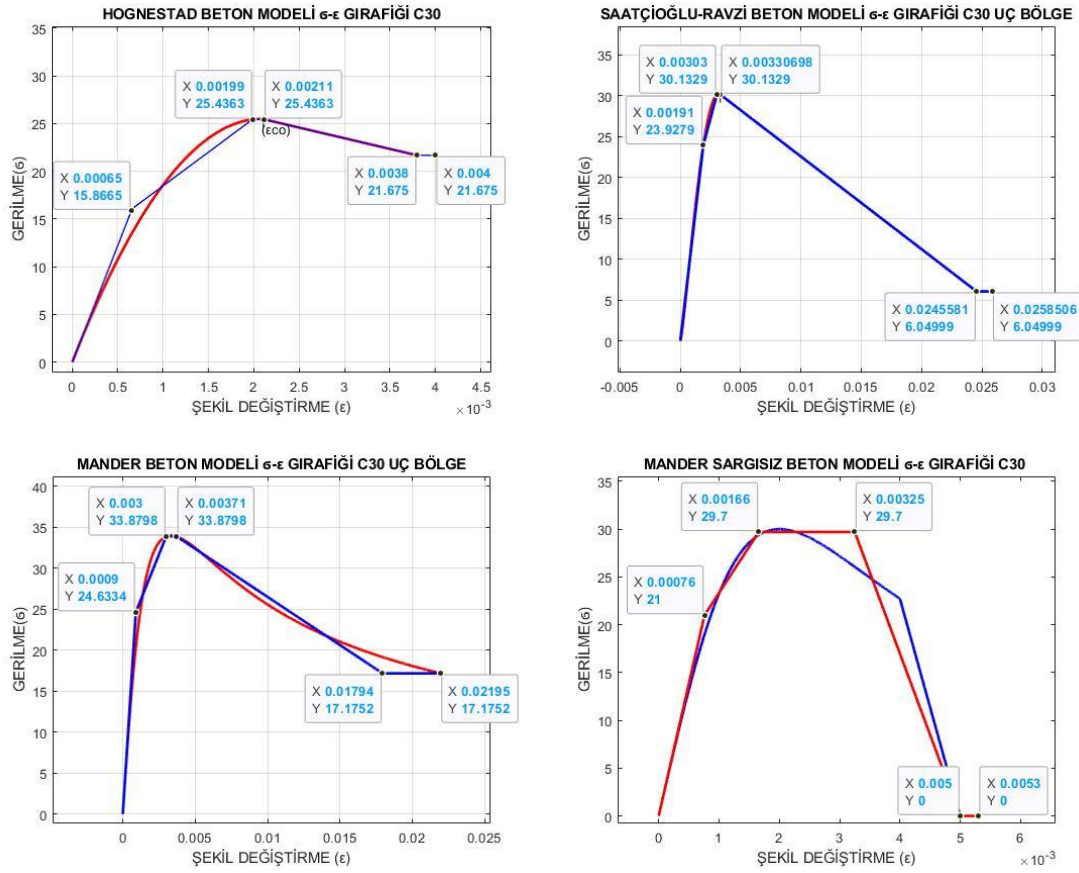
$$\sigma_c = f_{cc} + \left(\frac{f_{cc} - 0.85f_c}{\epsilon_{coc} - \epsilon_{c85}} \right) (\epsilon_{ci} - \epsilon_{coc}) \quad (31)$$



Şekil 3. Saatchioglu-Ravzi modeli gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [2]

B. Yöntem

Beton davranışı için, Hognestad (H) [3], Mander vd. (M) [7] ve Saatchioglu-Ravzi (S) [2] tarafından geliştirilen denklemler kullanılarak MATLAB [18] programında malzeme modelleri tanımlanmış ve grafikleri elde edilmiştir. Beton davranışı bu grafikleri en ideal şekilde temsil eden, benzeştirilmiş üç doğru ile ifade edilmiştir (örn: Şekil 4). Bu üç doğruyla ifade edilen beton davranış grafiklerinden elde edilen veriler kullanılarak, Perform3D [17] paket programında modelleme sırasında kullanılan betonarme perde duvarların deneysel verilerle karşılaştırılması için gerekli beton davranış parametreleri Tablo 1’de sunulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan C30 ve C40 beton basınç dayanımları için gerekli beton davranış parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Son olarak çalışmada kullanılan deneysel beton sınıfları ile farklı beton malzeme modelleri için iki farklı tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları tanımlanmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen tüm parametrelere göre analizler tamamlandıktan sonra beton malzemeler için sabit olarak tanımlanan Y, U, R, L ve X parametreleri sırasıyla 0.7, 0.6, 0.5, 0.4 ve 0.3 alınarak sadece deneysel beton sınıfları için analizler tekrarlanmıştır. İlk doğrunun eğimi malzemenin elastisite modülü kabul edilmiştir. Akma (FY) dayanımından sonra malzemede şekil değiştirme artarken dayanım daha az artmaktadır. Maksimum dayanım (FU) değerinden sonra bir plastik bölge olduğu kabul edilmektedir. Şekil değiştirme (DL) değerinden sonra malzemede dayanım kaybı meydana gelmektedir (Şekil 5). Dayanım kaybından sonra malzeme en büyük şekil değiştirme (DX) değerine ulaşarak kopmaktadır. Kullanılan donatıların ise elasto-plastik davranış gösterdiği varsayılmış ve Tablo 3 de belirtilen şekliyle tanımlanmıştır. Elde edilen parametreler kullanılarak uluslararası kabul gören yapısal analiz programı, Perform-3D [17] paket programı yardımıyla beton malzeme modellerinin görece narin betonarme perdeler üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Çalışma kapsamında RW2 [19] ile RW-A20-P10-S38 [20] ve RW-A15-P10-S78 [20] olarak adlandırılan betonarme perde duvarları kullanılmıştır. RW2 [19] olarak adlandırılan betonarme perdenin genişliği 1223 mm yüksekliği 3660 mm ve kalınlığı 102 mm’dir. RW-A20-P10-S38 [20] ve RW-A15-P10-S78 [20] olarak adlandırılan betonarme perde duvarların genişlikleri 1219 mm, kalınlıkları 152 mm ve yükseklikleri sırasıyla 2440 mm ve 1830 mm’dir. Çalışma için kullanılan betonarme perde en kesit ve donatı bilgileri Şekil 6’da sunulmaktadır.



Şekil 4. Perform-3D [17] için idealleştirilmiş beton malzeme modeli eğrileri

Tablo 1. Perform-3D [17] için gerekli deneysel beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri

Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU
RW2 [19]	M_C42.8	32676	38.56	46.61	0.00266	0.0196	0.166	0.00353	0.0148	0.32000
	S_C42.8	27550	30.58	38.56	0.00193	0.0272	0.353	0.00212	0.0258	0.20000
RW-A20-P10-S38 [20]	M_C47.1	34222	57.49	75.09	0.00718	0.0261	0.093	0.00942	0.0253	0.82100
	S_C47.1	14168	33.86	52.16	0.00414	0.0836	0.738	0.00457	0.0794	0.20000
RW-A15-P10-S78 [20]	M_C55.8	37233	62.55	84.17	0.00642	0.0234	0.122	0.00842	0.0226	0.78200
	S_C55.8	18845	41.08	59.93	0.00378	0.0859	0.625	0.00443	0.0816	0.20000

Tablo 1. Perform-3D [17] için gerekli deneysel beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri (Devamı)

Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU	
RW2 [19]		H_C42.8	29415	23.53	36.29	0.00235	0.0040	0.280	0.00249	0.0038	0.85000
		M_C42.8	33746	35.10	42.80	0.00198	0.0053	0.243	0.00290	0.0050	0.00001
		S_C42.8	29415	23.53	36.29	0.00235	0.0040	0.280	0.00249	0.0038	0.85000
RW-A20-P10-S38 [20]		H_C47.1	31012	26.05	39.94	0.00245	0.0040	0.278	0.00259	0.0038	0.85000
		M_C47.1	35111	38.62	47.10	0.00198	0.0053	0.274	0.00275	0.0050	0.00001
		S_C47.1	31012	26.05	39.94	0.00245	0.0040	0.278	0.00259	0.0038	0.85000
RW-A15-P10-S78 [20]		H_C55.8	34322	30.89	47.31	0.00262	0.0040	0.278	0.00276	0.0038	0.85000
		M_C55.8	41850	40.18	55.80	0.00198	0.0053	0.366	0.00235	0.0050	0.00001
		S_C55.8	34322	30.89	47.31	0.00262	0.0040	0.278	0.00276	0.0038	0.85000
Tüm malzemeler için, tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları (Energy Degradation Factors)							Y	U	R	L	X
							1	0.9	0.7	0.4	0.3

Tablo 2. Perform-3D [17] için gerekli C30 ve C40 beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri

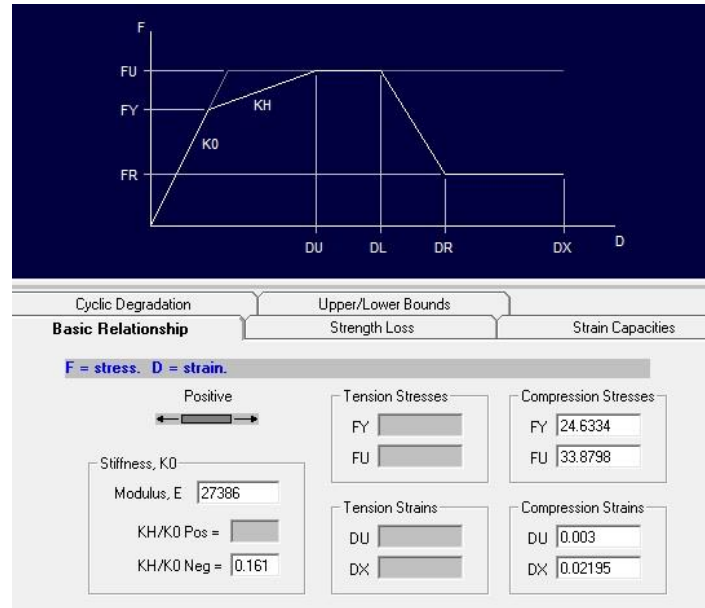
Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU	
RW2 [19]		M_C30	27386	24.63	33.88	0.00300	0.02195	0.161	0.00371	0.01794	0.50690
		M_C40	31628	32.26	44.00	0.00271	0.01785	0.220	0.00331	0.01466	0.50690
		S_C30	12528	23.93	30.13	0.00303	0.02585	0.442	0.00331	0.02456	0.20000
		S_C40	18254	31.58	39.12	0.00275	0.02921	0.405	0.00301	0.02775	0.20000
RW-A20-P10-S38 [20]		M_C30	27386	38.34	48.64	0.00742	0.03139	0.063	0.01010	0.02982	0.84200
		M_C40	31623	45.53	59.53	0.00623	0.02637	0.092	0.00847	0.02505	0.78700
		S_C30	7842	20.63	34.32	0.00500	0.05563	0.737	0.00517	0.05285	0.20000
		S_C40	13093	29.33	43.33	0.00388	0.05806	0.652	0.00436	0.05515	0.20000
RW-A15-P10-S78 [20]		M_C30	27386	38.34	48.64	0.00742	0.03139	0.063	0.01010	0.02982	0.84200
		M_C40	31623	45.53	59.53	0.00623	0.02637	0.092	0.00847	0.02505	0.78700
		S_C30	7842	20.62	34.32	0.00500	0.05563	0.737	0.00517	0.05285	0.20000
		S_C40	13093	29.33	43.33	0.00388	0.05806	0.652	0.00436	0.05515	0.20000
RW2 [19]		H_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000
		H_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000
		M_C30	27632	21.00	29.70	0.00166	0.00530	0.350	0.00325	0.00500	0.00001
		M_C40	34210	26.00	39.60	0.00180	0.00530	0.382	0.00300	0.00500	0.00001
		S_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000
		S_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000

Tablo 2. Perform-3D [17] için gerekli C30 ve C40 beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri (Devamı)

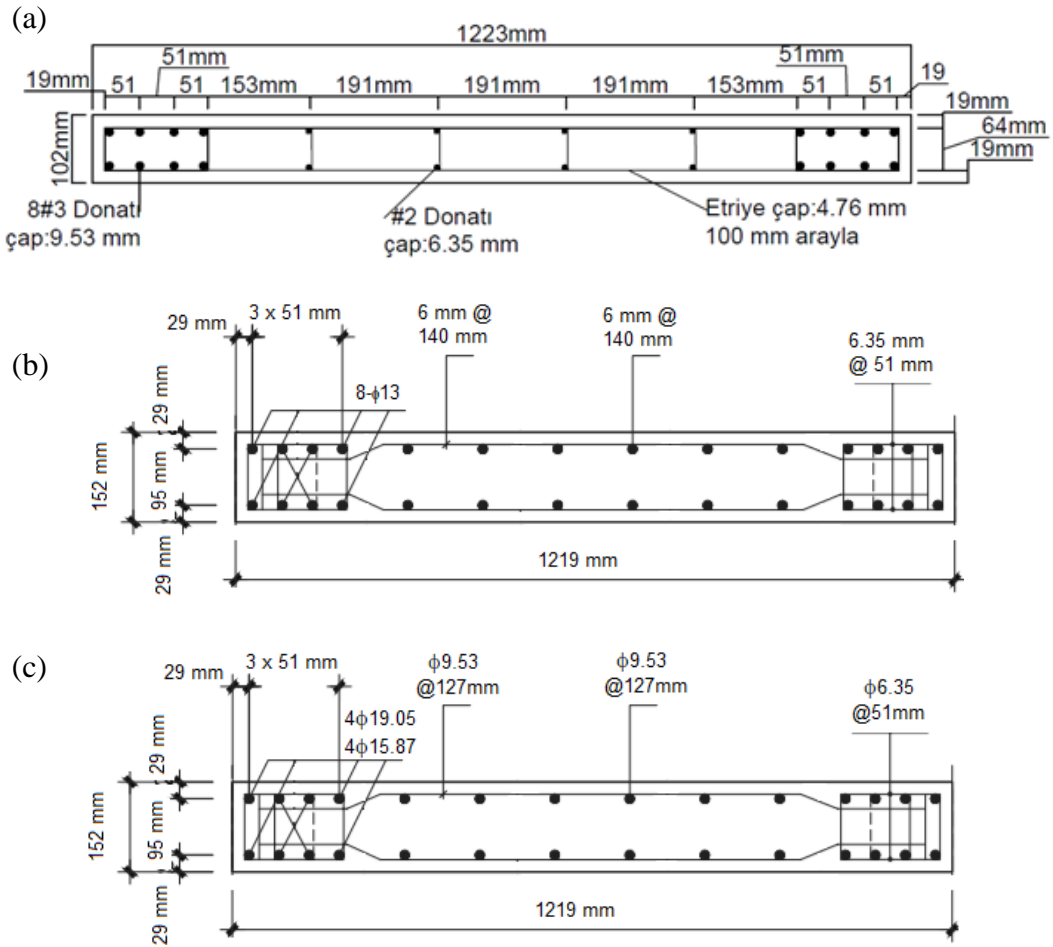
Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU	
RW-A20-P10-S38 [20]	H_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	H_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
	M_C30	27632	21.00	29.70	0.00166	0.00530	0.350	0.00325	0.00500	0.00001	
	M_C40	34210	26.00	39.60	0.00180	0.00530	0.382	0.00300	0.00500	0.00001	
	S_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	S_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
RW-A15-P10-S78 [20]	H_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	H_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
	M_C30	27632	21.00	29.70	0.00166	0.00530	0.350	0.00325	0.00500	0.00001	
	M_C40	34210	26.00	39.60	0.00180	0.00530	0.382	0.00300	0.00500	0.00001	
	S_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	S_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
Tüm malzemeler için, tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları (Energy Degradation Factors)							Y	U	R	L	X
							1	0.9	0.7	0.4	0.3

Tablo 3. Perform-3D [17] için gerekli donatıların girdi verileri

Betonarme Perde Adı	Konum	Donatı Çapı (mm)	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (kN/m ²)	FU (kN/m ²)	DU	DX	KH/K0			
Çekme altında	RW2[19]	Başlık	9.53	200000	395000	600000	0.06	0.061	0.018		
		Gövde	4.76	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015		
	RW-A20-P10-S38 [20]	Başlık	6.35	200000	336000	630000	0.06	0.061	0.025		
			12.7	205217	472000	613000	0.08	0.12	0.009		
		Gövde	6	200000	336000	630000	0.06	0.061	0.025		
			6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015		
	RW-A15-P10-S78 [20]	Başlık	6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015		
			19.05	216818	477000	637000	0.08	0.11	0.009		
			15.87	206087	474000	620000	0.08	0.12	0.009		
		Gövde	6	200000	336000	630000	0.06	0.061	0.025		
			9.53	200000	395000	600000	0.06	0.061	0.018		
			9.53	200000	395000	600000	0.06	0.061	0.018		
Basınç altında	RW2[19]	Başlık	9.53	200000	434000	648000	0.06	0.061	0.018		
		Gövde	4.76	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015		
	RW-A20-P10-S38 [20]	Başlık	6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025		
			6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025		
		Gövde	13	205217	472000	613000	0.08	0.12	0.009		
			6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025		
	RW-A15-P10-S78 [20]	Başlık	6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015		
			6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015		
			19.05	216818	477000	637000	0.08	0.11	0.009		
		Gövde	15.87	206087	474000	620000	0.08	0.12	0.009		
			6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025		
			9.53	200000	434000	648000	0.06	0.061	0.018		
Tüm donatılar için, tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları (Energy Degradation Factors)							Y	D=0.01	D=0.02	D=0.05	X
							0.9	0.9	0.8	0.8	0.7

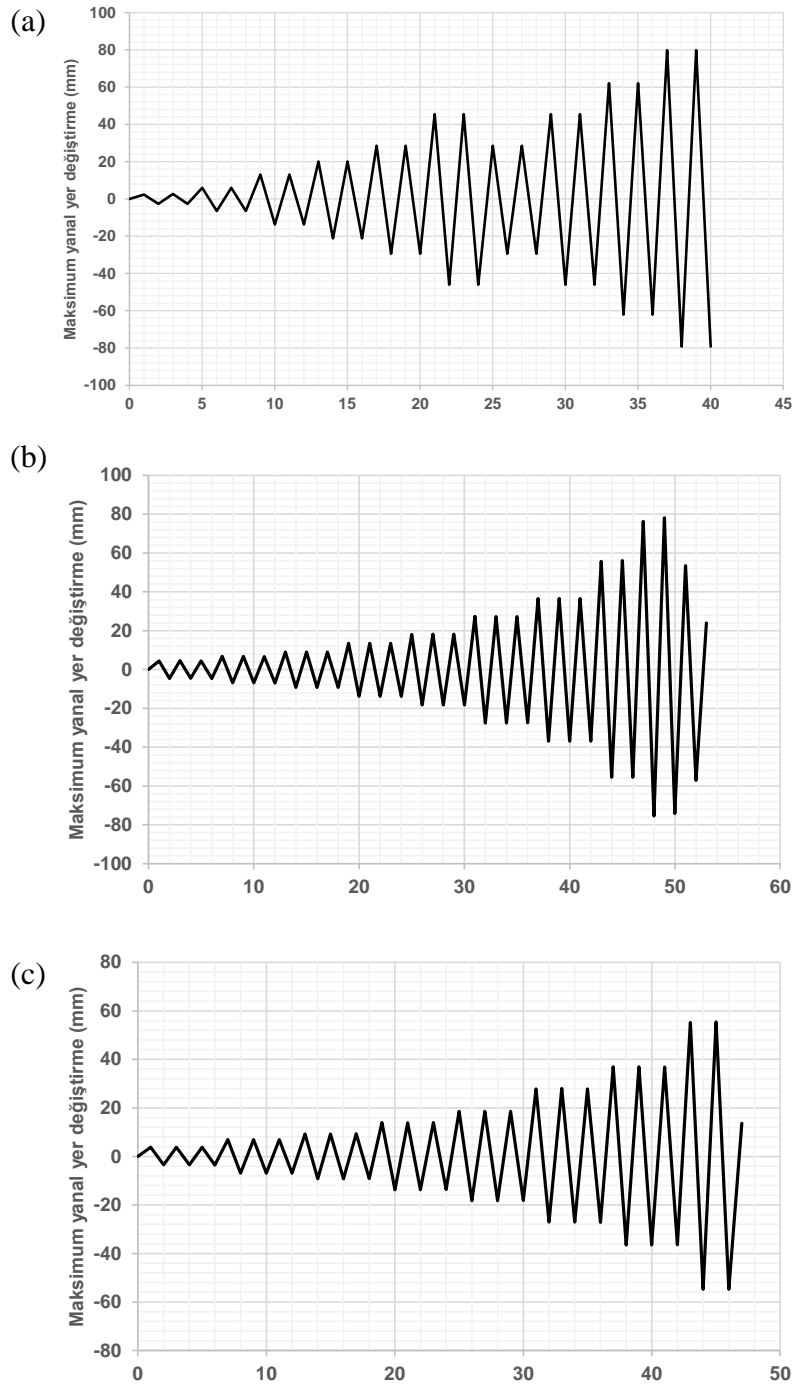


Şekil 5. Perform-3D [17] paket programında kullanılan beton malzeme modeli kapasite eğrileri için



Şekil 6. Betonarme perde en kesit görünümü; (a) RW2 [19], (b) RW-A20-P10-S38 [20], (c) RW-A15-P10-S78 [20]

Modellenen perdelerde aynı seviyedeki noktalara rijit diyafram tanımlayarak bu noktaların birlikte hareket edecekleri varsayılmıştır. Betonarme perde duvarların tabanında bulunan bütün düğüm noktalarına ankastre mesnet tanımlanarak mesnetlerde hareket ve dönmelerin engellendiği varsayılmıştır. Perform 3D [17] paket programında tersinir tekrarlanır yüklemelerin tanımlanması için tüm modellerde perdelerin üst ucundaki iki köşeye perdenin çalıştığı yatay doğrultuda pozitif (H1) yönünde 1 kN yük uygulanmıştır. Hognestad [3], Mander vd. [7] ve Saatcioglu-Razvi [2] beton modellerinden elde edilen verilere göre Perform-3D [17] paket programında beton malzeme modelleri tanımlanmıştır. Donatı modelleri Tablo 3'te verilen parametreler kullanılarak tanımlanmıştır. Tüm malzeme modellerinde öncelikli olarak tekrarlı yükler altında Mander vd. [7] modeli için önerilen bozulma katsayıları kullanılmıştır. Daha sonra çalışma kapsamında farklı katsayılar denenerek analizler aynı kabullerle tekrarlanmıştır. Perde elemanlarının tanımlanmasında fiber elemanlar kullanılmıştır. Farklı beton ve donatı grupları için modelin en-kesitinde ayrı ayrı fiber elemanlar tanımlanmıştır. Perde duvarlarda kesme dayanımını temsil etmek için doğrusal-elastik model tercih edilmiştir. Kesme rijitliği beton elastisite modülünün 0.4 katı olarak belirlenmiştir. En kesit tanımlama kısmında her beton ve donatı lifinin konumu ve kesit alanı tanımlanarak perde kesti oluşturulmuştur. Deney sırasında betonarme perde duvarlar üzerine uygulanan düşey yüklerin temsili için RW2 [19] olarak adlandırılan betonarme perde üst ucuna toplam 388 kN, RW-A20-P10-S38 [20] ve RW-A15-P10-S78 [20] olarak adlandırılan betonarme perde duvarların üst ucuna ise 877.4 kN aksel yük tanımlanmıştır. Perdelerin üst ucuyla tabanı arasındaki göreceli öteleme hesaplarında dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında P-delta etkisi ihmal edilmiştir. Tanımlanan perdelerin düşey yükler altında doğrusal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen tersinir-tekrarlanır yer değiştirme analizini temsil edebilmek için modellenen betonarme perde duvar statik itme analizlerine tabi tutulmuştur. Doğrusal olmayan statik itme analizi her bir betonarme perde duvar için Şekil 7'de verilen yanal yer değiştirme eğrilerine göre her bir deplasman döngüsü için 50 adımda ve 200 tekrarlı adımla dört farklı yüklemeye gerçekleştirilmiştir.

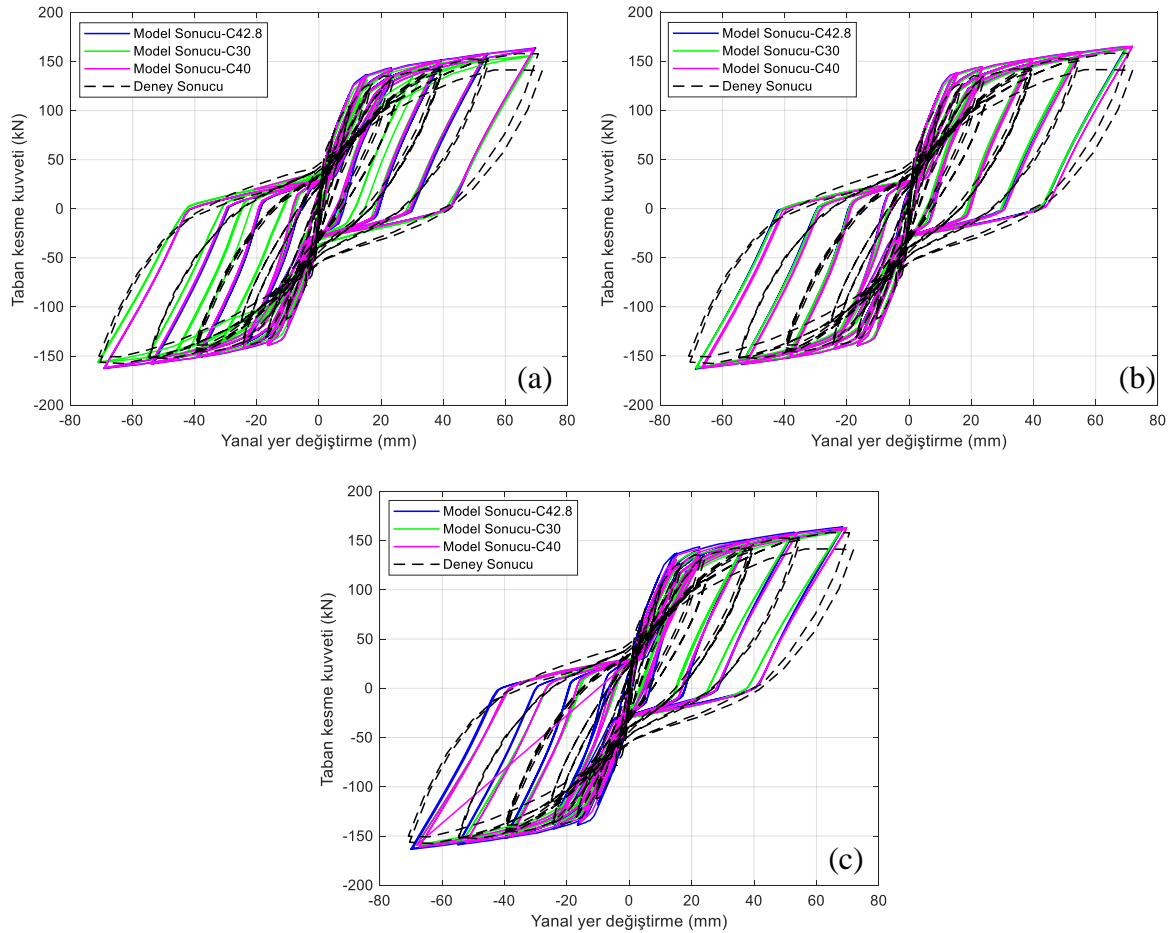


Şekil 7. Yanal yer değiştirme eğrileri; (a) RW2 [19], (b) RW-A20-P10-S38 [20], (c) RW-A15-P10-S78 [20]

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan analizler sonucunda yatay yük–yanal yer değiştirme grafikleri elde edilmiş ve sonuçları tartışılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan malzeme modellerinin birbirine oldukça yakın değerlerde kaldığı tespit edilmiştir. Sonuçların birbirine çok yakın olması görece narın betonarme perde duvar analizleri için taban kesme kuvveti–yanal yer değiştirme arasındaki ilişki üzerinde betonun sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Sönmez ve Dönmez [10], tarafından yapılan çalışmada da tüm kolonlarda farklı beton modelleri için birbirine yakın sonuçlar elde etmiştir. Şekil 8, 9 ve 10’da çalışma kapsamındaki her bir

betonarme perde duvar numunesi için deneysel beton dayanımları ve farklı beton sınıfları kullanılarak Perform 3D [17] paket programından elde edilen tersinir-tekrarlanır sonuçlar sunulmaktadır. Şekillerde görüldüğü üzere, sonuçlar üzerinde betonun karakteristik basınç dayanımının ciddi bir etkisi gözlemlenmemektedir. Özellikle boy/en oranı 3.0 olan RW2 [19] betonarme perde duvar numunesinde beton basınç dayanımı diğer iki betonarme perde duvar numunesine göre neredeyse hiçbir etki göstermemektedir (Şekil 8). RW2 [19] betonarme perde duvar numunesi için yapılan analizler incelendiğinde, hem beton sınıfının hem de beton modelinin farklılık göstermesinin taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme eğrilerinin kapasitesini ve/veya karakteristik özelliklerini neredeyse hiç etkilemediği görülmektedir (Şekil 8).

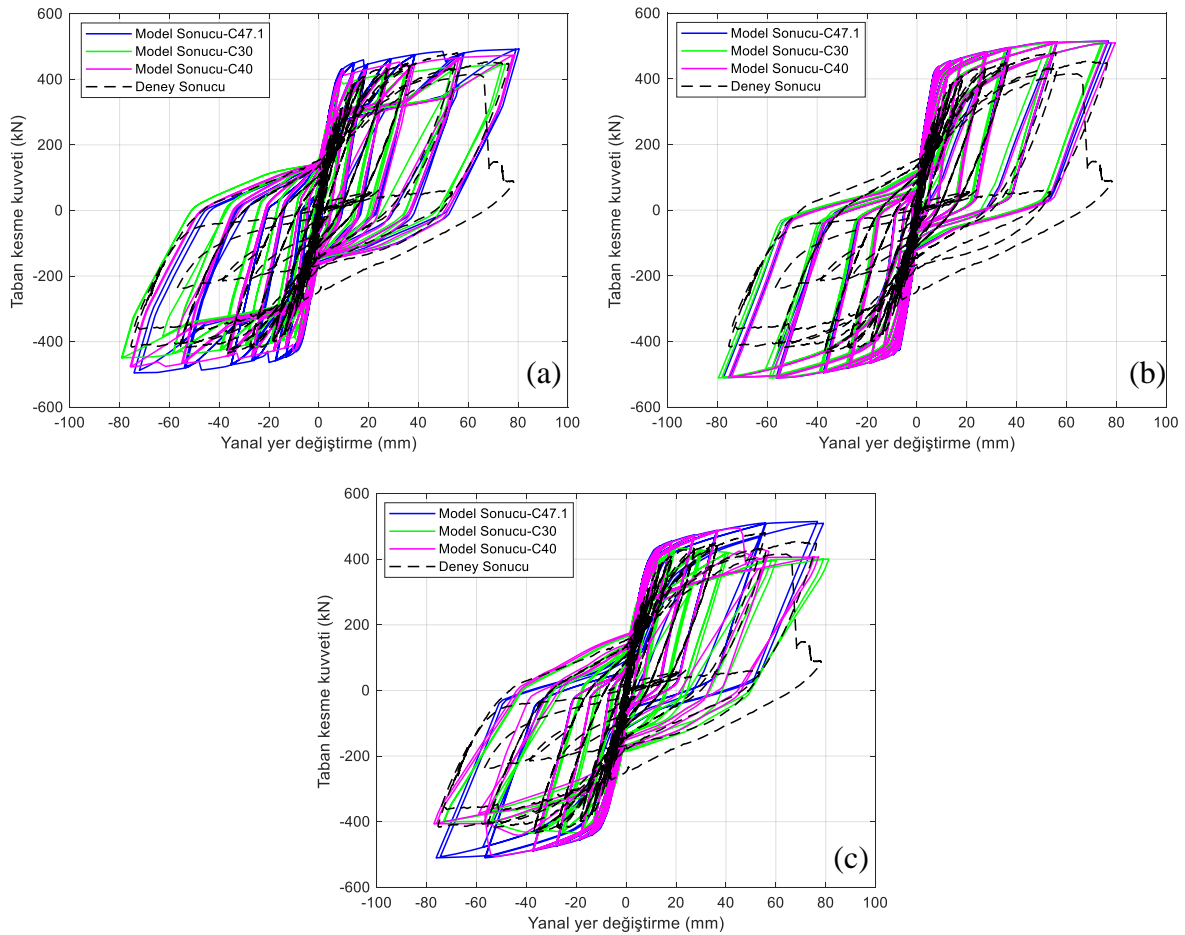


Şekil 8. RW2 [19] betonarme perde numunesi için farklı beton modelleri ile elde edilen taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkileri; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

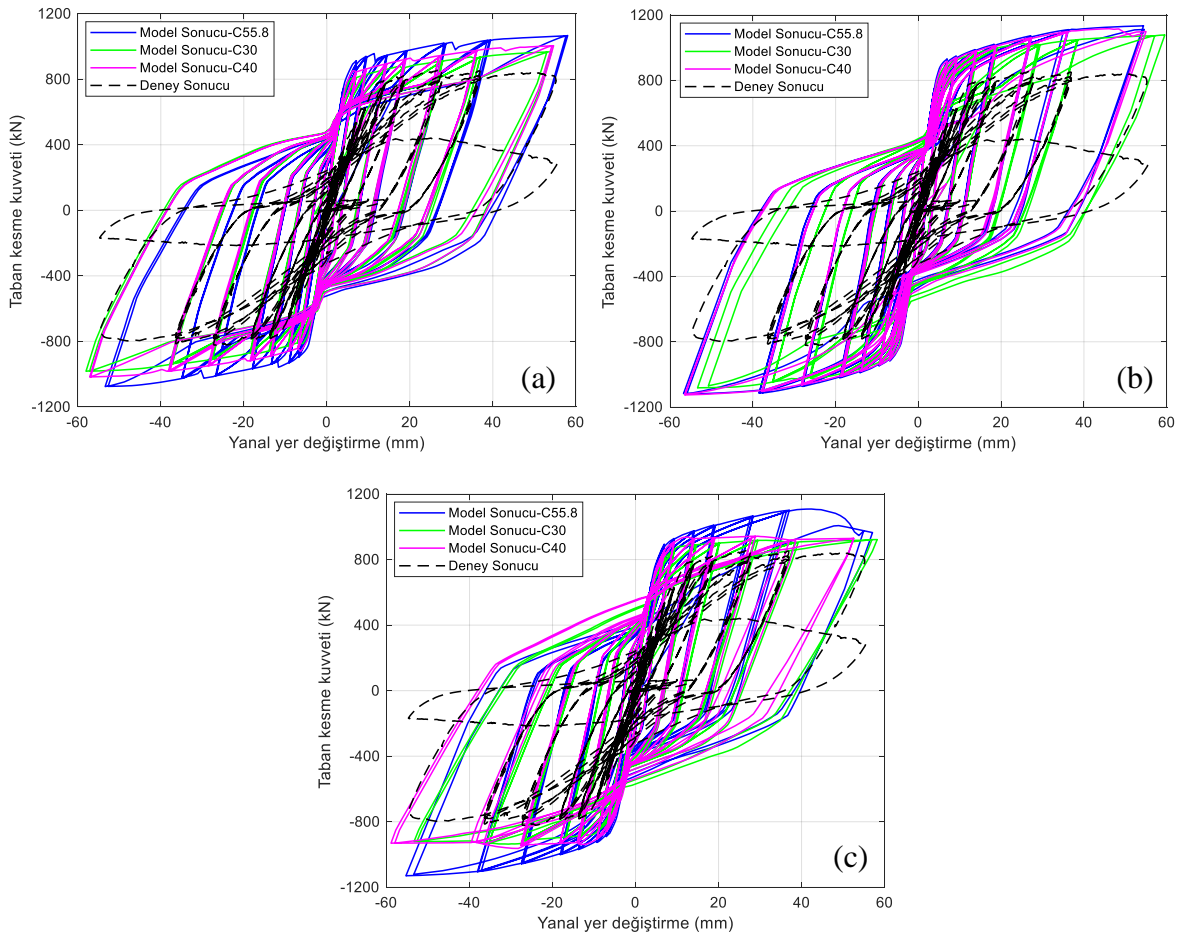
Boy/en oranı 2.0 olan RW-A20-P10-S38 [20] ile boy/en oranı 1.5 olan RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvarlar RW2 [19] numunesine kıyasla kesme-eğilme ortak etkisi altında davranış göstermektedirler. Bu sebeple boy/en oranının azalması ile beton sınıfının etkisi taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme grafiklerinde az da olsa gözlemlenmiştir (Şekil 9 ve 10). RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvar numunesi için yapılan analizler incelendiğinde, Hognestad [3] beton modeli kullanıldığı takdirde farklı beton sınıflarının kullanılmasının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme eğrisinin kapasitesini etkilediği söylenebilirken, tersinir-tekrarlanır yükleme karakteristik özelliklerini etkilemediği görülmektedir. Mander vd. [7] beton modeli ise yine RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesi için uygulandığı takdirde, beton sınıfının analiz sonuçlarını neredeyse etkilemediği görülmektedir. Aynı numune için son olarak Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modeli ile yapılan analizlerde kullanılan farklı beton sınıflarının özellikle taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme eğrilerinde yatay yük kapasitesinde azalmanın başladığı noktaları etkilediği anlaşılmaktadır (Şekil 9). Benzer şekilde RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesi için yapılan analizler incelenmiştir (Şekil 10). Bu numune de Hognestad [3] beton modeli kullanımı RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvar numunesi ile benzer

sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Mander vd. [7] beton modelinde ise C30 beton dayanımının farklılık göstermesinin kullanılan paket programda yapılan doğrusal olmayan analizlerde yakınsama problemleri nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesi için Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modeli ile C30 ve C40 gibi görece deney sırasında kullanılan beton dayanımından (C55.8) daha düşük beton sınıfları kullanılarak yapılan analizlerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak deneysel olarak elde edilen beton sınıfı kullanıldığı takdirde taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafiklerinde yanal yük kapasitesinin diğer iki beton sınıfına göre farklılık gösterdiği ve yanal yük kapasitesindeki azalmanın daha geç başladığı gözlemlenmiştir.

Tüm modeller için enine donatı çaplarının ve enine donatı aralığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiş ve enine donatı sıklığının, en kesitin sünekliliği ve taşıma kapasitesi üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu kanısına varılmıştır. Boy/en oranı 3.0 olan görece narin betonarme perde duvarların doğrusal olmayan analizlerinde beton malzeme modellerinin etkili olmadığı görülmektedir. Taban kesme kuvveti ile yanal yer değiştirme arasındaki ilişki üzerinde donatı daha büyük etkiye sahiptir. Özmen vd. [12] yatay kuvvet-deplasman arasındaki ilişkide belirleyici olanın, donatı olduğunu ifade etmiştir. Özmen vd. [12], Işık vd. [14], Sönmez ve Dönmez [10] tarafından yapılan çalışmalarda da geçtiği üzere malzeme modellerinin daha kapsamlı ve karmaşık formüllerle ifade edilmesi modeller arasında analiz süresinin uzamasına neden olabilmektedir. Beton malzeme modelleri özellikle boy/en oranı 3.0 olan betonarme perde duvar numunesi için birbirine yakın sonuçlar verdiği için, çok karmaşık modeller yerine daha basit modellerin kullanılması hesap yükünü hafifleterek daha pratik ve hızlı olacağından tercih edilebilir. Ancak boy/en oranı 2.0 veya daha az olan kesme-eğilme etkisinin gözlemlendiği betonarme perde duvarlarda beton dayanımının sonuca etkisi beton modellerine göre farklılık göstermektedir.

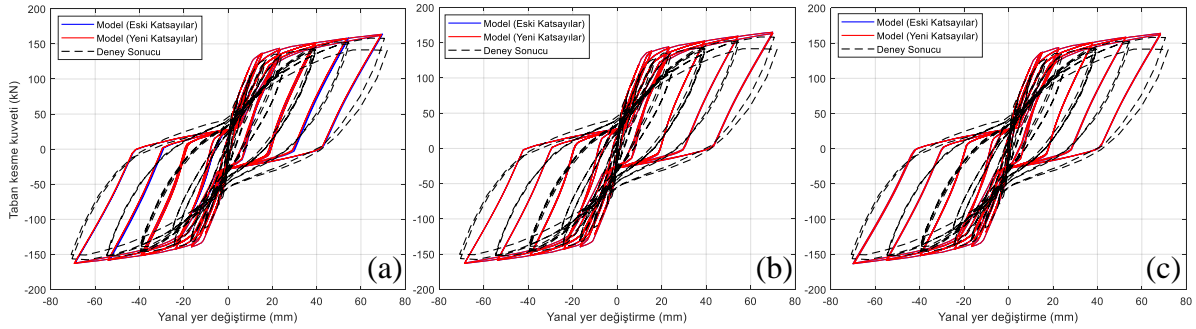


Şekil 9. RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde numunesi için farklı beton modelleri ile elde edilen taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkileri; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

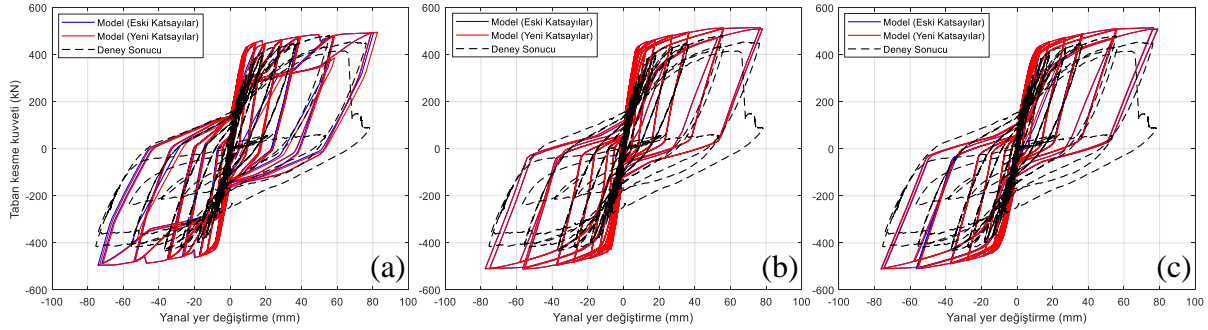


Şekil 10. RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde numunesi için farkı beton modelleri ile elde edilen taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkileri; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

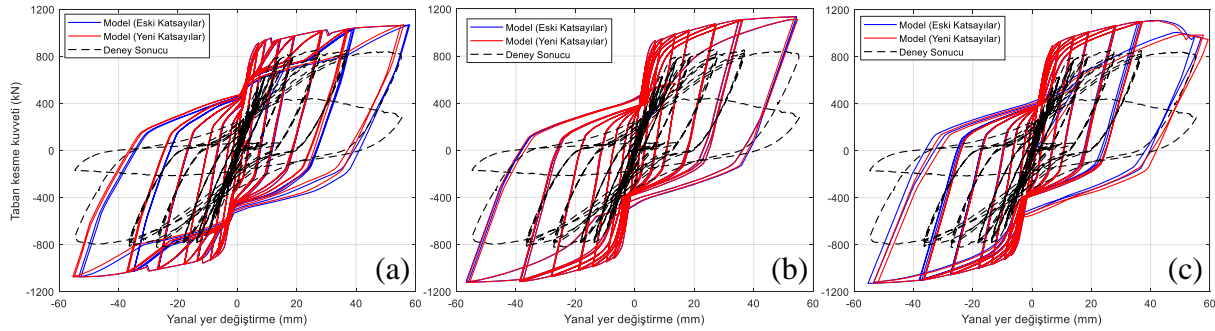
Çalışma kapsamında farklı beton malzeme modellerine ve beton sınıflarına göre yapılan tüm analizlerde beton modelleri için tanımlanan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulduğu gibi alınarak analizler yapılmıştır. Daha sonra beton malzemeler için sabit olarak tanımlanan Y, U, R, L ve X katsayıları sırasıyla 0.7, 0.6, 0.5, 0.4 ve 0.3 olarak alınıp sadece deney beton sınıfı kullanılarak elde edilen analizler tekrarlanmış ve böylece bu katsayıların beton modeli ve sınıfı ile birlikte betonarme perde duvarların deneysel sonuçlarının tahminindeki etkileri irdelenmiştir. İlk analizlerde kullanılan katsayılarla elde edilen model sonuçları “Eski Katsayılar” ismi ile mavi olarak gösterilmiş olup, yeni katsayılar kullanılarak elde edilen sonuçlar kırmızı olarak gösterilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan bütün beton modelleri için ve betonarme perde duvar numuneleri için deneysel olarak elde edilen beton basınç dayanımları kullanılarak elde edilen analiz sonuçları deney sonuçları ile birlikte Şekil 11, 12 ve 13’te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde RW2 [19] ile RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvarlarında neredeyse bu etkiler hiçbir beton modelinde farklılık göstermemektedir. Ancak RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesinde diğer iki numuneye göre bir miktar farklılıklar oluşmuştur. Bu farklılıkların doğrusal olmayan analizlerde sonuca yakınsama problemleri nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Yine aynı numune için sonuca yakınsama problemi yaşanmamış olan Mander vd. [7], beton modeli analizinde birebir aynı sonuçlar elde edilmiştir. Özetle, beton modelleri için tanımlanan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının sonuçları neredeyse hiç etkilemediği söylenebilir.



Şekil 11. RW2 [19] betonarme perde duvar numunesinin modellenmesi için kullanılan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkilerine etkisi; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]



Şekil 12. RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvar numunesinin modellenmesi için kullanılan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkilerine etkisi; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]



Şekil 13. RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesinin modellenmesi için kullanılan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma kat sayılarının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkilerine etkisi; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında literatürde geçerli olan Hognestad [3], Mander vd. [7], Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modelleri için hem kullanılan betonarme perde duvar numuneleri deneysel beton dayanımları hem de iki farklı beton dayanımı ile basitleştirilmiş birden fazla doğrudan oluşan kapasite eğrileri elde edilmiştir. Bu beton modelleri ve elasto-plastik donatı modelleri kullanılarak, görece narin betonarme perde duvarların Perform-3D [17] paket programında tersinir-tekrarlanabilir yüklenme durumunu (deneysel olarak uygulanan yüklenme protokolünü) temsil etmek için birden fazla statik itme analizi ile doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1. Taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere özellikle RW2 [19] betonarme perde duvar numunesinde Hognestad [3], Mander vd. [7], Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modelleri birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir. Ancak boy/en oranı azaldıkça (RW-A20-P10-S38 [20] ile RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perdelerinde) beton sınıfının etkisi taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme grafiklerinde az da olsa görülmüştür.

2. Boy/en oranı 2.0 ve 1.5 olan perdeler için yapılan analizler incelendiğinde, Hognestad [3] beton modelinde beton dayanımı az da olsa taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme kapasitesini etkilerken, Mander vd. [7] beton modelinde sadece kullanılan en düşük beton sınıflarında taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme kapasitelerinde çok az farklılıklar elde edilmiştir.

3. Beton dayanımının RW2 [19] betonarme perde duvar numunesine göre etken olduğu RW-A20-P10-S38 [20] ile RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvarlarında Saatçioğlu-Razvi [2] beton modelinin hem kapasite olarak farklılık gösterdiği hem de tersinir tekrarları yüklemeye karakteristik özellikleri açısından farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

4. Beton modelleri için tanımlanan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının sonuçlara etkisini irdelemek için iki farklı set kullanılarak yapılan analizlerden bu katsayıların çalışma kapsamındaki tüm beton modelleri için neredeyse etkisi olmadığı neticesine varılmıştır.

Sonuç olarak, görece narin betonarme perdelerin doğrusal olmayan analizlerinde farklı beton malzeme modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirine yakın olduğu için, hesap kolaylığı ve daha hızlı sonuç elde etmek açısından daha basit modeller tercih edilebilir. Ancak betonarme perde duvar boy/en oranı azaldıkça bir başka deyişle betonarme perde duvar davranışında kesme etkisinin baskın olması halinde beton dayanımı ve hatta kullanılan beton modeli de azda olsa sonuçları etkilemektedir. Boy/en oranı 3.0 olan betonarme perde duvarlar için beton modeli seçiminin bir öneminin olmadığı ve hatta beton sınıfının bile taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme kapasitesini neredeyse etkilemediği söylenebilirken, boy/en oranı 2.0 veya daha az olan betonarme perde duvarlarda beton modeli seçiminin az da olsa etkili olduğu ve beton sınıfının doğru beton modeli kullanıldığında etkili olduğu kanısına varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Sheikh S. A. & Üzümeri S. M. (1982). Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns. *ASCE Journal of the Structural Division*, 108 (12), 2703-2722.
- [2] Saatcioglu, M., & Razvi, S. R. (1992). Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 118(6), 1590-1607.
- [3] Hognestad, E. (1951). Study of combined bending and axialload in rein forced concrete members. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- [4] Kent D. C. & Park R. (1971). Flexural Members with Confined Concrete. *ASCE Journal of the Structural Division*, 97 (7), 1969-1990.
- [5] Roy H. E. H. & Sozen M. A. (1965). Ductility of concrete' in 'Flexural Mechanics of Rein forced Concrete'. *ACI Structural Jorunal*, 12, 213-224.
- [6] Sargin, M. & Handa, V. K. (1968). *Structural concrete and some numerical solutions*. In Proceedings of the 23rd ACM National Conference. 563-574.
- [7] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [8] Razvi, S., & Saatcioglu, M. (1999). Confinement model for high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, 125(3), 281-289.
- [9] Cusson, D., & Paultre, P. (1995). Stress-strain model for confined high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, 121(3), 468-477.
- [10] Sönmez, E., & Dönmez, C. (2019). Malzeme ve sayısal modelleme parametrelerinin betonarme elemanların deprem simülasyonları üzerindeki etkilerinin araştırılması. *In International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (SICEES)*. 8, 11.
- [11] Bedirhanoglu, I., & Ilki, A. (2004). Theoretical moment-curvature relationships for reinforced concrete Members and comparison with experimental data. Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering. Istanbul, Turkey: Bogazici University.
- [12] Özmen, H., İnel, M., & Bilgin, H. (2007). Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2).
- [13] Uzbaş, B. (2014). Beton İçin Geliştirilen Gerilme-Şekil Değiştirme Modellerinin Karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 17(3), 115-126.
- [14] Işık, E., Özdemir, M., Karaşin, İ., & Karaşin, A. (2019). Betonarme yapılarda kullanılan malzeme modellerinin karşılaştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 968-984.
- [15] Foroughi, S., & Yüksel, S. (2020). Investigation of the moment-curvature relationship for reinforced concrete square columns. *Turkish Journal of Engineering*, 4(1), 36-46.

- [16] Foroughi, S., Jamal, R., & Yüksel, S. (2021). TBDY 2018 ve Mander modeline göre sargılı betonun gerilme-şekil değiştirmesinin araştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 363-375.
- [17] Perform-3D, CSI. "Computers and structures Inc." (2005). Berkeley, CA, USA.
- [18] Matlab. "MATLAB Starter Application." MathWork (2020). USA.
- [19] Thomsen, J.H., & Wallace, J.W. (2004). Displacement-based design of slender reinforced concrete structural walls-experimental verification. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130(4), 618-630.
- [20] Tran, T.A. & Wallace, J.W. (2015). Cyclic testing of moderate-aspect-ratio reinforced concrete structural walls. *ACI Structural Journal*, 112(6), 653-666.

Araştırma/ Makalesi - Research Article

Polimerik Membranlarda Zeolit Kullanımının Pervaporasyon Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Zeolite Usage on Pervaporation Performance in Polymeric Membranes

Suat Kahya^{1*}

Geliş / Received: 28/02/2022

Revize / Revised: 27/06/2022

Kabul / Accepted: 27/06/2022

ÖZ

Bu çalışmada, pervaporasyon yöntemiyle dimetilformamit/su karışımının ayrılması amacıyla sodyum aljinat/poli (vinil alkol)/klinoptilolit kompozit membran elde edilmiştir. Çapraz bağlı membranlar, (FTIR), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termal gravimetrik analiz (TGA) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazları ile karakterize edilmiştir. Akı değeri (3,266 kg/m² sa) yüksek bulunmasına karşın, seçicilik için arzulanan sonuca ulaşamamıştır. Ağırlıkça % 20 DMF çözeltisi için aktivasyon enerjisi 3,720 kcal/mol olarak ölçülmüştür. Zeolit ilavesinin membran performansına etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Pervaporasyon, Dimetilformamit, Kompozit Membran, Aktivasyon Enerjisi*

ABSTRACT

In this study, sodium alginate/poly (vinyl alcohol)/clinoptilolite composite membrane was obtained for the separation of dimethylformamide/water mixture by pervaporation method. Cross-linked membranes were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), thermal gravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscope (SEM) instruments. Although the flux value (3.266 kg/m² h) was found to be high, the desired result for selectivity could not be achieved. The activation energy for the 20% by weight DMF solution was measured as 3,720 kcal/mol. The effect of zeolite addition on membrane performance was investigated.

Keywords- *Pervaporation, Dimethylformamide, Composite Membrane, Activation Energy*

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: suattkahya@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-1660-5771>)

Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye

I. GİRİŞ

Pervaporasyon, zor ayrılan karışımların ya da standart ayırma işlemlerinde daha fazla enerjinin gerektiği organik/su veya organik/organik karışımların ayrılmasında kullanılır. Bu karışımlardan bazı bileşenlerin geri kazanımında etkili olan pervaporasyonda, polimerik membran kullanımı yaygındır. Son zamanlarda, sadece polimerin tek başına kullanılmadığı kompozit membranlar da bu amaç için kullanılmaktadır. Yöntemde, besleme çözeltisi, karışım halindeki bileşenlerinden birini seçimli olarak geçiren membranın bir tarafına dokunmaktadır. Membranın alt kısmına vakum ya da düşürülmüş basınç uygulanır. Permeat buharı yoğunlaştırılarak ürünün geri dönüşümü sağlanır [1]. Bileşenin kısmi basıncı, denge buhar basıncının altına inmesi sonucu bileşen membrandan geçip buhar olarak ayrılır. Ayırma, membrandan geçen karışım bileşenlerinin permeasyon hızı ile orantılıdır [2]. Kaynama noktaları yakın olan bileşenlerden oluşan karışımları bilinen klasik ayırma işlemleriyle ayırmak zordur, bu tip karışımların ayrılması PV yöntemiyle yapılabilir [3]. PV, genellikle organik çözücülerden suyun giderilmesi ve ikili karışımların ayrılması amacıyla kullanılır [4,5].

Hidrofilik membran olan poli (vinil alkol) (PVA), sıklıkla organik çözücülerin pervaporasyon yöntemiyle dehidrasyonunda kullanılır. PVA kristalliğinin yüksek olması düşük membran geçirgenliğine sahip olmasına yol açar ve bu durum ayırma işlemlerinde PVA membranlarının etkinliğini kısıtlar [6,7].

Hidrofilik doğal bir polimer olarak sodyum aljinat (NaAlg); ucuzluk, kolay bulunabilme gibi avantajlara sahip olarak ayırma işlemlerinde sıkça kullanılmaktadır [8-10]. NaAlg'ın suda çözünürlüğünün fazla olması nedeniyle sulu çözeltilerin ayrılmasında NaAlg'ın kullanımı mümkün değildir. Bu yüzden, sulu çözeltilerin ayrılması, su sevmeyen polimer ile aşılama ve çapraz bağlama yoluyla ya da alaşım oluşturma aracılığıyla gerçekleştirilebilir.

Yapıları aydınlatılmış zeolit türlerinden olan klinoptilolit, mordenit, filipsit, şabazit, stilbit, ve analsim doğada bol miktarda bulunur, ofretit, paulingit, barrerit ve mazit ise nadiren görülür. Klinoptilolit, zeolit türleri içinde en fazla bulunan doğal zeolit olarak dünyada yaygın biçimde kullanıma sahiptir. Zeolit yapı olarak, alüminosilikat iskelet, değiştirilebilen katyonlar ve zeolitik su olmak üzere üç bileşene sahiptir [11]. Düzenli yapı, geniş iç yüzey alanı, homojen boyutlu gözenekler, termal kararlılığının iyi olması gibi birçok olumlu özelliklere sahip olan zeolitler, pek çok sanai, ziraî ve çevresel uygulama için kullanıma uygundur. Temiz olması, inert olması ve toksik olmaması onu vazgeçilmez yapmaktadır [12].

Membran performansını iyileştirmek için NaAlg, kitosan ve selüloz gibi doğal polimerlere zeolit katılmasıyla NaAlg'ın modifiye edilmesi gibi girişimler olmuştur. Günümüzde halen bu girişimler sürmektedir [13].

Bu çalışmada, NaAlg/PVA/Clt (Klinoptilolit) matriks membran kullanılarak dimetilformamit/su karışımlarının pervaporasyon yöntemiyle ayrılabilirliği incelenmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Kullanılan Malzemeler

Çalışmada, Sigma firmasının orta viskoziteli sodyum aljinatı kullanıldı. Merck firmasından alınan N,N-Dimetilformamit su ile çözelti haline getirilerek DMF/su ayrılabilirliği amacıyla kullanıldı. Kompozit membran hazırlamak için Sigma-Aldrich firmasına ait PVA (72.000 g/mol) kullanıldı. HCl (Carlo Erba) ve kütlece % 2,5'lik glutaraldehit (Merck) çapraz bağlama amacıyla kullanıldı. Klinoptilolit (zeolit) (Etibank A.Ş.,Balıkesir-Bigadiç) membran hazırlamada kullanıldı ve tanecik büyüklüğü yaklaşık olarak 38 µm olarak ölçüldü.Çapraz bağlı çözeltilere eklenen zeolit türü heulandit grubu üyesi olan klinoptilolit'dir. Balıkesir-Bigadiç yöresinden alınan klinoptilolit Etibank A.Ş.'den temin edilmiştir. Büyük tanecik boyutlu klinoptilolit öğütülmüş ve elekten geçirilerek ≈38 µm olanlar kullanılmıştır. Zeolit eklenmesinin amacı; zeolitlerin yüksek gözenekli, sağlam yapılı, seçici difüzyon ve moleküler özelliği nedeniyle ayırma işleminde akı ve seçicilik değerlerinde performans artışının olup olmadığının araştırılmasıdır.

B. Zeolit Dolgulu Membran Elde Edilmesi

Zeolit dolgulu membran eldesi için, poli (vinil alkol) ve sodyum aljinat çözeltileri karıştırıldı. Karıştırılan sodyum aljinat ve poli (vinil alkol) çözeltilerinden hacimce 80/20'lik sodyum aljinat/poli (vinil alkol) (NaAlg/PVA) çözeltisi hazırlandı. Elde edilen çözeltiye, ½ saat boyunca yayma işlemi sonrası klinoptilolit (zeolit) eklenerek 12 saat karıştırıldı. NaAlg/PVA çözeltisi baz alınarak kullanılan klinoptilolit kütlesi saptandı. Petri

kabına alınan karışım, 60 °C'deki etüvde 24 saat bekletilerek elde edilen membran kurutuldu. Bu membranlara glutaraldehit (v/v, % 2,5) ve HCl (v/v, % 3) ilave edilerek çapraz bağlama yapıldı. Çapraz bağlı çözeltiye, zeolit (%5-%20 arası) ilave edilerek, zeolit miktarına göre oluşturulan membranlar P-1'den başlayıp P-4'e kadar isimlendirildi. 60 ± 10 µm kalınlıktaki membranlar, pervaporasyonda kullanılabilecek kadar saf suda tutuldu.

C. IR Analizi

NaAlg, Clt, NaAlg/PVA ve NaAlg/PVA/zeolit membranlarının ince dökülmüş filmleri hazırlandı ve membranların spektrumları Mattson-1000 model spektrometre ile elde edildi.

D. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi

Azot atmosferinde (10 °C/dk. ısıtma hızı) kalorimetre ile membranların DSC eğrileri elde edildi.

E. Termal Gravimetrik Analiz (DTA)

TG/DTA analiz cihazı (Japon, Shimadzu) kullanılarak, membranların termal stabilitesi 25-400 °C sıcaklıkta taranarak (10 °C/dk. ısıtma hızı ve 20 ml/dk. N₂ gazı geçişi) ölçüldü.

F. SEM Analizi

Altınla kaplandıktan sonra, membranların mikrografları, JSM 6060 LV (Japon, JEOL) model SEM cihazı ile alındı.

G. Deneysel İşlemler

Çalışmada kullanılan membranlar hassas olarak lastik contalar yardımı ile pervaporasyon hücresine vidalanıp yerleştirildi. Pervaporasyon aparatı, sabitlenmiş sıcak su banyosuna konuldu ve düzenek hazır hale geldiği zaman vakum cihazına eklemelendi. Pervaporasyon hücresinin üst kısmına konulan farklı konsantrasyonlardaki dimetilformamit çözeltileri ile deneyler yapıldı. Peristaltik pompa, derişim polarlığını önlemek için kullanıldı ve dimetilformamit çözeltisi deney süresince bu pompadan geçirildi. Buhar fazda ayrılan ürün devar kaplarına daldırılmış tuzaklarda (sıvı azot içermekte) toplanarak tartıldı. Son olarak, Atago DD-5 tip dijital refraktometre ile ve kalibrasyon eğrisinden yardım alınarak ürünlerin dimetilformamit içerikleri tespit edildi.

Pervaporasyonda seçicilik faktörü aşağıdaki eşitlik ile verilir;

$$\alpha_{\text{sep.W/DMF}} = \frac{P_W / P_{\text{DMF}}}{F_W / F_{\text{DMF}}} \quad (1)$$

Burada, P_W, P_{DMF} üründeki A ve B bileşenlerinin mol kesirleri, F_W ve F_{DMF} ise besleme çözeltisindeki mol kesirlerini temsil eder.

$$J = \frac{W}{A t} \quad (2)$$

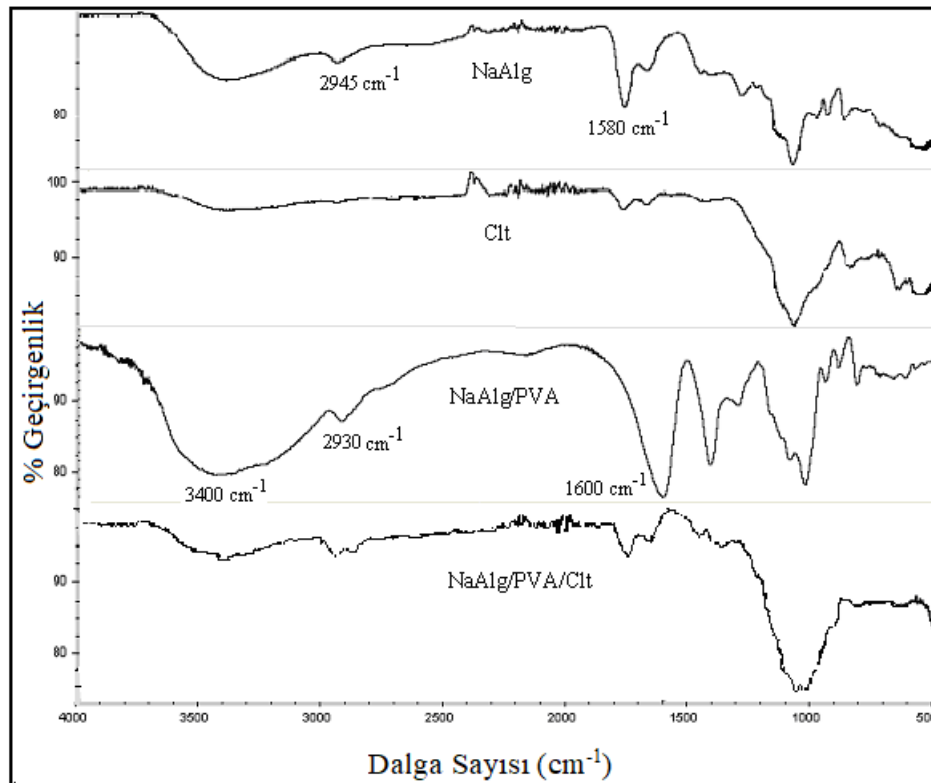
Burada, J yani akı, sıvının membrandan birim zamanda, birim alandan, hacim, kütle ya da mol cinsinden akış hızıdır. Akı, kütle cinsinden kg/m² sa, hacim cinsinden L/m² sa ve mol cinsinden mol/m² sa olarak ifade edilir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Membranların Karakterize Edilmesi

FTIR (Şekil 1), DSC (Şekil 2), TGA (Şekil 3) ve SEM (Şekil 4) ile zeolit dolgulu kompozit membranların karakterizasyonu yapıldı. Şekil 1'den hareketle 3000-3500 cm⁻¹'de görülen pik sodyum aljınatın O-H gerilme bandıdır. Sodyum aljınat/klinoptilolit membran için 3400 cm⁻¹'de gözlemlenen pik sodyum aljınat biriminin O-H gerilmesini gösterir. 1100 ve 1720 cm⁻¹'deki pikler sırayla sodyum aljınatın karboksilin simetrik ve asimetrik gerilmelerine aittir. 1050 - 1100 cm⁻¹ arasındaki sivri pik, sodyum aljınatın C-O gerilmesine veya saf klinoptilolit'deki (zeolit) silisyum-oksijen arasındaki bağlara ait olabilir. 600 ve 800 cm⁻¹'deki pikler klinoptilolit'in alüminyum-oksijen arasındaki gerilmesini temsil eder [14]. 3000-3600 cm⁻¹ dalga boylarında

görülen geniş bant, PVA'nın hidroksil gruplarının (-OH) bantları gerilimi sonucu oluşmuştur. 2850-2900 arası ve 1450 cm^{-1} 'deki titreşim bantları PVA'nın ara zincirindeki -CH gerilmeleri ile oluşmuştur. 1050-1170 cm^{-1} arasındaki pik C-C gerilmesi sonucu ya da karbon zincirinin aynı tarafındaki -OH grupları arasında moleküller içi hidrojen bağlarının varlığıyla açıklanabilir. NaAlg/PVA spektrumunda 3000-3500 cm^{-1} 'de görülen bant, NaAlg'ın ve PVA'nın yapısındaki -OH gruplarından dolayı oldukça genişlemiştir. NaAlg'ın spektrumundaki 1580 cm^{-1} 'deki pik C=O grubuna aittir. NaAlg/PVA'nın FTIR spektrumunda bu pikin 1600 cm^{-1} 'e kaydığı görülmektedir. Bu kayma, PVA ile NaAlg arasındaki etkileşimin olduğunu göstermektedir. C-H grubunun gerilim bantları PVA, NaAlg ve NaAlg/PVA membranlar için sırasıyla 2950, 2945 ve 2930 cm^{-1} olarak belirlenmiştir.

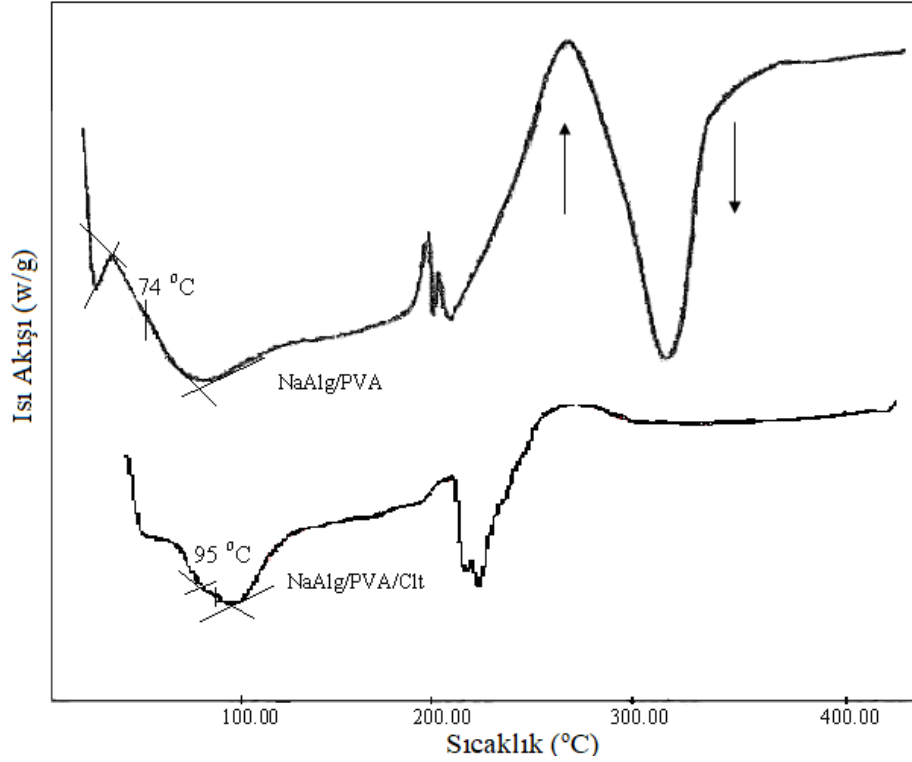


Şekil 1. NaAlg/PVA/Clt, NaAlg/PVA, NaAlg membranlarının ve klinoptilolit'in IR spektrumu

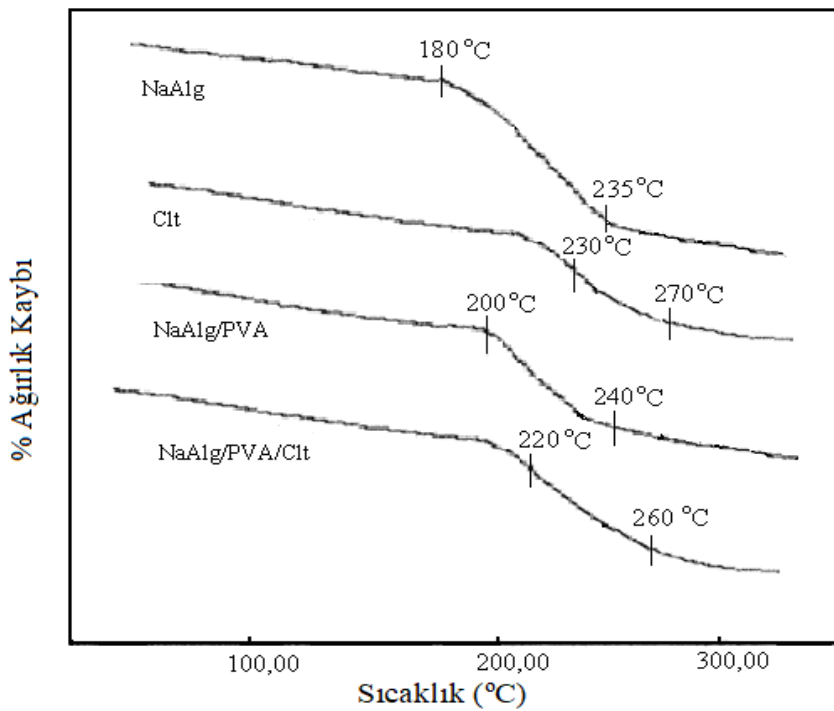
TGA ve DSC ile yapılan ısıl analiz çalışmalarının sonuçları Şekil 2 ve Şekil 3'de verildi. Şekil 2'de çalışmada kullanılan sodyum aljinat polimerinin T_g sıcaklığının 85 °C olduğu görülmektedir. Sodyum aljinat/klinoptilolit membran için T_g değeri 92 °C bulunmuştur. Erime noktaları keskin piklerde görülmektedir. Sodyum aljinat/klinoptilolit ve sodyum aljinatın T_g değerleri sırasıyla 195 ve 185 °C olarak belirlenmiştir. NaAlg polimeri 85 °C 'de T_g değerine sahiptir, NaAlg/PVA membranı için bu değer 73,5 °C olarak belirlenmiştir. PVA için ise T_g değeri 65 °C'dir. Bu sonuçlar PVA ve NaAlg arasında karışma olduğunu kanıtı olarak değerlendirilebilir. PVA'nın yapıya girmesiyle su molekülleri ile hidrojen bağı oluşur, membranın su tutuculuğu artar ve membran daha fazla şişer. Şişen membrandan aktarım daha kolay olur ve hem su hemde dimetilformamit molekülleri geçer. Neticede yapıya giren PVA miktarı arttıkça akı artar, suya karşı seçicilik azalır.

Klinoptilolit, sodyum aljinat ve NaAlg/Clt membranların mukayese edilmiş TG eğrileri Şekil 3 ile verilmiştir. Çapraz bağlanmış sodyum aljinatın ağırlık kaybının 180 °C'de başlayıp 235 °C'de en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. Çapraz bağlanmış sodyum aljinat/klinoptilolit ve NaAlg/PVA/Clt membran için ağırlık azalması 205 ve 220 °C'de başlamaktadır. Klinoptilolit dolgu membran için bozunmanın daha yüksek değerlere kaydığı görülmüştür. Klinoptilolit, membran geçişine katkı yaptığı buradan anlaşılabilir. Çapraz bağlı NaAlg/PVA/zeolit membran 220-260 °C aralığında ağırlık kaybına uğramıştır. NaAlg/PVA/Clt kompozit membranların termal stabilitesinde bir artış olduğuna dair bu ağırlık kaybından çıkarım yapabiliriz. Mallikarjunagouda ve Aminabhavi [15], pervaporasyon yöntemiyle toluen/alkol karışımlarının ayrılabilirliğini silikalit zeolit gömülü kitosan matris membran kullanarak incelemişler, çapraz bağlı saf kitosan için ağırlık

kaybının 240-280 °C ve 530-560 °C olmak üzere iki aşamada olduğunu raporlamışlardır. Çapraz bağlı silikalit yüklü kitosanın 270-330 °C ve 620-670 °C civarında iki ayrı ağırlık kaybı olduğunu belirtmişlerdir.

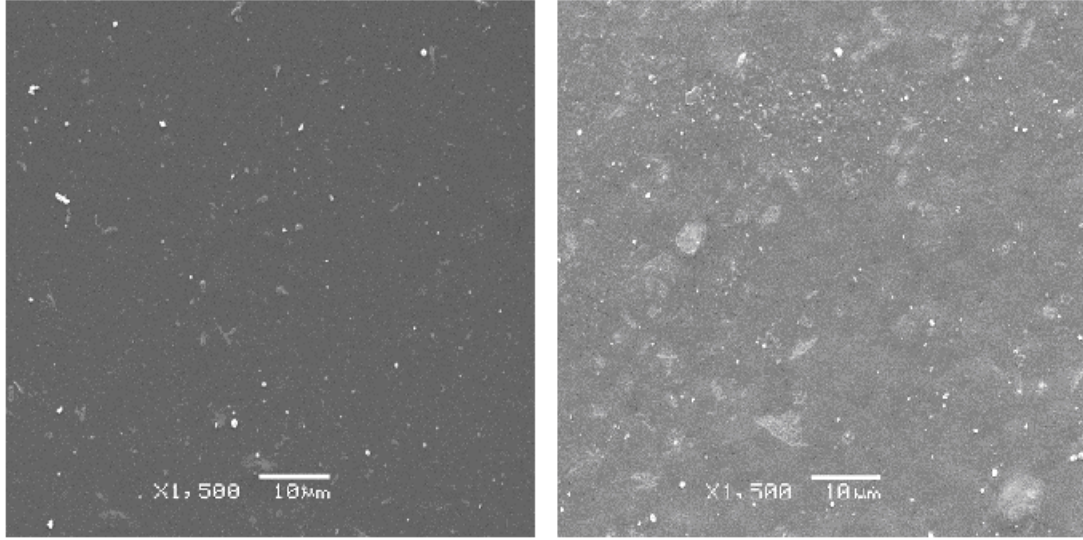


Şekil 2. NaAlg/PVA ve NaAlg/PVA/Clit kompozit membranların mukayeseli DSC eğrisi



Şekil 3. NaAlg, NaAlg/PVA, NaAlg/PVA/Clit membranların ve Clit'in karşılaştırmalı TG eğrisi

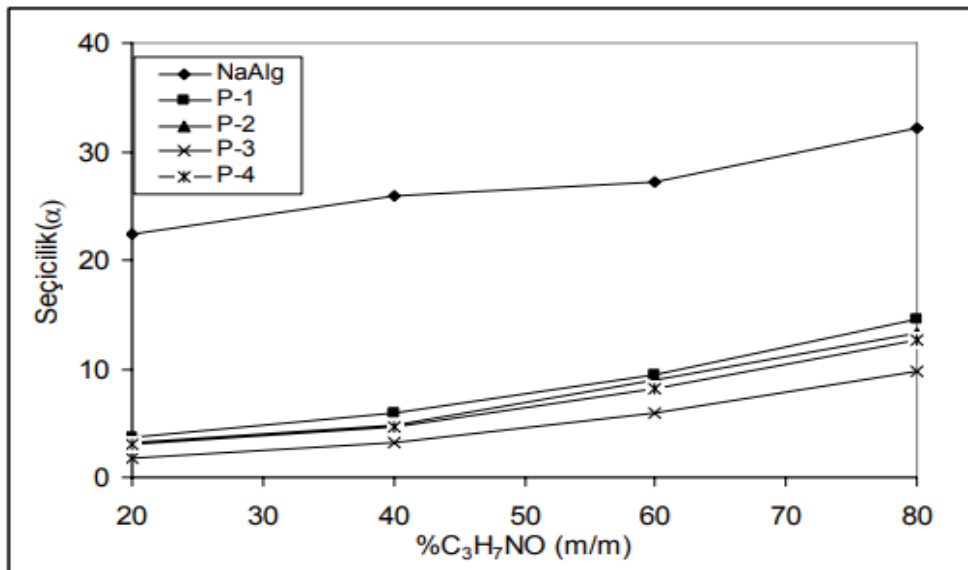
Şekil 4'de sodyum aljinat/klinoptilolit ve sodyum aljinat/PVA/klinoptilolit membranların yüzey yapısı SEM mikrografı alınarak verilmiştir. Morfolojik açıdan, sodyum aljinat/klinoptilolit membranın daha eşit dağılımlı ve az gözenekli olduğu görülmektedir.



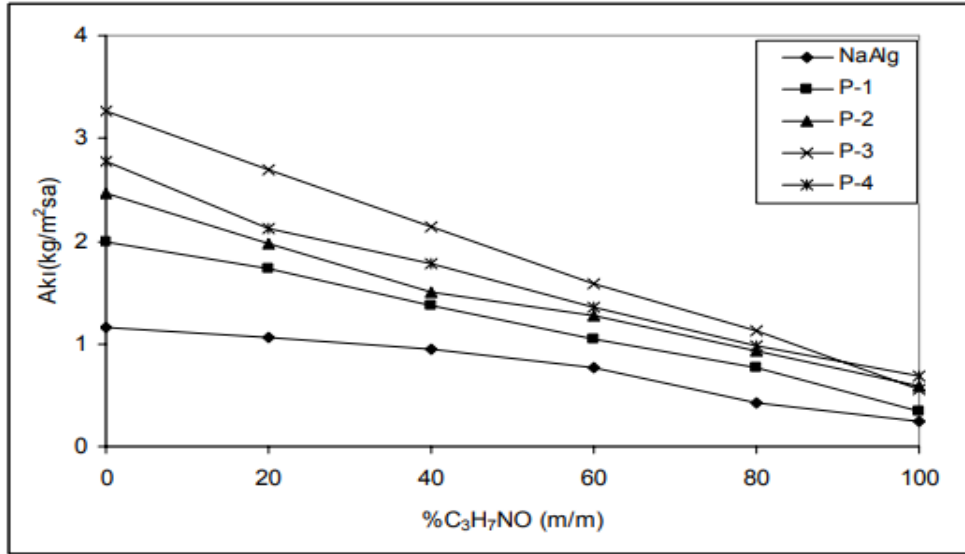
Şekil 4. NaAlg/PVA membrane ve NaAlg/PVA/Clt membranın 1500 büyütmeli SEM mikrograflar

B. Pervaporasyonda Besleme Çözeltisi Derişiminin Seçicilik ve Akıya Etkisi

Önceki çalışmamızda [16] kullandığımız 60 µm olan optimum membran kalınlığı bu çalışmada da kullanıldı. Değişik derişimlerde dimetilformamit-su karışımlarının ayrılabilirliği çalışılmış, sonuçlar Şekil 5 ve 6 ile verilmiştir. Zeolit dolgulu membranlara benzer şekilde PVA ilavesiyle yüksek dimetilformamit derişimi için toplam akıda azalma, seçicilikte ise artma görülmüştür. NaAlg/zeolit membranların akısından biraz daha yüksek akı değerleri elde edilmesine karşın seçicilikte bir miktar azalma görülmüştür. Huang ve arkadaşları [17], PVA/ZSM-5 karışık matris membranlar elde ederek izopropanol/su karışımlarının ayrılabilirliğini araştırmışlardır. Besleme çözeltisi derişiminin artmasıyla akının azaldığını, seçiciliğin ise arttığını raporlamışlardır. Bu çalışmada paralel sonuçlar elde edilmiştir.



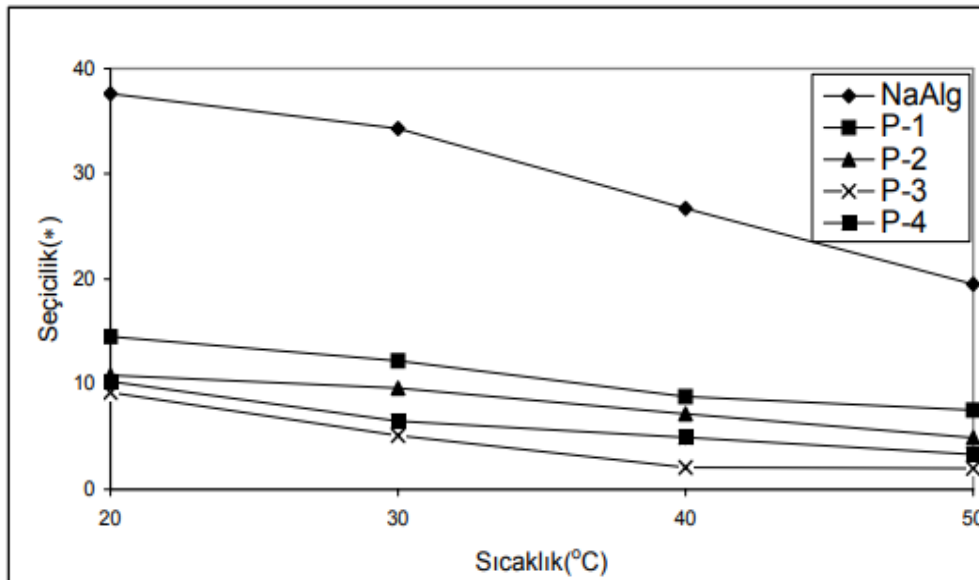
Şekil 5. NaAlg/PVA/zeolit membranlarda, pervaporasyon yönteminde seçiciliğinin bçd ile değişmesi



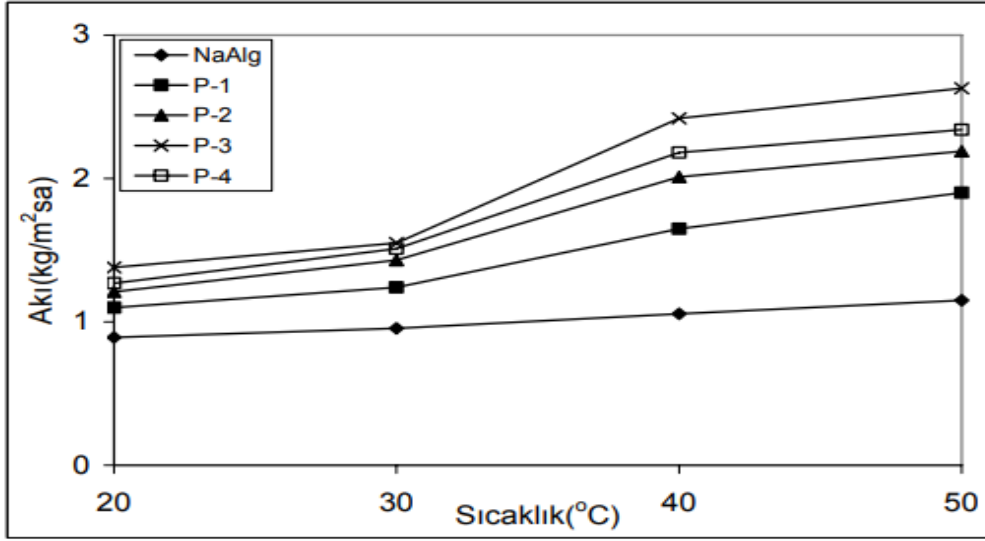
Şekil 6. NaAlg/PVA/zeolit membranlarda, pervaporasyon yönteminde akının bçd ile değişmesi

C. Pervaporasyon Yönteminde Çalışma Sıcaklığının Seçicilik ve Akıya Etkisi

Yöntemde sodyum aljinat/PVA/klinoptilolit membranlarla çalışma sıcaklığının seçicilik ve akıya etkisini incelemek amacıyla deneyler 20-50 °C arasında yapıldı. Elde edilen sonuçlar Şekil 7 ve 8 ile sunulmuştur. PVA ilavesiyle elde edilen klinoptilolit dolgulu sodyum aljinat membranların tamamında sıcaklık 20 °C' den 50 °C'ye yükseltildiğinde seçiciliğin düştüğü, akının ise çok hızlıca yükseldiği gözlemlenmiştir. Tsai ve arkadaşları [18], polielektrolit/hidrolize poliakrilonitril kompozit membran kullanarak etanolün ayrılabilirliğini çalışmışlar ve sıcaklık artışıyla akının arttığını, seçiciliğin azaldığını bildirmişlerdir. Bu çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

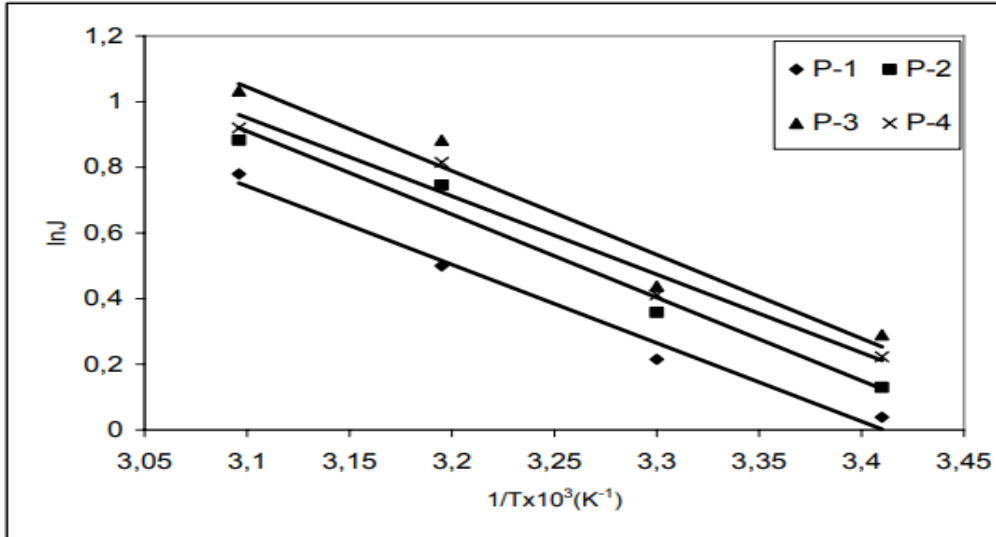


Şekil 7. NaAlg/PVA/Clt membranlar için pervaporasyon yönteminde seçiciliğin sıcaklık ile değişmesi



Şekil 8. NaAlg/PVA/zeolit membranlar için, pervaporasyon yönteminde akımın sıcaklık ile değişmesi

Membran performansına etki eden önemli parametrelerden biri sıcaklıktır. $\ln J-1/T$ grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Aktivasyon enerjisi, akı- $1/T$ grafiğinin eğiminden (%15 klinoptilolit (m/m) içeren sodyum aljinat membran için) yararlanılarak hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjisi 3,720 olarak bulunmuştur. Bu değer saf NaAlg için 6,75; NaAlg/PVA için 5,070 ve NaAlg/Zeolit için ise 4,290 olarak elde edilmiştir. Saf sodyum aljinat membran için 6,75 kcal/mol olarak bulunan aktivasyon enerjisi, klinoptilolit dolgulu membrandan daha yüksek değere ulaşmıştır. Dolgulu polimerik membranlar için aktivasyon enerjisinin az olması istenir. Aktivasyon enerjisinin düşük olması akımın yüksek olacağına işaret eder. Elde edilen sonuçlar bunu teyit etmektedir.



Şekil 9. NaAlg/PVA/Clt membranlar için, $\ln J$ 'nin $1/T$ ile değişmesi

IV. SONUÇLAR

Çalışmada DMF-su karışımlarının ayrılabilme durumu gkutaraldehit ile çapraz bağlı NaAlg/PVA/Clt membranlar kullanılarak pervaporasyon yöntemiyle incelendi. Açıklanan veriler; 40 °C sabit sıcaklık, 0,5 mbar basınç, 60 µm membran kalınlığı ve 80/20 (v/v) NaAlg/PVA oranında değişik kütle yüzdelisinde zeolit içeren membranlar kullanılarak elde edilmiştir. Önceki çalışmalarımıza [16,19,20] göre en yüksek akı değerine ulaşılmıştır (3,266 kg/m² sa), geçiş aktivasyon enerjisi P-3 membran için 3,720 kcal/mol (saf NaAlg 6.750

kcal/mol) düşük bulunmuştur. Kompozit membranlar için düşük aktivasyon enerjisi daha önce belirttiğimiz gibi istenen bir durumdur. Aktivasyon enerjisinin düşük olması akının yüksek olacağına işaret etmektedir. DMF derişiminin artmasıyla seçiciliğin arttığı, akının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. % 15 zeolit içeren membran için akı değeri 3,266 kg/m²sa olarak bulunmasına karşın seçicilik değeri 2,45 olarak bulunmuştur. Düşük DMF derişiminde (yüksek su derişiminde) membranda amorf bölgelerin artması daha fazla şişmeye neden olur. Şişmenin fazla olması polimer zincirlerinin esnekliğinin artmasına yol açar ve membrandan difüzyon geçişi azalır ve neticede seçicilik düşer. Başka bir neden suyun moleküler boyutunun (0,26 nm) DMF'den (0,55nm) küçük olması olabilir. Bu durum yüksek su derişiminde seçiciliğin düşük bulunmasının nedeni olabilir. Ayrıca, yüksek DMF derişiminde membranın şişmesinin artması DMF molekülleriyle Clt matriks arasındaki etkileşimle de ilgili olabilir. DMF, yüksek dipol momente (3,85 D) sahip olduğundan Clt ve DMF'in daha güçlü etkileşimde olmasını beklemek mümkündür. Bu da seçiciliğin düşük olmasının nedenlerinden birisi olabilir

KAYNAKLAR

- [1] Richardson, J. F., Harker, J. H., & Backhurst, J. R. (2002). Coulson and Richardson's Chemical Engineering. *Butterworth-Heinemann, Oxford*, 2(5), 437-474.
- [2] Feng, X. & Huang, R.Y.M. (1997). Liquid separation by membrane pervaporation: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36, 1048-1066.
- [3] Athayde, A. L., Baker, R. W., Daniels, R., Le, M. H., & Ly, J. H. (1997). Pervaporation for wastewater treatment. *Chemtech*, 1, 34-39.
- [4] Aminabhavi, T. M., Naidu, B. V. K., Sridhar, S., & Rangarajan, R. (2005). Pervaporation separation of water-isopropanol mixtures using polymeric membranes: Modeling and simulation aspects. *Journal of Applied Polymer Science*, 295, 1143-1153.
- [5] Algezawi, N., Şanlı, O., Aras, L., & Asman, G. (2005). Separation of acetic acid-water mixtures through acrylonitrile grafted poly(vinyl alcohol) membranes by pervaporation. *Chemical Engineering Processing*, 44, 51-58.
- [6] Rhim, J. M., Sohn, M. Y., Joo, H. J., & Lee, K. H. (1993). Pervaporation separation of binary organic aqueous liquid mixtures using crosslinked PVA membranes. I. Characterization of the reaction between PVA and PAA. *Journal of Applied Polymer Science*, 50, 679-684.
- [7] Nam, S. Y., Chun, H. J., & Lee, Y. M. (1999). Pervaporation separation of water-isopropanol mixture using carboxymethylated poly(vinyl alcohol) composite membranes. *Journal of Applied Polymer Science*, 72, 241-249.
- [8] Kittur, A. A., Tambe, S. M., Kulkarni, S. S., & Kariduraganavar, M. Y. (2004). Pervaporation separation of water-acetic acid mixtures through NaY zeolite incorporated sodium alginate membranes. *Journal of Applied Polymer Science*, 94, 2101-2109.
- [9] Kurkuri, M. D., Toti, U. S., & Aminabhavi, T. M. (2002). Synthesis and characterization of blend membranes of sodium alginate and poly(vinyl alcohol) for the pervaporation separation of water + isopropanol mixtures. *Journal of Applied Polymer Science*, 86, 3642-3651.
- [10] Toti, U. S. & Aminabhavi, T. M. (2004). Different viscosity grade sodium alginate and modified sodium alginate membranes in pervaporation separation of water + acetic acid and water + isopropanol mixtures. *Journal of Membrane Science*, 228(2), 199-208.
- [11] Wang, S. & Peng, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment, Department of Chemical Engineering, Curtin University of Technology, Australia, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, *Chemical Engineering Journal*, 11-24.
- [12] Nagrockiene, D. & Girskas, G. (2016). Research into the properties of concrete modified with natural zeolite, Addition, a Department of Building Materials, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, Research Institute of Buildings Materials and Products, Vilnius Gediminas Technical University. *Construction and Building Materials* 113, 964-969.
- [13] Bhat, S. D. & Aminabhavi, T. M. (2006). Novel sodium alginate composite membranes incorporated with SBA-15 molecular sieves for the pervaporation dehydration of aqueous mixtures of isopropanol and 1,4-dioxane at 30 °C. *Microporous Mesoporous Materials*, 91, 206-214.
- [14] Naidu, B. V. K., Bhat, S. D., Sairam, M., Wali, A. C., Sawant, D. P., Halligudi, S. B., Mallikarjuna, N. N., & Aminabhavi, T. M. (2005). Comparison of the pervaporation separation of a water-acetonitrile mixture with zeolite-filled-polyaniline semi interpenetrating polymer network membranes. *Journal of Applied Polymer Science*, 96, 1968- 1978.

- [15] Mallikarjunagouda, B. P. & Aminabhavi, T. M. (2008). Pervaporation separation of toluene/alcohol mixtures using silicalite zeolite embedded chitosan mixed matrix membranes. *Separation and Purification Technology*, 62, 128-136.
- [16] Kahya, S., Kondolot Solak, E., & Şanlı, O. (2010). Sodium alginate/poly(vinyl alcohol) alloy membranes for the pervaporation, vapor permeation and vapor permeation with temperature difference separation of dimethylformamide/water mixtures: A comparative study. *Vacuum*, 84, 1092-1101.
- [17] Huang, Z., Ru, X., Zhu, Y. T., Guo, Y., & Teng, L. (2019). Poly(vinyl alcohol)/ZSM-5 zeolite mixed matrix membranes for pervaporation dehydration of isopropanol/water solution through response surface methodology. *Chemical Engineering Research and Design*, 144, 19-34.
- [18] Tsai, H. A., Hsu, C. Y., Huang, S. H., Lee, K. R., & Hung, W. S. (2018). The preparation of polyelectrolyte/hydrolyzed polyacrylonitrile composite hollow fiber membrane for pervaporation. *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 623-633.
- [19] Kahya, S., Şanlı, O., & Çamurlu, E. (2011). Crosslinked sodium alginate and sodium alginate-clinoptilolite (natural zeolite) composite membranes for pervaporation separation of dimethylformamide-water mixtures: A comparative study. *Desalination and Water Treatment*, 25, 297-309.
- [20] Kahya, S. & Şanlı, O. (2014). Separation of dimethylformamide/water mixtures through sodium alginate and sodium alginate/clinoptilolite composite membranes by vapor permeation with and without feed-membrane temperature difference. *Desalination and Water Treatment*, 52, 3517-3525.

Araştırma Makalesi –Research Article

İkinci Ürün Silajlık Mısır Çeşitlerinde Ekonomik Analiz ve Sulama Suyu Kullanım Etkinliğinin Belirlenmesi

Economic Analysis and Determination of Irrigation Water Use Efficiency in Second Crop Silage Corn Varieties

Murat Karaer^{1*}, Yusuf Murat Kardeş², Erdem Gülümser³, Hüseyin Tevfik Gültaş⁴,
Hanife Mut⁵

Geliş / Received: 09/03/2022

Revize / Revised: 13/04/2022

Kabul / Accepted: 20/04/2022

ÖZ

Çalışmada ikinci ürün olarak yetiştirilen farklı FAO olum gruplarına sahip 8 adet silajlık mısır çeşidinin (ADA-523, AGA, Keravnos, Simpatico, Kilowatt, P9027, SY-Gladius, DKC6308) silaj verimi, net gelir, sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) ve birim su hacmine göre net gelir değerleri belirlenmiştir. Bilecik ekolojik koşullarında 2021 yılında yürütülen çalışma Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre 3 tekrarlı yürütülmüştür. Vejetasyon dönemi boyunca sulama suyu miktarları geçici çeşitlerde 340.34 mm, erkenci çeşitlerde ise 294.05 mm olarak gerçekleşmiştir. En yüksek silaj verimi ve net gelir FAO olum grubu göre geçici olan DKC6308'den sırasıyla 73.60 t ha⁻¹ ve 24597.6 TL ha⁻¹ olarak elde edilmesine rağmen, en yüksek sulama suyu kullanım etkinliği ve birim su hacmine göre net gelir ise FAO olum grubu erkenci çeşit olan P9027'den sırasıyla 24.15 kg m⁻³ ve 7.88 TL m⁻³ olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak Bilecik ekolojik koşullarında verim ve net gelir açısından DKC6308 silajlık mısır çeşidi ön plana çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler- Bilecik, Sulama Suyu Verimliliği, Net Gelir, Silaj Verimi

ABSTRACT

In the study, silage yield, net income, irrigation water use efficiency (IWUE), and net income per unit water volume on 8 silage maize varieties (ADA-523, AGA, Keravnos, Simpatico, Kilowatt, P9027, SY-Gladius, DKC6308) belonging to different FAO maturity group grown as the second crop were determined. The study, which was carried out in Bilecik ecological conditions in 2021, was carried out in 3 replications according to the randomized blocks design with three replications. The amount of irrigation water during the vegetation period was 340.34 mm in late varieties and 294.05 mm in early varieties. Although the highest silage yield and net income were obtained from DKC6308, which is a late variety according to the FAO maturity group, as 73.60 t ha⁻¹ and 24597.6 TL ha⁻¹, respectively, the highest irrigation water usage efficiency and net income according

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: murat.karaer@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1920-181X>)

Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik, Türkiye

²İletişim: yusufmurat.kardes@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7144-9612>)

Tarla Bitkileri Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik, Türkiye

³İletişim: erdem.gulumser@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6291-3831>)

Tarla Bitkileri Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik, Türkiye

⁴İletişim: huseyin.gultas@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4987-8522>)

Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik, Türkiye

⁵İletişim: hanife.mut@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5814-5275>)

Tarla Bitkileri Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik, Türkiye

to unit water volume. 24.15 kg m⁻³ and 7.88 TL m⁻³ were obtained from P9027, which is an early variety according to FAO maturity group, respectively. As a result, DKC6308 silage corn variety came to the forefront in terms of yield and net income in Bilecik ecological conditions.

Keywords- *Bilecik, Irrigation Water Productivity, Net Income, Silage Yield*

I. GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusuyla birlikte gıdaya olan talepte her geçen yıl artmaktadır. Bu yüzden hem bitkisel hem de hayvansal gıda üretiminde verimliliğin artırılması önem arz etmektedir. Hayvansal üretimin verimli bir şekilde sürdürülebilmesi içinde hayvan beslenmesinde önemli olan kaba yem kaynaklarının artırılması gerekmektedir. Çünkü ülkemizdeki hayvancılığın en büyük problemi, hayvan varlığını yüksek olmasına rağmen hayvan beslemede kullanacağımız kaliteli kaba yemlerin yetersiz olmasıdır.

Kaba yem ihtiyacının karşılanabilmesi için en önemli kaynaklardan birisi mera alanlarıdır. Bu oran Türkiye'nin mevcut ihtiyacı olan oranın ancak %10'luk kısmını karşılamaktadır. Bu yüzden ihtiyacımız olan ve mera alanlarından karşılayamadığımız kaba yem açığını silajlık bitkilerden sağlayabiliriz. Ülkemizde kaba yem ihtiyacını karşılamak için yetiştirilen silajlık bitkilerin başında mısır gelmekte ve sorgum, sudan otu, sorgum-sudan otu melezleri, yonca, fiğ, korunga, yem şalgamı, yem bezelyesi gibi yem bitkileri ile arpa, buğday, yulaf gibi yeşil ota yönelik tahıllar izlemektedir. Silajlık mısır üretimi 25 499 870 ton ile kaba yem üretiminin yaklaşık %46'lık kısmını karşılamaktadır [1]. Bu verilerde silajlık mısır üretiminin Türkiye'nin hayvansal üretimi açısından ne kadar önemli bir ürün olduğunu ortaya koymaktadır.

Dünyada 150'den fazla ülkede tarımı yapılan mısır (*Zea mays* L.) bitkisi çok farklı amaçlar için yetiştirilse de en çok hayvan besleme amacıyla üretimi yapılmaktadır. Bu oran dünya genelinde %73, gelişmiş ülkelerde ise % 90, ülkemizde ise % 70'tir [2]. Türkiye'de yaklaşık 470 bin ha'lık alanda silajlık mısır ekimi yapılmakta ve bu alandan elde edilen toplam üretimde 23.2 milyon ton civarındadır. 1 dekar alan elde edilen silaj verimi ise ortalama 4915 kg'dır [3]. Kaliteli kaba yem kaynağı olması, hem süt verimi hem de kalitesinde artış sağladığı için silajlık mısıra olan talep ve buna bağlı olarak üretim alanı her geçen yıl artmaktadır.

Silajlık mısır yetiştiriciliğinde genelde ikinci ürün sistemi yaygındır. Ana ürün olarak ekilen mısırların da koçanları haşlamalık olarak pazarlanmakta, geriye kalan kısımlardan silajı yapılmaktadır. Ancak bu tür bir uygulamayla hazırlanan silajın besleme değeri düşük olmaktadır. Zira yapılan araştırmalar, mısır koçanının toplam hâsıl veriminin %50'sini besleme değerinin de %70'ini oluşturduğunu belirtmektedir [4].

Tarımda ikinci ürün üretimi tarım alanlarının daha iyi değerlendirilmesi ve birim alandan daha çok tarımsal üretim elde edilmesi bakımından önem arz etmektedir. İklimin uygun ve vejetasyon süresinin yeterli olduğu bölgelerde, ana ürünün hasadından sonra ekilen ikinci ürün aynı alandan yıl içerisinde bir ürün daha almayı sağlamaktadır. Silajlık mısır da ikinci ürün tarımına uygun türlerdendir. Daha kısa dönemde olgunlaşan erkenci çeşitlerin olması, yaz döneminde sulama ile birlikte kısa sürede verim alınabilmesi gibi özellikleri sayesinde avantajlı olan silajlık mısır, ülkemizde özellikle tahıllar veya baklagil bitkileri üretimi sonrasında ikinci ürün olarak sıklıkla tercih edilmektedir [5].

Aynı alanda yapılan ana ürün ve ikinci ürün tarımında ekim tarihi, hasat tarihi, vejetasyon süresi, toprak sıcaklığı, gece-gündüz hava sıcaklıkları, nem oranı ve yağış gibi önemli etmenler farklılık gösterecektir. İkinci ürün döneminde oluşan farklı koşullar, çeşitlerin verimliliğini ve silaj kalitesini önemli ölçüde etkileyebilen etmenlerdir. Bu nedenle ikinci ürün silajlık mısır çalışmalarının ayrıca yürütülmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi önemlidir.

Diğer taraftan mısır verimini arttırmanın en önemli unsurlarından biri yetiştiricilik yapılacak bölgenin ekolojisine uygun mısır çeşitlerinin belirlenmesidir. Bu noktada FAO olum grupları önem teşkil etmektedir. Yetiştiricilik yapılacak alanın ekolojik özelliklerine göre 100 ile 800 arasında değişen FAO gruplarına bakılarak o bölgeye en uygun mısır çeşitlerinin seçimi yapılabilmektedir. Bu gruplar arasında yer alan mısır çeşitlerinin her birinin sıcaklık istekleri farklı olup, FAO 100 ve 200 grubunun toplam sıcaklık isteği 800-1000 °C arasında iken FAO 700 ve 800 grubunun sıcaklık isteği 1500-1600 °C'lere kadar yükselmektedir [6].

Yaptığımız bu çalışmada farklı ikinci ürün silajlık mısır çeşitlerinden elde edilen silaj verimi, sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE), net gelir ve birim sudan elde edilen net gelir değerleri karşılaştırılmış ve bölgeye en uygun mısır çeşitleri belirlenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Deneme Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi arazisinde 2021 yılında ikinci ürün olarak yürütülmüştür. Denemede kullanılan silajlık mısır çeşitleri ve FAO olum grupları Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmada ekimini yaptığımız ADA-523 ve AGA çeşitlerinin sahibi Sakarya Mısır Araştırma Enstitüsü, Keravnos, Simpatico ve Kilowatt çeşitlerinin sahibi KWS Türk Tarım ve Ticaret A.Ş., P9027 çeşiti sahibi Pioneer Tohumculuk San. Tic. A.Ş., SY-Gladius çeşitinin sahibi Sygenta Tohumculuk Ticaret Ltd. Şti., DKC6308 çeşitinin sahibi ise Bayer Crop Science Türkiye firmalarıdır.

Tablo 1. Araştırmada kullanılan mısır çeşitleri ve FAO olum grupları

Çeşit Adı	FAO Olum Grubu
ADA-523	650
AGA	650
Keravnos	700
Simpatico	250
Kilowatt	700
P9027	250
SY-Gladius	600
DKC6308	600

Çalışmanın yapıldığı Bilecik ili Thornthwaite iklim sınıflandırmasına göre yarı kurak iklim sınıfında yer almakta olup, uzun yıllık ve vejetasyon dönemine ait sıcaklık, yağış ve nem değerleri de Tablo 2’de verilmiştir. Tabloda yer alan iklim verileri Bilecik Meteoroloji Bölge Müdürlüğü’nden alınmıştır.

Tablo 2. Bilecik ili uzun yıllar ve 2021 yılı vejetasyon dönemine ait iklim verileri

Aylar	Sıcaklık (°C)		Yağış (mm)		Nem (%)	
	UYO*	2021	UYO*	2021	UYO*	2021
Temmuz	22.1	23.8	19.1	35.4	58	60
Ağustos	22.1	23.9	13	9,1	57	56
Eylül	18.5	17.5	22.5	25.7	61	66
Ekim	13.9	12.9	40.2	12	69	70
Kasım	9.1	10.8	36.7	38.4	70	71
Ortalama	21,0	17,8	26,3	24,1	63	64,6
Toplam			131,5	120,6		

UYO*Uzun yıllık ortalama değerler

Çalışmanın yapıldığı alanının toprak bünye sınıfı killi tınlı olup, toprak özelliklerine ait değerler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Deneme alanına ait toprak örneklerinin bazı özellikleri

Derinlik (cm)	PH	Tuz (%)	Kireç (%)	Organik Madde	Bitkilerde Yarayışlı		Hacim ağırlığı	Tarla kapasitesi
					Fosfor P ₂ O ₅ (kg da ⁻¹)	Potasyum K ₂ O (kg da ⁻¹)		
0-30	7.77	0.007	6.55	1.18	26.74	116.28	1,26	27,87
30-60	7.81	0.009	6.55	1.24	27.45	91.59	1,21	24,57
60-90	7.71	0.010	5.82	2.07	21.02	96.42	1,27	26,67

Deneme tesadüf bloklarında deneme desenine göre 10.07.2021 tarihinde 3 tekrarlı olarak kurulmuştur. Ekim, bitki sıra arası 70 cm sıra üzeri ise 17 cm olacak şekilde mibzer ile yapılmıştır. Her bir deneme parselinde 4 bitki sırası olup her bitki sırasına bir damla borusu çekilmiş ve parsel uzunlukları 5 metre genişliği ise 2,8 metre olarak düzenlenmiştir. Tek bir parselin toplam alanı 14 m² (5×2,8) olup her parsel arasında 1 m, bloklar arasında ise 2 m mesafe boşluk bırakılmıştır. Ekim ile birlikte bitkilere dekara 8 kg fosfor (P₂O₅) gelecek şekilde DAP (%18-46-0) ve bitkiler yaklaşık 40-50 cm boya geldiklerinde dekara 10 kg azot (N) gelecek şekilde üre gübresi verilmiştir. Sulamalar damla sulama yöntemiyle yapılmış olup, her sulamada uygulanacak sulama suyu miktarı deneme alanına yerleştirilen A sınıfı buharlaşma kabından eksilen su miktarının ölçülmesiyle 10 gün aralıklarla denklem 1'deki gibi hesaplanmıştır [7]. Sulamalara hasat tarihlerinden 7 gün önce son verilmiştir. Deneme alanında üretim sezonu boyunca yabancı ot mücadelesi için 2 kez el çapası yapılmıştır. Hasat işlemleri silajlık mısır için en uygun zaman olan hamur olum döneminde yapılmış olup, hasat tarihleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Silajlık mısır çeşitlerinin hasat tarihleri

Çeşit Adı	2021
ADA-523	09.11.2021
AGA	09.11.2021
Keravnos	09.11.2021
Simpatico	14.10.2021
Kilowatt	14.10.2021
P9027	14.10.2021
SY-Gladius	09.11.2021
DKC6308	09.11.2021
ADA-523	09.11.2021
ADA-523	09.11.2021

Silaj verimini belirlerken hasat, silolama ve yemleme aşamalarında bazı kayıplar meydana gelebilmektedir. Bu kayıplar dikkate alınarak hesaplamalar yeşil ot verimi %25 oranında azaltılarak yapılmıştır [8].

$$I = E_p \times k_p \times k_c \times A \quad (1)$$

Denklemden; I: Sulama suyu miktarı (l), A: Parsel alanı (m²), E_p: Her sulama aralığında eksilen nem miktarı(mm), k_p: Kap katsayısı, k_c: bitki katsayısını ifade etmektedir.

Eşitlikteki kullanılan k_p katsayısı her parselde aynı miktarda su uygulanacağı ve farklı sulama suyu seviyeleri kullanılmayacağı için 1 alınmıştır. k_c katsayısını belirlerken Türkiye'de Sulanan Bitkilerin Bitki Su Tüketim Rehberinden yararlanılmış ve buradaki rakamlara göre k_c katsayıları başlangıç periyodunda 0.31 gelişme periyodunda 1.19, son periyotta ise 0.89 olarak alınmış ve hesaplamalar bu rakamlara göre yapılmıştır[9].

Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) bitkiye uygulanan birim su başına elde edilen verimi veya toprak üstü kuru madde verimini göstermektedir. Çalışmada sulama suyu kullanım etkinliği, silaj veriminin uygulanan sulama suyu miktarına bölünmesiyle Denklem 2'deki gibi belirlenmiştir [10].

$$IWUE = Y / I \quad (2)$$

Eşitlikte; IWUE: Sulama suyu kullanım etkinliği (kg m^{-3}), Y: Verimi (kg da^{-1}), I: Sulama suyu miktarını (mm) ifade etmektedir.

Birim sulama suyundan elde edilen net gelir, birim alandan elde edilen net gelirin aynı alana uygulanan toplam sulama suyu miktarına veya hacmine oranlanmasıyla belirlenmektedir. Çalışmada birim sudan elde edilen net gelir Denklem 3'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır [11].

$$\text{BSNG} = \text{NG} / \text{SS} \quad (3)$$

Denklemden; BSNG: Birim sudan elde edilen net geliri (TL m^{-3}), NG: Net geliri (TL ha^{-1}), SS: Sulama suyu miktarını ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) ifade etmektedir.

Ekonomik analizler denemenin yapıldığı 2021 yılına ait fiyatlara göre yapılmıştır. Arazi hazırlığı, tohum bedeli, gübre bedeli, ekim bedeli, çapalama, sulama ve hasat bedeli çalışmada yapılan toplam masrafları oluşturmuştur. Çalışmada bazı masraflar ortak olup bazıları değişkenlik göstermiştir. Çalışmada kullanılan çeşitlere göre tohum ve sulama masrafları değişkenlik göstermiştir. FAO olum gruplarına göre erkenci çeşitlere daha az sulama suyu uygulandığı için bu grupta yer alan çeşitlerin sulama suyu masrafları daha az olmuştur.

Her bir çeşit için yapılan su maliyeti, sezon boyunca mısır bitkisine verilen toplam sulama suyu miktarı ile sulama suyunun bir hacim fiyatıyla çarpılmasıyla bulunmuştur. Toplam sulama maliyeti ile ilgili ekonomik analiz ve değerlendirmeler; toplam sulama suyu, sistem işletme giderleri, üretim maliyetleri ve toplam sulama süresi kullanılarak yapılmıştır. Sulama işgücü maliyeti sulama süresine ve uygulanan sulama suyu miktarına göre hesaplanmıştır.

Hesaplamalar 1 hektar üzerinden, gelir ve gider değerlerine bakılarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan her bir silajlık mısır çeşidine ait girdiler ayrı ayrı hesaplanmış ve bütün yapılan masraflar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Maliyet hesabında kullanılan ortak ve değişken değerler*

Çeşit	Keravnos	Aga	Ada523	Gladius	DKC6308	Simpatico	Kilovat	P9027
Arazi hazırlığı bedeli (TL ha-1)	500	500	500	500	500	500	500	500
Tohum Bedeli (TL ha-1)	1700	750	750	1800	1600	1700	1700	2000
Gübre Bedeli (TL ha-1)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Ekim Bedeli (TL ha-1)	300	300	300	300	300	300	300	300
Çapalama Bedeli (TL ha-1)	700	700	700	700	700	700	700	700
Toplam Sulama Masrafları (TL ha-1)	1222.43	1222.43	1222.43	1222.43	1222.43	1056.17	1056.17	1056.17
Hasat (TL ha-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Toplam Masraf (TL ha-1)	8622.43	7672.43	7672.43	8722.43	8522.43	8456.17	8456.17	8756.17
Silaj kg/TL	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45

*:Bilecik İl Tarım ve Orman Müdürlüğü 2021 değerler

A. Verilerin Değerlendirilmesi

Elde edilen sonuçların istatistiksel analizlerinde Minitab 19 paket programı kullanılmıştır. Sonuçlar varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiş ve elde edilen ortalama değerlerin $p < 0.05$ önem düzeyinde aralarındaki farklılıkları değerlendirmek üzere LSD çoklu dağılım testi yapılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan istatistiksel analiz sonucunda silaj verimi, sulama suyu kullanım etkinliği ve birim sudan elde edilen net geliri bakımından çeşitler arasında %5 önemlilik seviyesinde farklılıklar belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda çeşitlere göre silaj verimleri farklılık göstermiş olup, verimler 73.60-29.90 t ha⁻¹ arasında değişmiştir. En yüksek silaj verimi FAO olum grubu geççi olan DKC6308, en düşük silaj verimi ise FAO olum grubu erkenci olan Simpatico çeşidinden elde edilmiştir. DKC6308'den sonra en yüksek verim erkenci bir çeşit olan P9027'den (71.00 t ha⁻¹) elde edilmiş ve DKC6308 ile aralarında istatistiksel olarak önemli bir fark olmadığı gözlenmiştir. Diğer bir erkenci çeşit olan Kilovattan silaj verimi (52.30 t ha⁻¹) ise DKC6308'den sonraki bütün diğer geççi çeşitlere göre daha yüksek elde edilmiştir (Tablo 5). Silaj verimi çeşide göre değişmekle birlikte farklı ekolojik koşullar, rakım, ekim ve hasat tarihi, ekim sıklığı ve arazinin sulanabilirlik durumu gibi faktörlerde silaj verimini olumlu ya da olumsuz etkileyebilmektedir.

Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) suyun fiziksel üretkenliği olarak da adlandırılmaktadır. Çalışmada sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) değerleri de çeşitlere göre farklılık göstermiş ve 10.16-24.15 kg m⁻³ arasında değişmiştir. En yüksek IWUE değeri 24.15 kg m⁻³ olarak P9027 erkenci çeşidinden, en düşük IWUE değeri ise 10.16 kg m⁻³ olarak Simpatico erkenci çeşidinde gözlenmiştir. En yüksek silaj veriminin elde edildiği DKC6308 erkenci çeşidinin IWUE değeri 21.62 kg m⁻³ olarak hesaplanarak en yüksek ikinci değer olmuş ve P9027 erkenci çeşidiyle aralarında istatistiksel olarak önemli bir fark bulunmamıştır. Erkenci bir çeşit olan Kilovattan silaj veriminde olduğu gibi sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) bakımından da DKC6308 hariç diğer bütün geççi çeşitlere göre daha yüksek sonuç gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar suya ulaşmanın zor ve kıt olduğu bölgelerde, geççi bir çeşit olan DKC 6308 yerine daha az sulama suyunun uygulandığı P9027 erkenci çeşidinin ekiminin uygun olabileceğini göstermektedir. Daha önce mısır bitkisi üzerinde yapılan bazı çalışmalarda araştırmacılar sulama suyunda belirli miktara kadar yapılacak kısıtının IWUE değerini arttırdığını bildirmişlerdir [12-16].

Tablo 6. Uygulanan sulama suyu miktarı, silaj verim ve sulama suyu kullanım etkinliği değerleri

Çeşitler	Sulama Suyu (I) (mm)	Silaj verimi (t ha ⁻¹)	Sulama Suyu Kullanım Etkinliği (IWUE) (kg m ⁻³)
Keravnos	340.34	49.00 c	14.39 cd
AGA	340.34	49.20 c	14.45 cd
Ada523	340.34	50.80 c	14.92 cd
Gladius	340.34	47.30 cd	13.89 cd
DKC6308	340.34	73.60 a	21.62 ab
Simpatico	294.05	29.90 d	10.16 d
Kilovatt	294.05	52.30 bc	17.78 b
P9027	294.05	71.00 ab	24.15 a

A. Ekonomik Analiz

Çalışmada, ekonomik değerlendirme 2021 yılında elde edilen verilere göre yapılmıştır. Toplam masraf hesaplanırken arazi hazırlığı, tohum bedeli, gübre bedeli, ekim bedeli, çapalama, sulama ve hasat bedeli dikkate alınarak yapılmıştır. Tohum bedeli ve sulama suyu masrafları çeşitlere göre değişmiş olup bunlar dışındaki diğer bütün masraflar ortak kabul edilmiştir. Tüm gelir gider hesaplamaları da 1 hektar alan üzerinden yapılmıştır.

Çalışmada amaç, erkenci çeşitler kullanarak, sulama suyundan tasarruf sağlayıp toplam girdiyi azaltmak, bunun yanında yüksek verimli çeşitleri de belirleyerek, elde edilecek net geliri ve birim sulama suyu hacmine göre en yüksek net geliri veren çeşitleri belirlemektir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan ekonomik analiz sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

En düşük net gelir Simpatico (4998.8 TL), en yüksek ise DKC6308 (24 597.6 TL ha⁻¹) çeşidinde belirlenmiştir. FAO olum grubu geç olan, en yüksek silaj verimi elde edilen DKC6308 çeşidinden en yüksek net gelir elde edilmiş olmasına rağmen, P9027 çeşidi hem erkenci olması hem de 23 193.8 TL'lik net geliri ile ön plana çıkmıştır. Birim sulama suyu hacmine göre net gelir değerleri 1.69-7.88 TL m⁻³ arasında değişmiştir. En yüksek değer (7.88 TL m⁻³) P9027 erkenci çeşidinden elde edilirken, en düşük değer ise (1.69 TL m⁻³) erkenci çeşit olan Simpatico çeşidinden elde edilmiştir. Diğer erkenci bir çeşit olan Kilovattan birim sulama suyu hacmine göre net gelirine bakıldığında, Keravnos, AGA ve ADA-523 geççi çeşitlerine göre daha üstün performans sergilemiştir. Bu durum, daha az sulama suyu uygulanan P9027 ve Kilovatt çeşitlerinin, diğer çeşitlere göre daha

ekonomik (birim sulama suyu hacmine göre) olduğunu göstermektedir. Bu konuyla ilgili yapılan bazı çalışmalarda da araştırmacılar farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Yolcu ve ark. (2016) mısır bitkisinde yaptıkları çalışmada en yüksek birim su hacmine göre geliri (1.78 TL m⁻³) 447 mm sulama suyu uyguladıkları konudan elde ettiklerini ve sulama suyu miktarı arttıkça bu değerinde arttığını bildirmişlerdir [16]. Okursoy (2009) mısır bitkisinde yaptığı çalışmada en yüksek net gelire 443 mm sulama suyu uyguladığı konudan ulaştığını bildirmiştir [17]. Kuşçu ve ark. (2017)'ları karpuz üzerine yaptıkları çalışmada en yüksek net geliri en fazla sulama suyu uyguladıkları tam sulama konusundan, en yüksek birim sulama suyu hacmine göre geliri (2.51 TL m⁻³) ise tam sulamaya göre %25 kısıt uyguladıkları konudan elde ettiklerini bildirmişlerdir [18]. Karaer ve ark. (2021)'ları ise 447.33 mm sulama suyu uyguladıkları mısır çeşitlerinden birim sulama suyu hacmine göre en yüksek net geliri elde etmişlerdir [19].

Tablo 7. Çalışmada kullanılan mısır çeşitlerinin ekonomik analizi

Çeşitler	Toplam masraflar (TL ha ⁻¹)	Brüt Gelir (TL ha ⁻¹)	Net Gelir (TL ha ⁻¹)	Birim Sulama Suyu Hacmine Göre Net Gelir (TL m ⁻³)
Keravnos	8 622.43	22 050	13 427.6	3.94 cd
AGA	7 672.43	22 140	14 467.6	4.25 cd
Ada523	7 672.43	22 860	15 187.6	4.46 c
Gladius	8 722.43	21 285	12 562.6	3.69 cd
DKC6308	8 522.43	33 120	24 597.6	7.22 ab
Simpatico	8 456.17	13 455	4 998.8	1.69 d
Kilovat	8 456.17	23 535	15 078.8	5.12 b
P9027	8 756.17	31 950	23 193.8	7.88 a

IV. SONUÇ

Çalışma sonucunda, hem net gelir (24 597,6 TL ha⁻¹) hem de silaj verimi (73.60 t ha⁻¹) açısından en iyi performansı geçici bir çeşit olan DKC6308 göstermiştir. Birim alanda suyu en iyi değerlendiren (IWUE) ve birim sulama suyu hacmine göre net gelirin en fazla olduğu çeşidin ise P9027 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, geçici çeşit olan DKC6308 Bilecik ekolojik koşullarında hem silaj verimi hem de ekonomik olarak üstün performans sergilemiş olmasına rağmen, erkenci çeşit olan P9027 su kullanım etkinliği ve birim su hacmine göre elde edilen net gelirden daha üstün sonuçlar göstermiştir. Böylece suyun daha kısıtlı olduğu alanlarda daha az sulama suyu miktarının uygulandığı erkenci çeşit olan P9027 önerilebilmektedir. Bu durum üreticilere ekonomik kazanç sağlarken, ürününü de araziden daha önce kalkması anlamına gelmektedir. Elde edilen net gelir açısından ise DKC6308 ve P9027 çeşitlerinin her ikisi de önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye İstatistik Kurumu. (2020) Tahıl ve Diğer Bitkisel Ürünler Yem Bitkileri İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=yem%20bitkileri>, (05.05.2021).
- [2] Öz, A., Kapar, H. & Dok, M. (2017). Mısır Tarımı Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Yayınları. [<http://arastirma.tarim.gov.tr/ktae/Belgeler/brosurler/Mısır%20Tarımı.pdf>], (15.09.2020).
- [3] Acar Z., Tan M., Ayan İ., Aşçı Ö.Ö., Mut H., Başaran U., Gülümser, E., Can M. & Kaymak G. (2020). Türkiye’de Yem Bitkileri Tarımının Durumu ve Geliştirme Olanakları. *Türkiye Ziraat Mühendisleri IX. Teknik Kongresi*, 13-17 Ocak, Ankara.
- [4] Açıkgöz, E. (1995). Yem bitkileri Kitabı (II.Baskı). Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Basımevi, Bursa, 456.
- [5] Burgu, L. (2021). Bilecik ekolojik koşullarında ikinci ürün olarak ekilen farklı silajlık mısır çeşitlerinin silaj verimi ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- [6] Anonim. (2020.) T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü, Tarımsal Değerleri Ölçme Denemeleri Teknik Talimatı. <https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM/TTSM/Belgeler/Tescil/Teknik%20Talimatlar/S%C4%B1cak%20%C4%B0klim%20Tah%C4%B1llar%C4%B1m%C4%B1s%C4%B1s%C4%B1r.pdf>.

- [7] Kanber, R. (1984). Irrigation of first and second product peanuts by utilizing open water surface evaporation in Çukurova conditions. *Regional Groundwater Research Institute Publications*, 114:64-93.
- [8] Kutlu, H. R., Görgülü, M., Çelik, L. B. (2005). Genel hayvan besleme ders notu. Çukurova Üniversitesi, https://www.academia.edu/8030438/GENEL_HAYVAN_BESLEME (10.03.2021).
- [9] TAGEM, (2017). Türkiyede Sulanan Bitkilerin Bitki Su Tüketim Rehberi. <https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/yayin/Tu%CC%88rkiyede%20Sulanan%20Bitkilerin%20Bitki%20Su%20Tu%CC%88ketimleri.pdf>
- [10] Howell TA (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy journal*, 93(2), 281-289.
- [11] Sharma, B., Molden, D., & Cook, S. (2015). Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification. International Water Management Institute, France, 25.
- [12] Payero, J. O., Tarkalson, D. D., Irmak, S., Davison, D., & Petersen, J. L. (2008). Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 95(8), 895-908.
- [13] Öktem, A. (2008). Effects of Deficit Irrigation on Some Yield Characteristics of Sweet Corn. *Bangladesh Journal of Botany*, 37 (2): 127-131.
- [14] Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Bannayan, M., Homae, M., & Hoogenboom, G. (2009). Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. *Agricultural Water Management*, 96(5), 809-821.
- [15] Irmak, S., Djaman, K., & Rudnick, D. R. (2016). Effect of full and limited irrigation amount and frequency on subsurface drip-irrigated maize evapotranspiration, yield, water use efficiency and yield response factors. *Irrigation Science*, 34(4), 271-286.
- [16] Yolcu, R., Üzen, N. & Çetin, Ö. (2016). İkinci ürün silajlık mısırdaki maksimum net geliri sağlayan sulama ve azot fertigasyon stratejileri. *Toprak Su Dergisi*, 5(2): 59-64.
- [17] Okursoy, H. (2009). *Trakya koşullarında farklı sulama yöntemleri altında ikinci ürün silajlık mısırın su üretim fonksiyonlarının belirlenmesi*. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [18] Kuşçu, H., Turhan, A., Büyükcangaz, H., Keskin, B., Kurtulmuş, E., & Demir, A. O. (2017). Tam ve kısıntılı sulama koşullarında karpuzun su kullanım etkinliği karşısında ekonomik getirisi. *Toprak Su Dergisi*, 6(1), 7-14.
- [19] Kara, M., Gülümser, E., Mut, H., & Gültaş, H. T. (2021). Ana ürün silajlık mısır yetiştiriciliğinde sulama suyu kullanım etkinliği ve ekonomik analiz. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 5(3), 652-658.

Araştırma Makalesi - Research Article

Kutu Kesitli Birleşimlerde Ek Levhası Şeklinin Moment Taşıma Kapasitesine Etkisi

Effect of Joint Plate Shape on Moment Carrying Capacity in Box Section Joints

Mustafa Sivri^{1*}

Geliş / Received: 10/03/2022

Revize / Revised: 25/05/2022

Kabul / Accepted: 08/09/2022

ÖZ

Sanayileşmenin gelişmesiyle ülkemizde çelik yapılar özellikle sanayi yapıları, hafif konut yapıları, pazar yeri, otopark alanı vb. alanlarda yaygın kullanılmaya başlamıştır. Hafif ve kolay bulunabilen kutu kesitlerin kullanımında özellikle birleşim bölgelerinde istenmeyen lokal burkulma problemleri oluşmaktadır. Birleştirilen kutu kesitlerin özellikle boyutlarının farklı olması durumunda dar kesit geniş kesitli yüzeyde lokal burkulmaya neden olmaktadır. Çalışmada literatürde deneysel analizi yapılan kutu kesitli kolon-kiriş birleşiminin sonuçları ABAQUS programı kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulanmış sayısal modeller kullanılarak; birleşim bölgesi levhali, yan sargılı levhali ve rijitleştirme levhali detaylar kullanılarak model sayısı artırılmıştır. ABAQUS programı kullanılarak farklı birleşim detayına sahip modeller eğilme momenti altında analiz edilmiş ve sistem davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizlerde en etkili sonucun rijitleştirme levhali durum olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- *Kutu Kesitli Birleşim; Başlık Levhası, Rijitleştirme Levhası; Lokal Burkulma*

ABSTRACT

With the development of industrialization, steel structures in our country, especially industrial structures, light housing structures, bazaar, car parks etc. have been widely used in the fields. In the use of lightweight and easily available box sections, undesirable local buckling problems occur especially in the joint areas. Especially when the dimensions of the joined box sections are different, the narrow section causes local buckling on the large section surface. In the study, the results of the box-section column-beam joint, which were experimentally analyzed in the literature, were verified using the ABAQUS program. Using verified numerical models; the number of models has been increased by using details with joint zone plate, side wrap plate and stiffening plate. By using the ABAQUS program, models with different joint details were analyzed under bending moment and the system behavior was tried to be determined. In the analyses made, it was seen that the most effective result was the case with the stiffening plate.

Keywords- *Box-Section Joint; Stiffening Plate; Rigidity Plate; Local Buckling*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mustafasivri@isparta.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2756-5357>)

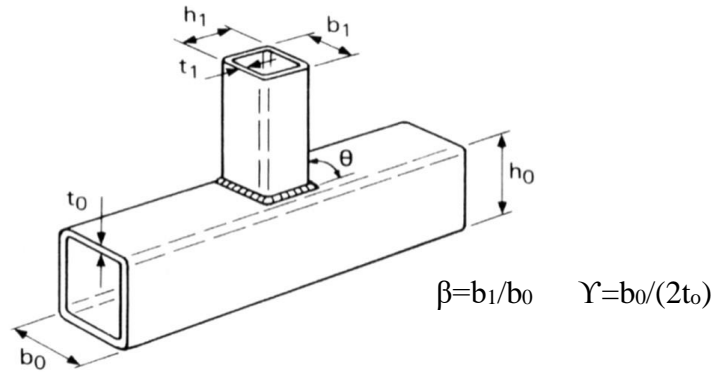
İnşaat Teknolojisi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, SDU Batı Kampüsü, 32160 Çünür, Isparta, Türkiye

I. GİRİŞ

TDY2018'de süneklik düzeyi yüksek çelik çerçevelerin sınıflandırılabilmesi için moment aktaran kolon kiriş birleşim koşulları I profiller için verilmiştir. Kutu kesitli birleşim için bir hüküm bulunmamaktadır.

Yaygın olarak kullanılan kutu kesitli kolonlar aksel yük etkisinde performanslı çalışan elemanlardır. Kolon-kiriş birleşimlerinde kiriş yükünün kolon yüzeyi ile taşınmasından dolayı kolon yüzeyinde şekil değiştirmeler artmakta ve lokal burkulmalar oluşmaktadır. Bu durum aksel kuvvet taşıyan kolonda istenmeyen bir durumdur.

CIDECT Design Guide3'de [1] kutu kesitli "Vierendeel" tipi kutu kesitlerin (Şekil 1) T şeklinde birleşim elemanları rijit ya da yarı rijit olarak tanımlanmıştır. Kiriş genişliğinin kolon genişliğine oranı β , kolon genişliğinin cidar kalınlığına oranı Υ olarak tanımlanmıştır. β değerinin 1 olması durumunda birleşimin rijit, 1 den küçük olması durumunda yarı rijit olarak tanımlanmıştır. β ve Υ değerlerine bağlı formüllerle birleşimin taşıma kapasitesinin hesabı yapılmaktadır.



Şekil 1. Vierendeel tipi kutu kesit birleşim noktası

Matoso vd. [2] ve Xiao-Ding Bu ve Jeffrey A. Packer [3] aksel kuvvet etkisi altındaki kutu kesit kafes kiriş elemanlarının taşıma kapasitelerini farklı kiriş boyutları için sonlu elemanlar yöntemiyle belirlemiştir. Farklı şartnamelerin hesap formülleriyle sonlu eleman analizlerini karşılaştırmıştır. Lima vd. [4] K ve T kutu birleşimlerinin Euro Code 3 (2003)'e [5] göre hesaplanan değerlerini ANSYS sonlu eleman programıyla yapılan analizlerle karşılaştırarak vermiştir. Kalmykova [6] kutu kesitli kolon kenarına yanaşık kutu kesitli kiriş birleşim deneylerini yaparak ABAQUS [1] programıyla analizlerini yapmıştır. Analiz sonuçlarının deney sonuçlarını çok doğru bir şekilde belirleyebildiğini belirtmiştir. Mojgan Yaghoubsahhi vd. [7] farklı kiriş genişlikleri için kutu kesitli birleşimlerinin deney sonuçları ile AISC360 şartnamesinde verilen hesap yöntemini karşılaştırmıştır. β değerinin 0.5 den küçük olduğu durumlarda yönteminin doğru sonuçlar vermediğini vurgulamıştır. Fenkli vd. [8] boru kesitli kolon ile kutu kesitli kiriş birleşiminde levha boyutlarının taşıma kapasitesine etkisini araştırmıştır. J.A. Packer vd. [9] farklı boyuttaki kutu kolon-kiriş birleşim davranışlarını çeşitli şartnamelerde verilen hesap yöntemiyle karşılaştırmalı olarak vermiştir. Mc Fadden M.T. [10], tezinde farklı boyuttaki kiriş elemanın kolona kaynaklı birleşiminde kaynak etkisini belirlemek amacıyla 12 deney yapmıştır. Kaynak türü ve yerinin AISC 2010 [11] şartnamesinde öngörülen hesap değerlerinin $\beta > 0.85$ değerlerinde kaynağın etkinliğinin daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Kutu kesitli birleşimlerde kaynak kalınlığının etkisini inceleyen araştırmalar da gerilme yığılmalarının olduğu birleşimin köşe noktalarında kaynak kalınlığının da etkili olduğu belirtilmiştir [12-18]. Fincanoğlu [19] doktora tezinde kaynak delikli C tipi başlık boyutlarının birleşim moment taşıma kapasitesini incelemiştir. Kök [20] tezinde kutu kesitli 100*200*4 kiriş ile 200/200*5 kolon birleşiminde farklı boyutta alın levhası ve levha içerisinde kaynak olukları kullanarak yaptığı deneylerde kolon yüzeyinde lokal burkulmanın önüne geçilemediğini belirtmiştir.

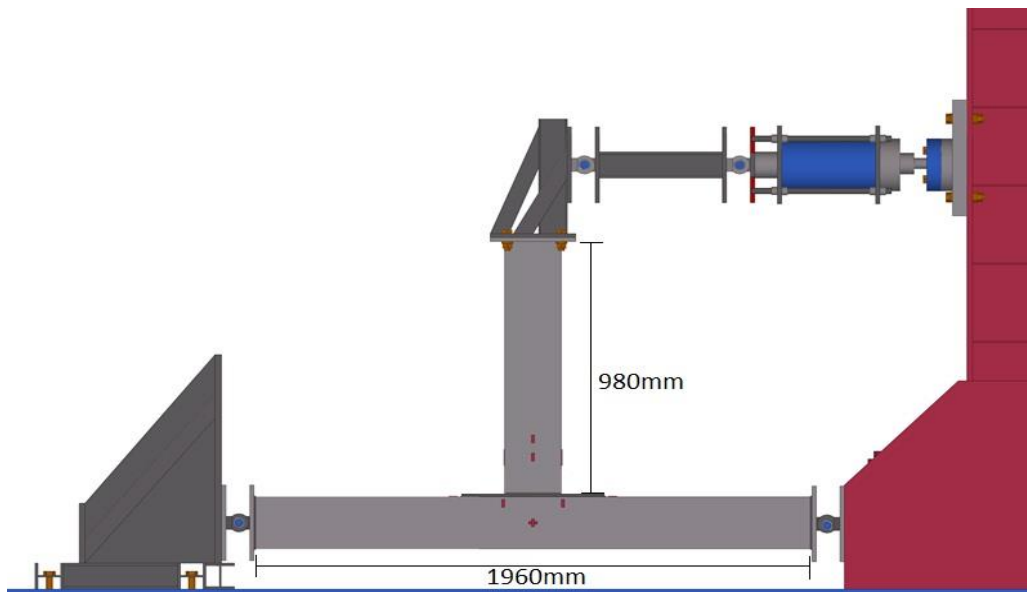
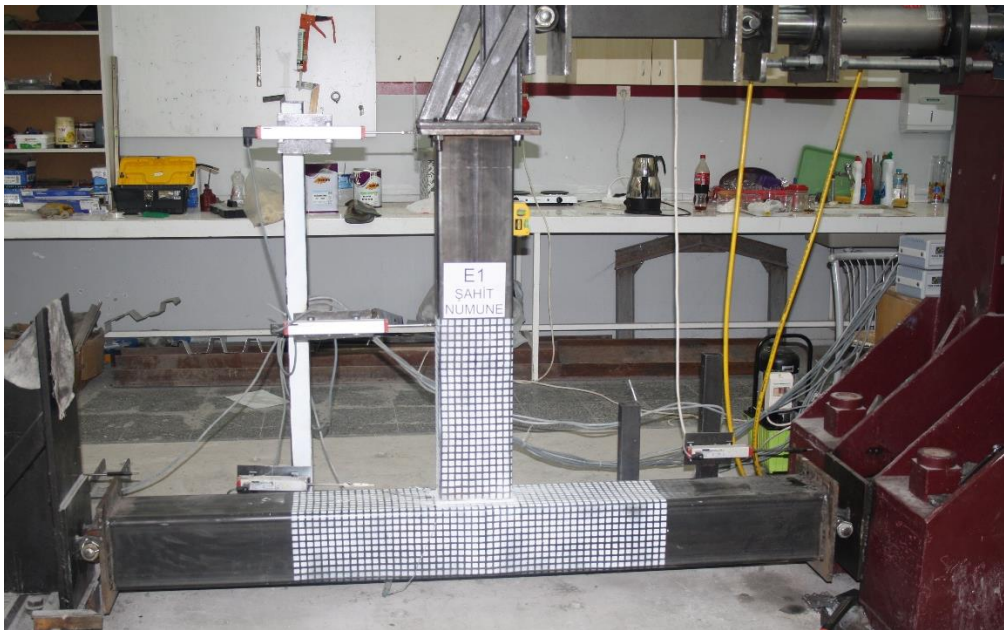
Kutu kesitli birleşimde moment taşıma kapasitesinin araştırılması amacıyla Kök'ün [20] tezinde deneyini yaptığı şahit numunenin ABAQUS V21 [21] programıyla analizi yapılarak sistem davranışının doğru belirlenebildiği gösterilmiş ve farklı birleşim levhaları ile uygun birleşim türü belirlenmeye çalışılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

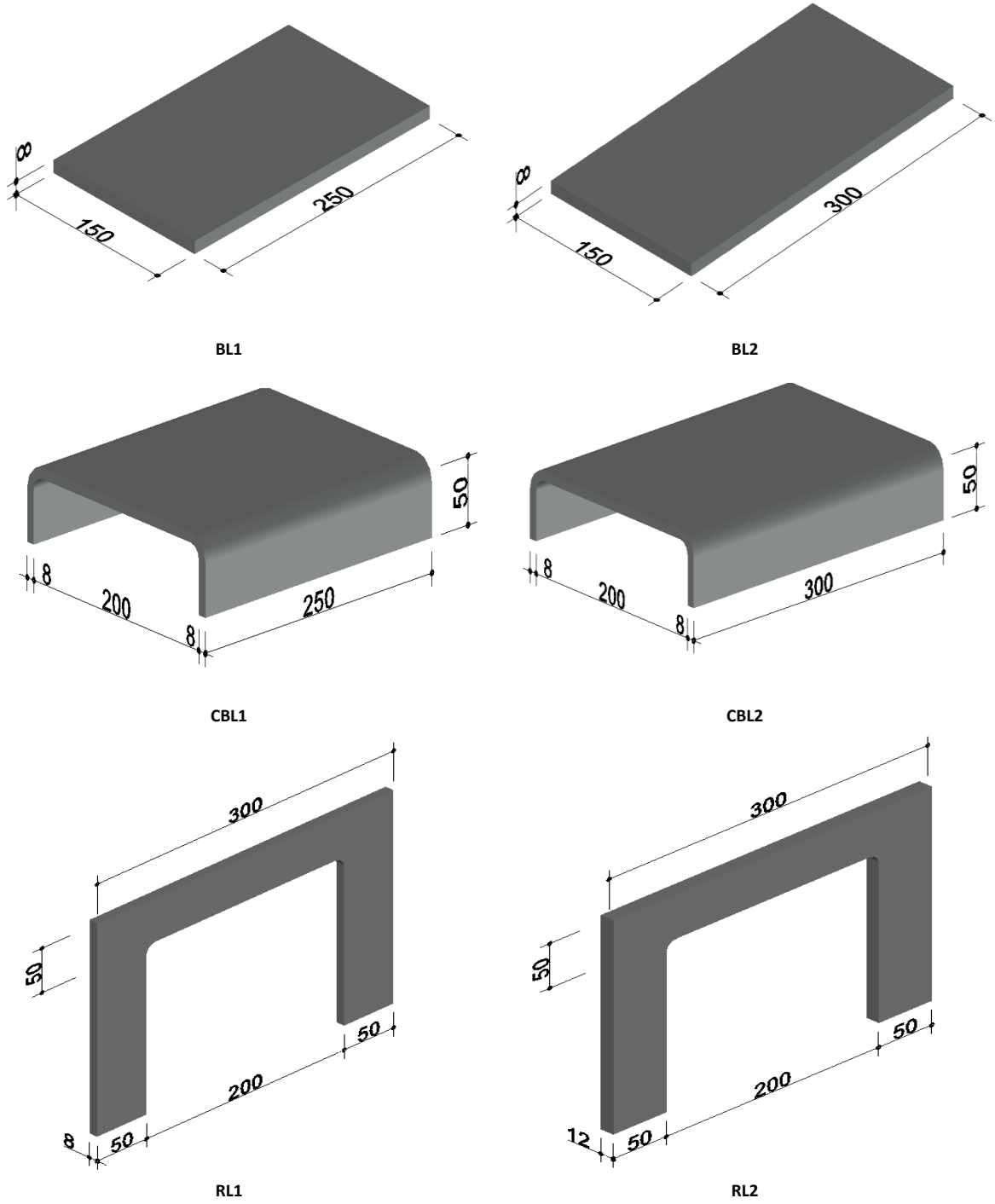
Kutu kesitli birleşimlerde kirişte oluşan kesme kuvveti ve momentin kolon yüzeyinde daha geniş bir alana aktarabilmesi için başlık levhaları kullanılmaktadır. Kök (2014) tezinde Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat

mühendisliği Çelik Laboratuvarında yaptığı deneylerde kolon profilini 200x200x5mm, kiriş profilini 100x150x4mm kullanmıştır. Levhasız şahit numune (Deney) deney sonuçları çalışmada da referans olarak alınmıştır. Deney numunesini oluşturan elemanların boyutları kiriş eleman (düşey) için 980mm ve kolon elemanı için (yatay) 1960mm'dir. Deney düzeneğinin görünümü ve boyutları Şekil 2'de verilmiştir.

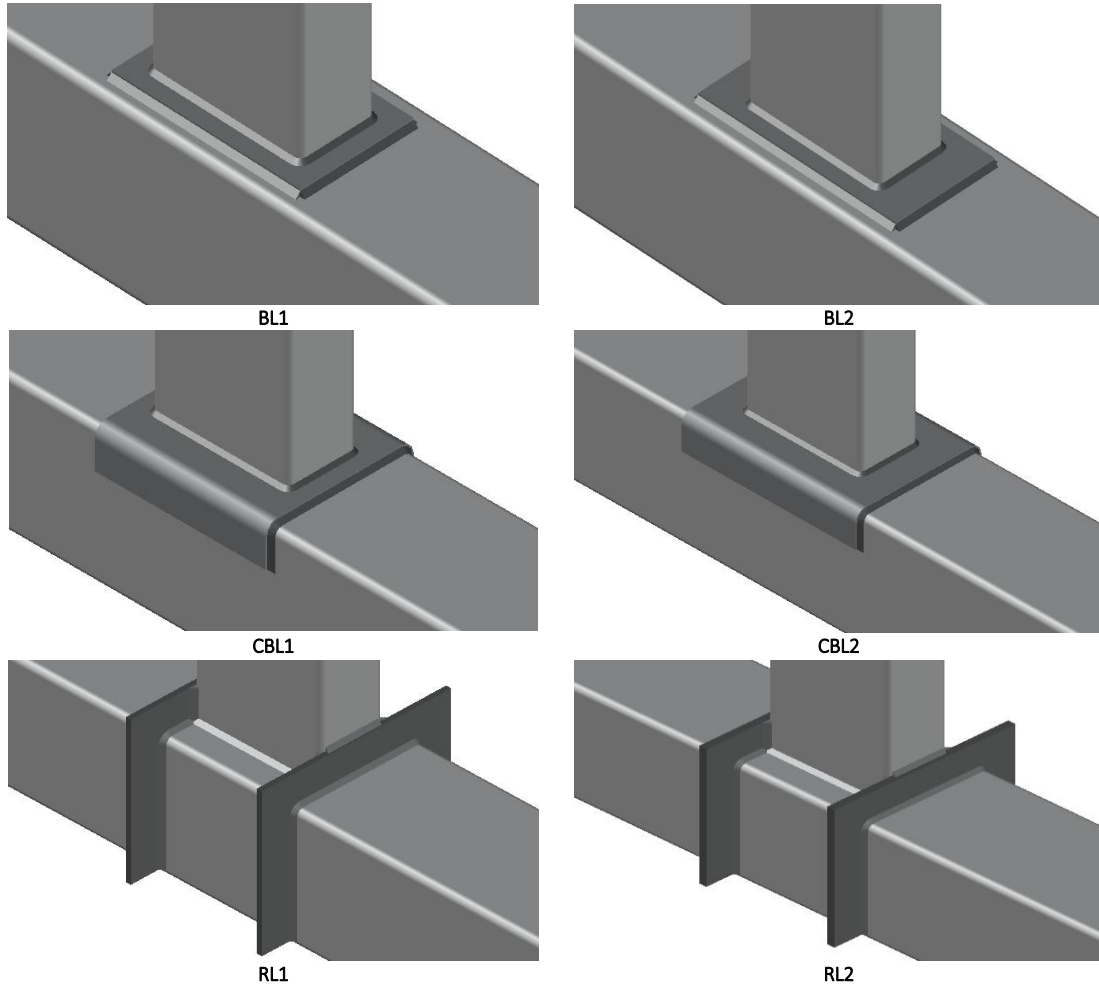
Ek levhasının moment taşıma kapasitesine etkisini belirlemek amacıyla başlık levhalı, C tipi başlık levhalı ve rijitleştirme levhalı birleşim tipleri tanımlanmıştır. Başlık levhalı birleşimde levha boyutları 150*250*8 (BL1) ve 150*300*8 (BL2) olarak belirlenmiştir. C tipi başlık levhalı birleşimde levha uzunluğu 250mm (CBL1) ve 300mm (CBL2), kalınlığı 8mm ve kolon yüzeyinde sarma mesafesi 50mm alınmıştır. Rijitleştirme levhalı birleşimde 8mm (RL1) ve 12mm kalınlığında (RL2) levhalar kiriş ön ve arka yüzeyine 50mm uzunluğunda yerleştirilmiştir. Modellerde kullanılan başlık levhaları ve rijitleştirme levha boyutları Şekil 3'te ve birleşim şekilleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği genel görünümü ve boyutları

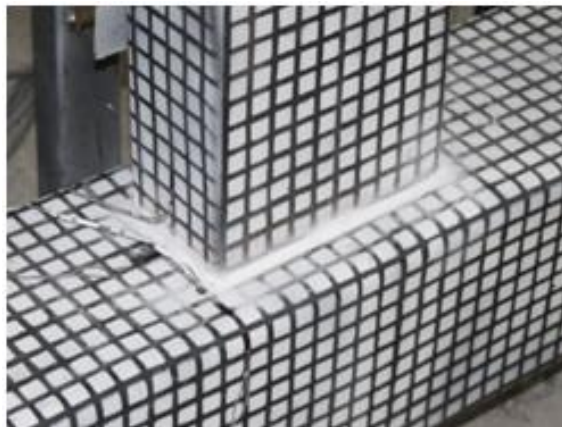


Şekil 3. Başlık levhaları ve rijitleştirme levha boyutları



Şekil 4. Başlık levhali ve rijitleştirme levhali kutu kesit birleşim görünümleri

Kök (2014) deneyini yapmış olduğu Levhasız isimli model başlık levhasız olup şahit numune olarak değerlendirilmiştir. 200*200*5mm kutu kesitli kolon elemanın 100*200*4mm ebatlarındaki kirişe kaynak dikişi kalınlığı $a=6\text{mm}$ alınarak kaynaklı olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır. Şekil 5'te modele ait deney öncesi fotoğrafları görünmektedir. Şekilde görüldüğü üzere deney numunesi kaynaklı birleşim olması sebebiyle moment aktaran bir birleşim niteliğindedir.



Şekil 5. Levhasız deney öncesi genel görünüm.

Deneyde kullanılan kutu profillerden alınan çelik numuneler TS EN ISO-6892-1 “Metalik Malzemeleri; Çekme Deneyi” [22] ile dayanımları belirlenmiştir. Kaynak dikişlerinde kullanılan gaz altı alaşımsız kaynak telinin mekanik özellikleri fabrika değerleri ile çelik eleman mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

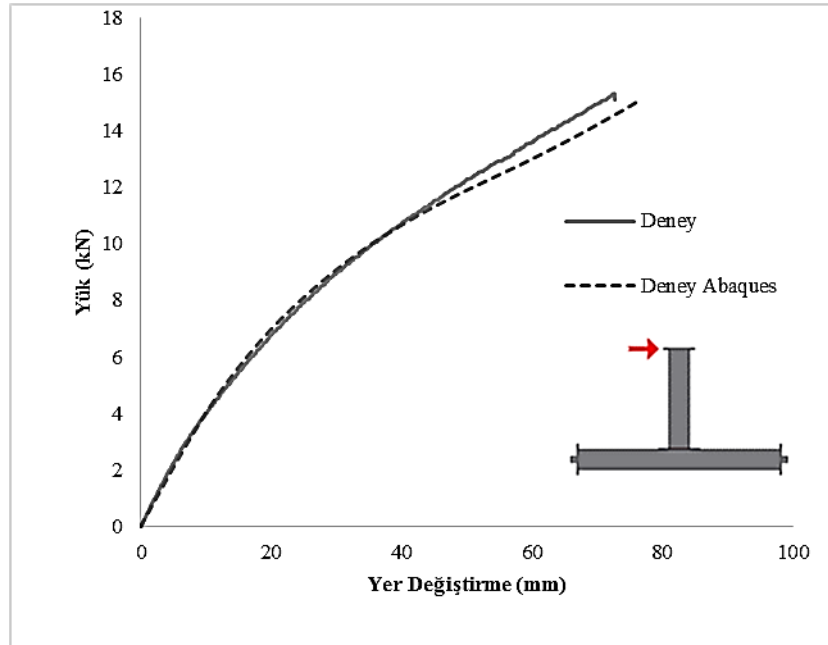
Tablo 1. İmalatta kullanılan çelik ve kaynak dikişleri mekanik özellikleri

	Akma Gerilmesi (N/mm ²)	Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastisite Modülü (N/mm ²)
Çelik	310	380	19.8	210000
Kaynak	460	590	28.0	200000

Kolon ve kiriş uçlarındaki başlık levhaları ile birleşim bölgelerindeki tüm kaynaklar 6mm köşe kaynaklı olarak uygulanmıştır.

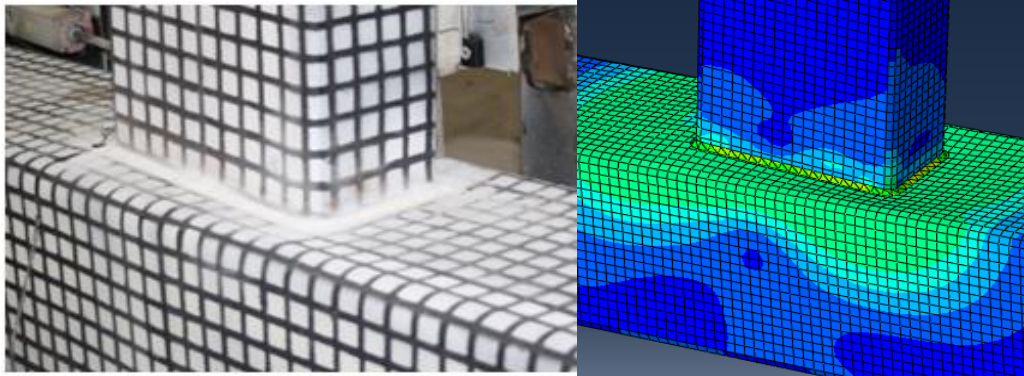
III. ARAŞTIRMA BULGULARI

ABAQUS programında kolon ve kiriş elemanlar “Shell”, diğer levha ve kaynaklar “Solid” eleman olarak tanımlanmıştır. Kaynak ile çelik birleşimleri programda “Tie” komutu ile birleştirilmiştir. Temas yüzeyi ile kuvvet aktaran yüzeyler “Frictionless” komutuyla modellenmiştir. Modellemede daha doğru sonuçlar elde edebilmek için kolon ve kiriş birleşim bölgesinde kaynak ve levhaların yüzeydeki izdüşüm alanları “Partition” ile tanımlanarak sonlu eleman sayısı artırılmıştır. Deneyi yapılan şahit numunenin yük – yer değiştirme grafiği Şekil 5’te verilmiştir. ABAQUS analiz sonuçlarının deney verilerini oldukça doğru bir şekilde hesaplanabildiği görülmektedir.



Şekil 6. Deney ve ABAQUS yük – yer değiştirme değerleri

Şekil 7’de görüldüğü gibi deneyde elde edilen şekil değiştirme davranışı ABAQUS modeli ile örtüşmekte olup çalışmada kullanılan sayısal model doğrulanmıştır.



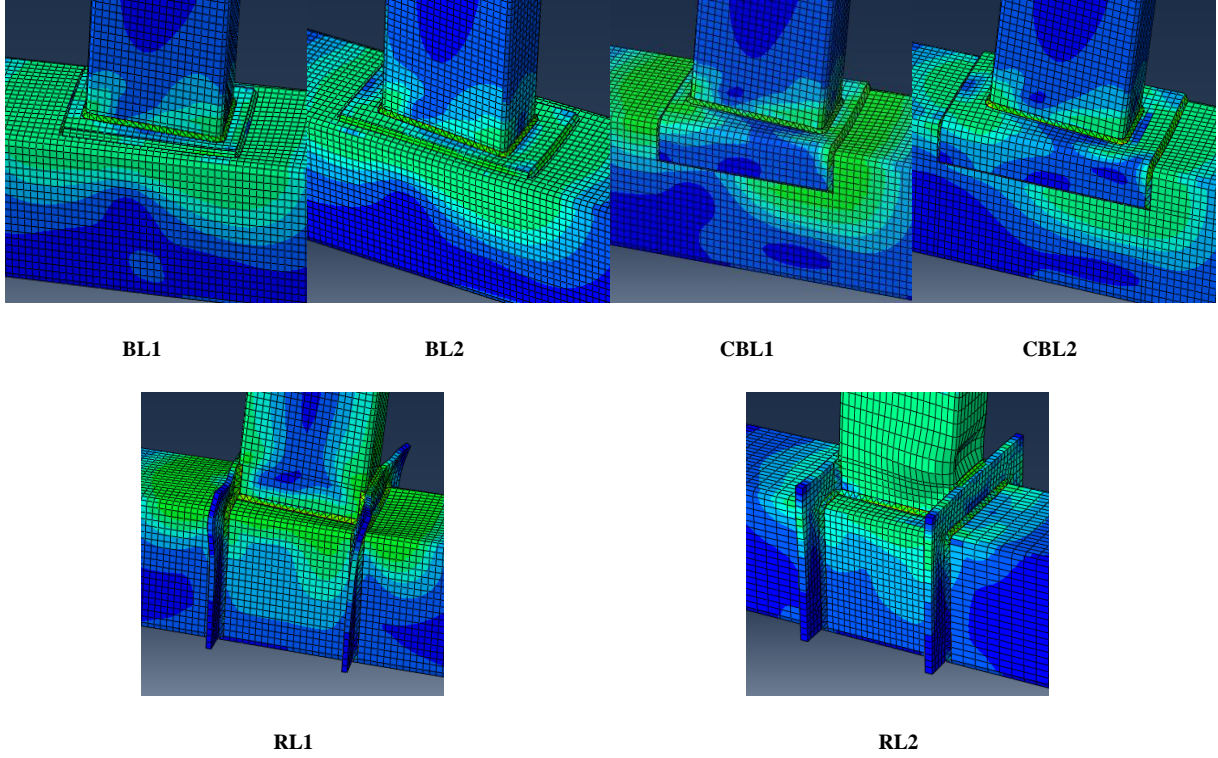
Şekil 7. Deney ve ABAQUS şekil değiştirme görünümü

Şekil değiştirmiş duruma ait görünüm incelendiğinde; eğilme momentinin kolon yüzeyinde sönümlendiği görülmektedir. Kirişte şekil değiştirme gözlemlenmez iken bütün şekil değiştirme kolon başlığında meydana gelmiştir. Birleşim rijit bir davranış sergileyememiş, güçlü kolon zayıf kiriş davranışı mümkün olmamıştır. Ayrıca kolonda oluşan lokal burkulmanın aksel yük taşıyan kolonda kesit davranışını zayıflatacağı ve taşıma kapasitesini etkileyeceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

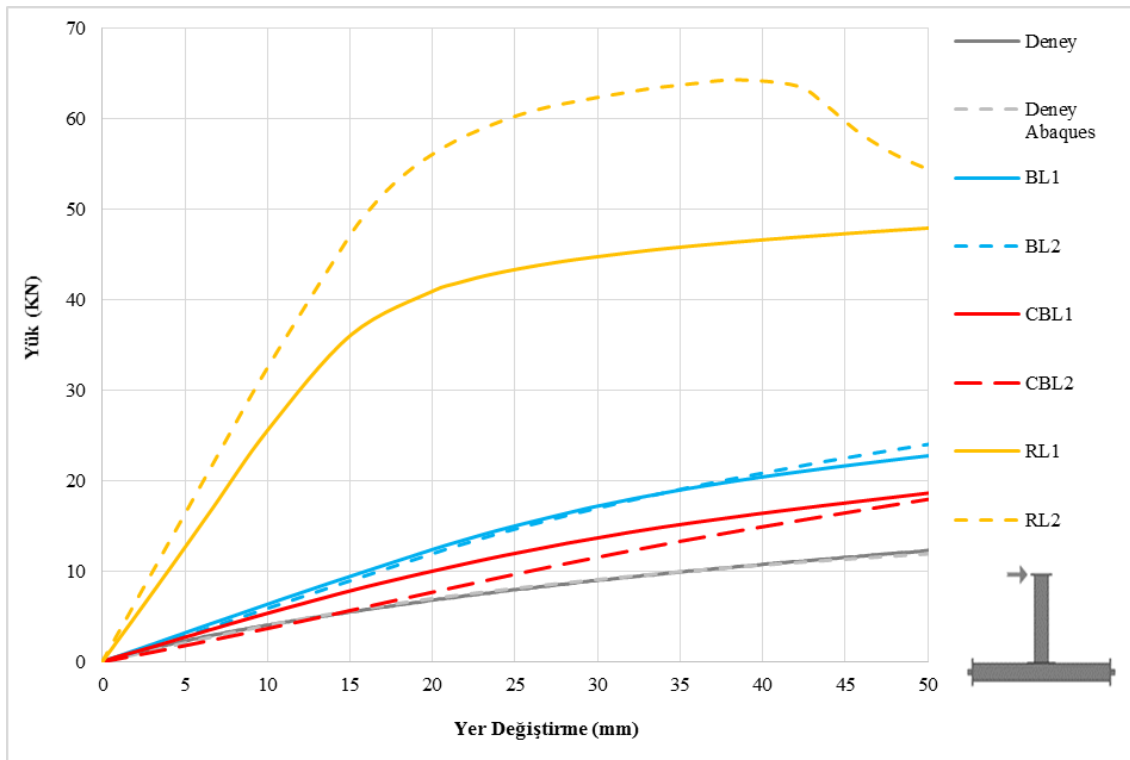
Sayısal olarak yapılan bu çalışmada, referans deney sonuçları ile doğrulanan matematik model üzerinde kolonda oluşan lokal burkulmayı önlemek, etkili dönme rijitliğini sağlamak ve bu sayede güçlü kolon zayıf kiriş davranışını elde edebilmek için kolon yüzeyine başlık levhası (BL1 ve BL2), C tipi başlık levhalı (CBL1 ve CBL2) ve rijitleştirme levhalı (RL1 ve RL2) birleşim detayları kullanılarak model sayısı artırılmıştır.

Statik artımsal yük altında elde edilen eğilme momenti ile yapılan analizlerde şekil değiştirmiş sistem üzerinde oluşan maksimum gerilmeler Şekil 8’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, başlık levhalı ve C tipi başlık levhalı birinci ve ikinci tip birleşimlerde şekil değiştirmelerin yine kolon yüzeyinde olduğu ve birleşimin rijit davranmadığı görülmektedir. Rijitleştirme levhalı durumun değerlendirildiği üçüncü tip modellerde; kolon yüzeyini sararak yapılan rijitleştirme işlemiyle, kuvvet dağılımında yan yüzeyleri de sisteme daha etkin bir şekilde dahil edildiği görülmektedir. Ancak bu durumda da kullanılan rijitleştirme levhasının cidar kalınlığı ön plana çıkmaktadır. Bu modeller için yapılan analizlerde itme yönüne göre basınç bölgesinde görev yapan 8mm kalınlığında rijitleştirme levhası şekil değiştirmiştir. Bu sebeple istenen rijitlik sağlanamamıştır. 12mm cidar kalınlığındaki sargı levhasının kullanıldığı durumda levha yeter rijitlikte dayanım sağlamış ve şekil değiştirme kolon yüzeyinde değil kiriş üzerinde meydana gelmiştir. Kullanılan birleşim detayı sayesinde; kolon başlığı ve gövdesinde lokal burkulmalar engellenmiş, şekil değiştirme kiriş üzerinde plastik olarak meydana gelmiştir. Kiriş üzerindeki şekil değiştirme incelendiğinde, basınç bölgesinde başlığın iç bükey, gövdenin dış bükey olarak burkulduğu tespit edilmiştir. Kiriş üzerinde meydana gelen bu lokal burkulmalarının yeri, oluşum sırası ve deformasyon şekli üzerinde kullanılan rijitleştirme levhasının boyutsal değişkenlerinin etkin olduğu görülmüştür.

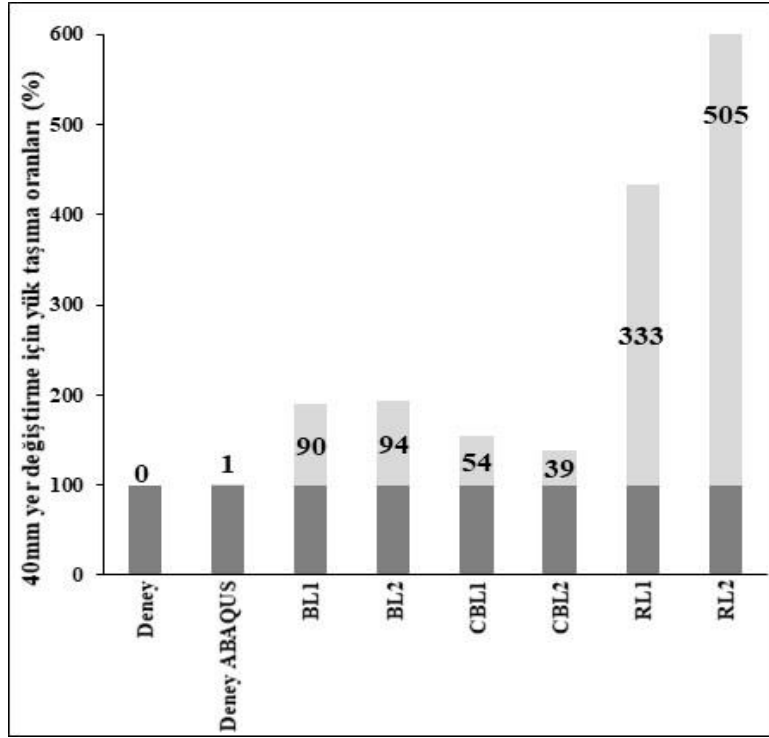
Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerde; tüm modeller için yük-yatay yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Şekil 9’da tüm modellerden elde edilen yük – yer değiştirme değerleri, Şekil 10’da birleşim tipleri için 40mm yatay yer değiştirmeye karşılık gelen kapasite kazanım oranları verilmiştir. Grafikler incelendiğinde başlık levhası ile yapılan birleşimlerde kiriş yükünün kolon yan yüzeylerine kısa mesafede iletilmesinden dolayı 40mm itme değeri için yük taşıma kapasitesi %90’ın üzerinde arttığı görülmektedir. C tipi başlık levhalı birleşimlerde kiriş çekme ve basınç kuvvetleri kolon yüzeyine dağıtılmak istenmiştir. C tipi levhaların “membran” davranışından dolayı levha eğilmiş ve yükü kolon yan yüzeylerine aktaramamıştır. 40mm itme için 250mm uzunluğa sahip C tipi levhada yük taşıma oranı %54 artmış, 300mm uzunluğundaki levhada membran davranışı daha etkin olmuş ve yük taşıma oranı %39’da kalmıştır. Rijitleştirme levhalı birleşimlerde kiriş eğilme momenti levhalar aracılığı ile kolon yan yüzeylerine taşınmaktadır. 8mm kalınlığındaki rijitleştirme levhasının rijitliğinin az olması nedeniyle eğilmiş olmasına karşı yük taşıma oranı 40mm itme için 3 kattan fazla artmıştır. Güçlü kolon zayıf kiriş davranışının olduğu 12mm rijitleştirme plakalı modelde istenen yapı davranışı sağlanabilmiş ve yük taşıma oranı 5 katına çıkmıştır. Etkili dönme rijitliğinin sağlandığı 12 mm rijitleştirme plakalı modelde; diğer analizlerden farklı olarak kiriş üzerinde plastik deformasyon meydana gelmiştir. Bu sebeple, bu analizde sistem kiriş üzerinde meydana gelen lokal burkulmaya müteakip yük almamaya başlamıştır. Bu durum tasarımcı istenilen güçlü kolon- zayıf kiriş talebinin karşılanmasını sağlamıştır.



Şekil 8. Sayısal analiz gerilme dağılımları



Şekil 9. Birleşim tiplerine göre yük – yer değiştirme değerleri



Şekil 10. Birleşim tipleri için 40mm yatay yer değiştirmeye karşılık gelen kapasite kazanım oranları

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada kutu kesitli birleşimde kolon yüzeyinde oluşan büyük şekil değiştirmelerin önlenmesi için başlık levhali, C tipi başlık levhali ve rijitleştirme levhali birleşimin davranışı araştırılmıştır

Euro Code 3 şartnamesinde $\beta \leq 1$ değeri için kutu kesitli birleşimleri yarı rijit olarak kabul etmiş ve taşıma kapasitesinin hesaplanmasını ampirik formüller vermiştir. Kutu kesitli birleşimlerde başlık levhası kullanılmaması durumunda kolon yüzeyinde şekil değiştirmeler fazla olmaktadır ve bu istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple kolon yüzeyinde meydana gelen şekil değiştirmeleri engellemek için literatürde ek levhali çözümler kullanılması önerilmektedir. Yapılan bu çalışmada uygulama ve literatürde kullanılan ek levhali birleşim şekillerinden başlıcaları karşılaştırılmıştır. Çalışmada dikkate alınan başlık levhası ve C tipi başlık levhali birleşimlerde de güçlü kolon-zayıf kiriş davranışı oluşmaktadır. Yapılan analizlerde şekil değiştirmenin kolon yüzeyinde olduğu, kolon yan yüzeylerine yük aktarılmadan, kolon yüzeyinin lokal burkulduğu tespit edilmiştir. Ancak tasarımın bir talebi olan rijit birleşimin oluşması için eğilme momentinden dolayı oluşan gerilmelerin kolon yan yüzeylerine taşınması ve kolon kesitinde plastik şekil değiştirme meydana gelmeden yük aktarımının gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu durum, çalışmada kullanılan rijitleştirme levhali birleşim için sağlanmıştır. Ancak bu birleşim detayında da kullanılan rijitleştirme levhaları 8mm kalınlığında modellendiğinde rijitleştirme levhası şekil değiştirmeye uğramıştır. Rijitleştirme levhalarının kalınlığı artırıldığında, levha şekil değiştirmesi engellenmiştir. Bu durumda birleşime etkiyen eğilme momentine, kolon kesiti kesit bütünlüğünü bozmadan karşı koyabilmiş ve şekil değiştirme kiriş üzerinde oluşmuştur. Bu durum birleşim kapasite kazanımını da etkilemiştir. Çalışmada kullanılan 12mm kalınlığındaki rijitleştirme levhali model, referans deneye kıyasla 5 kat kapasite kazanımı ortaya koymuştur.

Sonuç olarak çelik elemanların farklı geometri ve birleşim detayından dolayı her birleşimin hesap ve yapım kurallarının şartnamelerde verilmesi mümkün olmamaktadır. Başlık levhali ve rijitleştirme levhali kutu kesitli birleşimle ilgili bir hükümde şartnamelerde yer almamaktadır. Özellikle rijitleştirme levhali birleşimler uygulamada kullanılmaya başlamıştır ve şartnamelerde yapım ve uygulama yönergelerinin hazırlanması için araştırılması gereken bir konudur.

KAYNAKLAR

- [1] Design Guide 3. (2009). *For Rectangular Hollow Section (Rhs) Joints Under Predominantly Static Loading*. Comité International Pour Le Développement Et L'étude De La Construction Tubulaire.
- [2] Matosa R.M.M.P, Costa-Neves L.F, Limac L.R.O, Vellasco P.C.G.S, Silvaeet J.G.S. (2015). Resistance and elastic stiffness of RHS "T" joints: part I - axial brace loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*, <https://doi.org/10.1590/1679-78251790>.
- [3] Xiao-Ding Bu, Jeffrey A. Packer. (2020). Chord end distance effect on RI-IS connections. *Journal of Constructional Steel Research*.
- [4] Lima L.R.O, Vellasco P.C.G, Andradeet S.A.L. (2008). Structural response of K and T tubular joints under static loading. *Proceedings of the International Workshop on Connections in Steel Structures*.
- [5] Eurocode 3 (2003). *Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*. European Committee For Standardization.
- [6] Kalmykova, S. (2021). Simulation of T-Joints Between RHS Steel Members with Offset in ABAQUS CAE. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 30, 36-40.
- [7] Yaghoubshahi, M., Sun, M., & Tounsi, K. (2019). Design of fillet welds in RHS-to-RHS moment T-connections under branch in-plane bending. *Journal of Constructional Steel Research*, 159, 122-133.
- [8] Fenkli M, Çelik İ.D, Kımılı N.A, Sivri M. (2017). Investigation of Capacity on the Hollow Sections Connections with Stiffening Plate. *Advanced Steel Construction*, 13(1), 45-61.
- [9] Packer, J. A., Mashiri, F. R., Zhao, X. L., & Willibald, S. (2007). Static and fatigue design of CHS-to-RHS welded connections using a branch conversion method. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(1), 82-95.
- [10] Mc Fadden M.T. (2012). *Effective Weld Properties for RHS-to-RHS Moment T-Connections*. (Master Thesis), Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- [11] AISC. (2010). Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges. *Prepared by the American Institute of Steel Construction under the direction of the AISC Committee on the Code of Standard Practice*. American Institute of Steel Construction.
- [12] Kumar, S.R.S., Rao, P. (2005). RHS Beam-To-Column Connection with Web Opening-Experimental Study And Finite Element Modelling. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, 739-746.
- [13] Kim, T., Stojadinović, B., ASCE2, M., Whittaker, A.S. (2008). Seismic Performance of Pre-Northridge Welded Steel Moment Connections to Built-Up Box Columns. *Journal of Structural Engineering*, February 2008, 289-299.
- [14] Korol, R.M., El-Zanaty, M., Brady, F.J. (1977). Unequal Width Connections of Square Hollow Sections In Vierendeel Trusses. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 4, 190-201.
- [15] Mang, F., Bucak, Ö., Wolfmuller, F. (1983). The Development of Recommendations for the Design of Welded Joints Between Steel Structural Hollow Sections (T- And X-Type Joints). *University of Karlsruhe, Germany, Final Report on ECSC Agreement 7210 SA/09 and CIDECT Program 5AD*.
- [16] Mashiri, F.R., Zhao, X. L. (2004). Plastic Mechanism Analysis Of Welded Thin-Walled T-Joints Made Up Of Circular Braces And Square Chords Under In-Plane Bending. *Thin-Walled Structures*, 42, 759-783.
- [17] Berman, J. W., & Bruneau, M. (2008). Tubular links for eccentrically braced frames. I: Finite element parametric study. *Journal of structural engineering*, 134(5), 692-701.
- [18] Koning, C.H.M. de, Wardenier, J. (1984). The Static Strength Of Welded Joints Between Structural Hollow Sections Or Between Structural Hollow Sections And H-Sections. *Delft University of Technology, Delft, Part 2: Joints between rectangular hollow sections, Stevin Report 6-84-19*.
- [19] Fincanoğlu A. (2015). *Eğilme Etkisi Altında C Tipi Başlık Levhalı Kutu Kesitli Birleşimlerin Dönme Kapasitelerinin İncelenmesi*. Doktora Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Süleyman Demirel Üniversitesi, 80.
- [20] Kök E. (2014). *Kutu Kesitli Birleşimlerde Ek Kaynaklı Başlık Levhasının Moment Kapasitesine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Süleyman Demirel Üniversitesi. 71
- [21] ABAQUS Users Manual, ABAQUS Release V21 Documentation, Abaqus Inc. <http://www.ichec.ie/infrastructure/software/ABAQUS/>.
- [22] TS EN ISO 6892-1. (2010). *Metallik Malzemeler- Çekme Deneyi- Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Araştırma Makalesi- Research Article

Momentler Metodu ile Parametre Tahmini Üzerine

On Parameter Estimation with the Method of Moments

Yunus Bulut^{1*}, Ahmet Demiralp²

Geliş / Received: 22/03/2022

Revize / Revised: 26/06/2022

Kabul / Accepted: 01/07/2022

ÖZ

Momentler Metodu, bir istatistiksel modelin parametrelerini tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntem örnek momentleri ile anakütle momentleri arasındaki ilişki ile verilen denklemlerin çözümü ile parametrelerin değerlerini bulmayı amaçlar. Literatürde bilinen ilk tahmin yöntemi olan Momentler Metodu ilk olarak Pearson tarafından ortaya atılmıştır. Uygulanabilirliği, basit ve anlaşılır olmasından dolayı sürekli başvurulan bir yöntemdir. Bu çalışmada, Binom, Poisson, Sürekli Düzgün ve Gamma dağılımlarının bilinmeyen parametrelerinin tahmincileri Momentler Metodu ile elde edilmiş ve verilen dağılımlar için tesadüfi veriler simüle edilerek gerçek değerleri ile tahmin değerleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Parametre Tahmini, Momentler Metodu, Binom Dağılımı, Poisson Dağılımı, Gamma Dağılımı

ABSTRACT

The method of moments uses to estimate the parameters of a statistical model. This method aims to find the values of the parameters which are solutions of equations given by relationship between the sample moments and the population moments. The Method of Moments, which is the first estimation method known in the literature, was first introduced by Pearson. This method is constantly used because of its applicability, simplicity and understanding. In this study, the estimators of the unknown parameters of the Binomial, Poisson, Continuous Uniform, and Gamma distributions are obtained by the Moments Method and the actual values and the estimation values are compared by simulating random data for the given distributions.

Keywords- Parameter Estimation, Method of Moments, Binomial Distribution, Poisson Distribution, Gamma Distribution

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ybulut79@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-9108-4937>)

Ekonometri Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

²İletişim: ahmt.dmrp@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0981-7215>)

Ekonometri Bölümü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

I. GİRİŞ

Veri analizinde, makine öğrenmesinde güdümlü öğrenmede, regresyon analizinde, karar teorisinde vs. işlenen tüm verilerin belirli bir dağılım göstermesi beklenir. Örneğin, sistem analizinde bileşen ömürleri belirlenirken gözlenen verilerin Weibull dağılımı ailesine uyması beklenir. Bu verilerin uyduğu dağılımın parametrelerini belirlemek için çeşitli tahmin yöntemleri kullanılmaktadır. Literatürde en çok kullanılan yöntemler En Küçük Kareler (EKK), Maksimum Olabilirlik (MLE), Bayes ve Momentler (MME) yöntemidir. Bu yöntemler içinde bilinen ilk parametre tahmin yöntemi MME'dir. Bu yöntem ilk olarak Karl Pearson tarafından önerilmiştir [1]. Yöntemin geliştirildiği zamandan bu zamana kadar parametre tahmininin en basit yolu olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve birçok uygulama probleminde etkili bir şekilde bu yönteme başvurulmaktadır. Genellikle, diğer tahmin yöntemleri ile elde edilen tahminler, MME yöntemi ile elde edilen tahminler ile kıyaslanmaktadır.

Birçok istatistiksel modellerin parametre tahminlerini MME ile hesaplamak olabilirlik fonksiyonunun maksimize edilmesinden çok daha kolay yapılmaktadır. MME, bazı dağılımlar için yanlı fakat tutarlı tahminler üretmektedir. Bazı dağılımlar için ise tutarlı olmasa bile asimptotik olarak tutarlı ve asimptotik olarak etkin tahminler üretir. Bu yüzden hesaplama süresinin minimizasyonunun sonlu varyans değerinden daha önemli olduğu problemlerde MME önerilir [2].

Literatürde MME yöntemi hem teorik olarak hem de birçok farklı alanda uygulamaları ile ilgili sayısız çalışmalar bulunmaktadır. Bickel vd. [3], bir grafikteki belirli desenlerin ampirik sayılarıyla büyük bir olasılık modeli sınıfını sıyıdırmak için kullanılabilecek genel bir MME yaklaşımını önermişlerdir. Bücher ve Jennessen [4], durağan zaman serisinin extrem indeksi için MME yöntemini kullanarak yeni bir sıralama tabanlı tahmin aracı geliştirmişlerdir. Wnag ve Peng [5], çalışmalarında belirsizlik dağılımlarını uzmanların deneysel verileriyle tahmin etmek için bir MME sunarak bilinmeyen parametreleri bulmak için sayısal bir yöntem tasarlamışlardır. Wikström [6], gerçek sabit etkiler modelini MME ile tahmin ederek, aynı modelin Maksimum Olabilirlik metodu ile tahminine kıyasla daha esnek olduğunu göstermiştir. Wang ve Hsiao [7], gözlemlenmeyen tahmin değişkenlerinin ve ölçüm hatalarının dağılımlarının parametrik olmadığı bir doğrusal olmayan değişkenlerdeki hatalar modelini, enstrümental değişken yaklaşımını kullanarak, bilinmeyen parametreler için MME ve çoklu integral içeren bir amaç fonksiyonunu en aza indirmenin olası hesaplama zorluğunun üstesinden gelmesi için simülasyon tabanlı tahminler üretmişlerdir. Chen vd. [8], döviz getirilerinin ağır kuyruklu dağılımlara sahip olduğunu göz önüne alarak, döviz opsiyonlarını fiyatlandırmak ve etkin bir yöntem önermek için, dağılımın kuyruğu, Normal dağılım yerine Student-t dağılımı kullanılarak modellenmişlerdir ve Student-t dağılımının parametrelerini MME ile tahmin etmişlerdir. Negri ve Nishiyama [9], MME'yi kullanan bir değişim noktası saptama prosedürü önermişlerdir. Accrachi vd. [2], MME'yi geliştirerek MME tabanlı yeni testin asimptotik davranışlarını tanımlamışlardır. Aoki vd. [10], öntest/sontest gibi tekrarlanan ölçüm verilerinin analizi için kullanılan boş kesmeli ölçüm hatası regresyon modelleri için MME kullanılarak parametreler tahmin etmiş ve asimptotik bağıl etkinlikleri, elde edilmesi zor olan MLE'ye göre değerlendirmişlerdir. Carpenter ve Mishra [11], geleneksel MME ve MLE'yi geliştirmek için standart beta parametrelerinin bootstrap saptama düzeltilmiş bir tahmincisini önermişlerdir. Abarin vd. [12], modeldeki rastgele etkilerin ve diğer rastgele hataların dağılımlarının fonksiyonel formları üzerinde herhangi bir varsayım gerektirmeyen bir MME geliştirmişlerdir. Hayek [13], Laplace dağılımı için yeni bir MME yaklaşımı geliştirmiş ve daha önceden bilinen MLE ile karşılaştırmıştır. Lee [14], klasik MME'yi incelemenin temel bir parametrik modelinin Birinci Tip Beta dağılımı iken iki şekil parametresi için bir dizi yüksek mertebeden MME'yi ve çözümün de kapalı formda olduğunu göstermiştir. Jangphanish ve Budsaba [15], İki Parametrelili Ters Gauss dağılımın parametrelerini tahmin etmek için MME ile MLE'yi kullanmışlardır. Dabye vd. [16], homojen olmayan poisson süreçlerinin gözlemlenmesi durumunda sonlu boyutlu parametrelerini MME ve çok adımlı MLE ile tahmin etmişlerdir. Gu ve Abraham [17], McDaniel modelinin kümülatif dağılım fonksiyonunu yaklaşık olarak tahmin etmek için MME ile MLE metodlarını kullanmışlardır.

MME yöntemi, hem bilinen ilk yöntem olması hem de kolay uygulanmasından dolayı popülerliğini korumaktadır. Bu çalışmada MME'nin algoritması tanıtılmış ve bazı özel dağılımların bilinmeyen parametreleri için MME tahminçileri elde edilmiştir. Elde edilen tahminçilerin performanslarını görmek için R'da dağılımlara uyan tesadüfi gözlem değerleri üretilerek MME tahminçileri elde edilmiştir. Farklı değerlere karşılık gelen tahmin sonuçları tablolar halinde verilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Momentler Metodu

Bu yöntem dağılım fonksiyonunun var olan anakütle momentleri ile örneklem momentlerinin eşitlenmesi esasına dayanır. Fakat bazı dağılım fonksiyonları için parametre tahmin edicisi örneklemin bir fonksiyonu olarak belirlenemez.

$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_r)' \in \Theta \subset \mathbb{R}^r, r \geq 1$ parametre vektörüne sahip $f(\cdot; \theta)$ olasılık (yoğunluk) fonksiyonundan seçilen $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)$ örnekleminin k .momentleri

$$\hat{\alpha}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^k, k = 1, \dots, r = [1:r] \quad (1)$$

ve anakütle dağılımının momentleri

$$\alpha_k = E_{\theta}(X_i^k), k \in [1:r] \quad (2)$$

olmak üzere; örneklem momentleri ile anakütle momentlerinden ilk r tanesinin eşitlenmesiyle elde edilen ve $\theta_i, 1 \leq i \leq r$ bilinmeyenlerine göre r denklemlilik denklemler sisteminin çözümü olan $\tilde{\theta}(\mathbf{X}) = (\tilde{\theta}_1(X_1, \dots, X_n), \dots, \tilde{\theta}_r(X_1, \dots, X_n))' = (\tilde{\theta}_1(\mathbf{X}), \dots, \tilde{\theta}_r(\mathbf{X}))'$ tahmin edicisine θ parametre vektörünün momentler yöntemi tahmin edicisi denir. Momentler yönteminin algoritması aşağıdaki gibidir.

Koşul: r parametrelilik anakütle dağılımının k . anakütle dağılım momenti vardır. Yani her $k \in [1:r]$ için $E_{\theta}(|X_i|^k) < \infty$ dur.

1. Adım: İlk r anakütle dağılım momentleri bulunur. Yani her $k \in [1:r]$ için $\alpha_k = E_{\theta}(X_i^k)$ hesaplanır.
2. Adım: İlk r örneklem momentleri örnek verileri ile hesaplanır. Yani her $k \in [1:r]$ için $\hat{\alpha}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^k$ hesaplanır.
3. Adım: Anakütle ve örnek momentleri eşitlenerek r bilinmeyenli r denklemlilik bir denklemler sistemi elde edilir.

$$\hat{\alpha}_k = \alpha_k, k \in [1:r] \quad (3)$$

denklemler sistemi çözümlenerek $\tilde{\theta}(\mathbf{X})$ elde edilir.

B. Binom Dağılımının MME ile Parametre Tahmini

Her iki parametresi bilinmeyen Binom olasılık fonksiyonu

$$f(x; \theta) = \begin{cases} \binom{\theta_1}{x} \theta_2^x (\theta_2)^{\theta_1-x}, & x \in [0: \theta_1], \theta_1 \in [1: \infty], \theta_2 \in (0,1) \\ 0, & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (4)$$

şeklinde. Bu dağılıma ait ilk iki anakütle momentleri, $\alpha_1(\theta) = \theta_1 \theta_2$ ve $\alpha_2(\theta) = \theta_1 \theta_2 (1 - \theta_2) + \theta_1^2 \theta_2^2$ dir. \mathbf{X} gözlem değerlerinden elde edilen örneklem momentleri $\hat{\alpha}_1(\mathbf{X}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ve $\hat{\alpha}_2(\mathbf{X}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2$ dir. Anakütle ve örneklem momentleri eşitlenerek iki bilinmeyenli iki denklemler ile çözüm aranacaktır, yani $k = 1, 2$ için $\alpha_k(\theta) = \hat{\alpha}_k(\mathbf{X})$ eşitliğini sağlayan θ bilinmeyen parametre vektörü, \mathbf{X} gözlem değerine bağlı olarak çözümlenecektir. $k = 1, 2$ için,

$$\begin{cases} \theta_1 \theta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} \\ \theta_1 \theta_2 (1 - \theta_2) + \theta_1^2 \theta_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{cases}$$

denklemler sisteminin çözümü;

$$\theta_1 \theta_2 (1 - \theta_2) + \theta_1^2 \theta_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad \Rightarrow \quad \bar{X}(1 - \theta_2) + \bar{X}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow 1 - \theta_2 &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2}{\bar{X}} \\ \Rightarrow \theta_2 &= \frac{\bar{X} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 + \bar{X}^2}{\bar{X}} \end{aligned}$$

ve $\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ olduğundan $\tilde{\theta}(\mathbf{X}) = \left(\frac{\bar{X}^2}{\bar{X} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \frac{\bar{X} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\bar{X}} \right)'$ elde edilir.

Burada $\bar{X} > \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ ve $\tilde{\theta}_1$ tahmini değeri tam sayı olması şartının yerine getirilmesi durumunda, Binom dağılımı için gerekli olan $\tilde{\theta}_1 \in \mathbb{N}$ ve $0 < \tilde{\theta}_2 < 1$ şartları sağlanmış olur.

C. Poisson Dağılımının MME ile Parametre Tahmini

θ parametresi bilinmeyen Poisson olasılık dağılımının fonksiyonu

$$P(x; \theta) = \begin{cases} \frac{e^{-\theta} \cdot \theta^x}{x!}, & x = 0, 1, 2, \dots, \theta > 0 \\ 0, & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır. Bu dağılıma ait anakütle momenti, $\alpha_1(\theta) = \theta$ ve \mathbf{X} gözlem değerlerinden elde edilen örneklem momenti $\hat{\alpha}_1(\mathbf{X}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ eşitlenerek bir bilinmeyenli bir denklem elde edilir. Buna göre θ parametresinin tahmini $\tilde{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X}$ şeklinde elde edilir.

D. Sürekli Düzgün Dağılımın MME ile Parametre Tahmini

İki parametresi de bilinmeyen Sürekli Düzgün dağılım

$$U(x, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_2 - \theta_1}, & \theta = (\theta_1, \theta_2), \theta_1, \theta_2 \in \mathbb{R}, \theta_1 < \theta_2, \theta_1 \leq x \leq \theta_2 \\ 0, & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (6)$$

ile ifade edilir. Bu olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip X tesadüfi değişkeninin anakütle momentleri $k = 1, 2$ için

$$\alpha_k(\theta) = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k \theta_1^i \cdot \theta_2^{k-i}$$

şeklinde ifade edilir. Anakütle momentleri ile, \mathbf{X} 'e ait örnek momentleri eşitlenirse, $k = 1, 2$ için,

$$\begin{cases} \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} \\ \frac{\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_1 \theta_2}{3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{cases}$$

denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin çözümü ile MME tahmin vektörü ise $\tilde{\theta}(\mathbf{X}) = \left(\tilde{\theta}_1 = \bar{X} - \sqrt{\frac{3}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \tilde{\theta}_2 = \bar{X} + \sqrt{\frac{3}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right)'$ dir.

E. Gamma Dağılımının MME ile Parametre Tahmini

X , Gamma tesadüfi değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f(x; \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\theta_1)\theta_2^{\theta_1}} x^{\theta_1-1} \cdot e^{-\frac{x}{\theta_2}}, & x > 0, \theta_1, \theta_2 \in (0, \infty) \\ 0, & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (7)$$

ile ifade edilir. Gamma dağılımı, iki parametrelili sürekli olasılık dağılımlarının bir ailesidir. Üstel dağılım, Erlang dağılımı ve Ki-kare dağılımı, Gamma dağılımının özel durumlarıdır. Bu özel durumlara uygun olarak genellikle iki farklı parametrezyon kullanılır. Bunlardan ilki; θ_1 şekil ve θ_2 ölçek parametreleriyle ikincisi ise θ_1 şekil ve

$1/\theta_2$ ters ölçek (oran) parametresi ile belirlenir. Gamma dağılımına ait k . anakütle momenti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} E(x^k) &= \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(\theta_1)\theta_2^{\theta_1}} x^{\theta_1-1} \cdot e^{-\frac{x}{\theta_2}} x^k dx \\ &= \frac{1}{\Gamma(\theta_1)\theta_2^{\theta_1}} \int_0^{\infty} x^{\theta_1+k-1} \cdot e^{-\frac{x}{\theta_2}} dx \\ &= \frac{\Gamma(\theta_1+k)\theta_2^{\theta_1+k}}{\Gamma(\theta_1)\theta_2^{\theta_1}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(\theta_1+k)\theta_2^{\theta_1+k}} x^{\theta_1+k-1} \cdot e^{-\frac{x}{\theta_2}} dx \\ &= \frac{\Gamma(\theta_1+k)\theta_2^k}{\Gamma(\theta_1)} \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(\theta_1+k)\theta_2^{\theta_1+k}} x^{\theta_1+k-1} \cdot e^{-\frac{x}{\theta_2}} dx \\ &= \frac{\Gamma(\theta_1)\theta_1(\theta_1+1) \dots (\theta_1+k-1)\theta_2^k}{\Gamma(\theta_1)} \int_0^{\infty} f(x; \theta_1+k, \theta_2) dx \end{aligned}$$

Son eşitlikte, $f(x; \theta_1+k, \theta_2)$ fonksiyonu $f(x; \theta)$ olasılık fonksiyonun k birim ötelenmiş hali olduğundan $(0, \infty)$ açık aralığındaki integrali "1" olacaktır. Buna göre,

$$E(x^k) = \theta_1(\theta_1+1) \dots (\theta_1+k-1)\theta_2^k$$

elde edilir. Anakütle momentleri ile, \mathbf{X} 'e ait örnek momentleri eşitlenirse, $k = 1, 2$ için

$$\begin{cases} \theta_1\theta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} \\ \theta_1^2\theta_2^2 + \theta_1\theta_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{cases}$$

denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin çözümü ile MME tahmin vektörü ise $\tilde{\theta}(\mathbf{X}) = \left(\frac{n(\bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n\bar{X}} \right)'$ dir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde MME ile parametre tahmini yapılan dağılımların farklı tesadüfi değerler ile yapılan tahmin sonuçları R ile hesaplanmıştır. Ayrıca her bir dağılımın performansını değerlendirmek için hata kareler ortalamaları (HKO) hesaplanmıştır. İlk olarak, Binom dağılımının bilinmeyen parametrelerin tahmini için elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Burada Binom dağılımının bilinmeyen parametreleri, θ_1 Binom dağılımı için denemenin tekrar sayısını, θ_2 de deneyin gerçekleşme olasılığını göstermektedir. $\theta_1 = 10, 100, 500$ ve 1000 ve $\theta_2 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ değerleri için ayrı ayrı $n = 100$ adet Binom dağılımına uyan tesadüfi veriler üretilerek tahmin değerleri elde edilmiştir. Tablo 1'e göre elde edilen tahmin değerleri deneme sayısı ve olasılığına bağlı olmadan gerçek değerlere yakın değerler aldığı görülmektedir.

Tablo 1. Binom dağılımının parametrelerinin moment metodu ile tahmini

θ_1	10					100				
θ_2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\tilde{\theta}_1$	6	8	10	10	10	61	85	81	99	84
$\tilde{\theta}_2$	0.160	0.2378	0.3048	0.4071	0.5090	0.1624	0.2356	0.3719	0.4070	0.6012
$HKO(\tilde{\theta}_1)$	0.16	0.04	0	0	0	15.21	2.25	3.61	0.01	2.56
$HKO(\tilde{\theta}_2)$	3.6e-5	1.42884e-5	2.304e-7	5.041e-7	8.1e-7	3.8938e-5	1.2674e-5	5.1696e-5	4.9e-7	1.0241e-4
θ_1	500					1000				
θ_2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\tilde{\theta}_1$	295	342	348	465	459	677	685	813	1053	1009
$\tilde{\theta}_2$	0.1703	0.2893	0.4339	0.4315	0.5455	0.1462	0.2924	0.3699	0.3804	0.4969
$HKO(\tilde{\theta}_1)$	420.25	249.64	231.04	12.25	16.81	1043.29	992.25	349.69	28.09	0.81
$HKO(\tilde{\theta}_2)$	4.9421e-5	7.9745e-5	1.7929e-4	9.9225e-6	2.0703e-5	2.1344e-5	8.5378e-5	4.886e-5	3.842e-6	9.61e-8

Poisson dağılımının bilinmeyen parametresinin tahmin değerleri Tablo 2’de verilmiştir ve θ , Poisson dağılımının ortalamasını, n ise gözlem sayısını göstermektedir. $n = 10, 100, 500, 1000$ ve $\theta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ değerleri için Poisson dağılımına uyan tesadüfi veriler üretilerek Poisson dağılımının parametresinin tahmin değerleri elde edilmiştir. Tablo 2’ye göre n arttıkça tahmin değerlerinde iyileşme olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Poisson dağılımının parametrelerinin moment metodu ile tahmini

n	10					100				
θ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\tilde{\theta}$	0.2	0.3	0.3	0.6	0.6	0.11	0.21	0.34	0.43	0.5
$HKO(\tilde{\theta})$	1e-3	1e-3	0	4e-3	1e-3	1e-6	1e-6	1.6e-5	9e-6	0
n	500					1000				
θ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\tilde{\theta}$	0.106	0.212	0.344	0.43	0.512	0.107	0.214	0.322	0.411	0.498
$HKO(\tilde{\theta})$	7e-8	2.88e-7	3.872e-6	1.8e-6	2.88e-7	4.9e-8	1.96e-7	4.84e-7	1.21e-7	4e-9

Sürekli Düzgün dağılımın bilinmeyen parametreleri θ_1 dağılımın minimum değerini, θ_2 maksimum değerini n ise gözlem sayısını göstermek üzere parametre tahmin değerleri için elde edilen sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir. $n = 10, 100, 500, 1000$, $\theta_1 = 0.1$ ve $\theta_2 = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ değerleri için öncelikle Sürekli Düzgün dağılıma uyan tesadüfi veriler üretilerek dağılımın bilinmeyen parametrelerinin tahmini MME ile elde edilmiştir. Tablo 3’deki sonuçlar incelendiğinde tahmin değerleri ile gerçek değerlerin yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Sürekli düzgün dağılımın parametrelerinin moment metodu ile tahmini

n	10				100			
	0.1				0.1			
θ_1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
$\hat{\theta}_1$	0.1038	0.1075	0.1113	0.1150	0.0957	0.0914	0.0872	0.0829
$\hat{\theta}_2$	0.1941	0.2882	0.3823	0.4764	0.1918	0.2836	0.3753	0.4671
$HKO(\hat{\theta}_1)$	1.444e-6	5.625e-6	1.2769e-5	2.25e-5	1.849e-7	7.396e-7	1.6384e-6	2.9241e-6
$HKO(\hat{\theta}_2)$	3.481e-6	1.3924e-5	3.1329e-5	5.5696e-5	6.724e-7	2.6896e-6	6.1009e-6	1.08241e-5
n	500				1000			
	0.1				0.1			
θ_1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
$\hat{\theta}_1$	0.1015	0.1030	0.1045	0.1060	0.1003	0.1006	0.1009	0.1013
$\hat{\theta}_2$	0.1995	0.2991	0.3986	0.4981	0.2011	0.3023	0.4034	0.5046
$HKO(\hat{\theta}_1)$	4.5e-9	1.8e-8	4.05e-8	7.2e-8	9e-11	3.6e-9	8.1e-10	1.69e-9
$HKO(\hat{\theta}_2)$	5e-10	8.1e-7	3.92e-9	7.22e-9	1.21e-9	5.29e-7	1.156e-8	2.116e-8

Gamma dağılımının bilinmeyen parametreleri θ_1 şekil parametresini, θ_2 ölçek parametresini ve n de gözlem sayısını göstermek üzere parametre tahmin değerleri için elde edilen sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir. $n = 10, 100, 500, 1000$, $\theta_1 = 1, 2, 4$ ve $\theta_2 = 1$ değerlerine karşılık gelen Gamma dağılımına uyan tesadüfi veriler üretilerek dağılımın bilinmeyen parametrelerinin MME ile tahmini elde edilmiştir. Tablo 4’deki sonuçlardan elde edilen tahmin değerlerinin gerçek değerlere yakın sonuçlar verdikleri gözlenmiştir.

Tablo 4. Gamma dağılımının parametrelerinin moment metodu ile tahmini

n	10			100		
	1	2	4	1	2	4
θ_1	1			1		
θ_2	1			1		
$\hat{\theta}_1$	1.7953	2.7615	3.5831	1.1120	2.1794	3.4230
$\hat{\theta}_2$	0.9242	1.1946	1.4185	0.9209	0.9451	1.1455
$HKO(\hat{\theta}_1)$	0.06325	0.05799	0.01738	1.25e-4	3.22e-4	3.33e-3
$HKO(\hat{\theta}_2)$	5.75e-4	3.79e-3	0.01752	6.257e-5	3.018e-5	2.12e-4
n	500			1000		
	1	2	4	1	2	4
θ_1	1			1		
θ_2	1			1		
$\hat{\theta}_1$	1.0236	2.0573	4.4754	1.0112	2.0727	4.1723
$\hat{\theta}_2$	0.9452	0.9577	0.8759	0.9910	0.9831	0.9604
$HKO(\hat{\theta}_1)$	1.114e-6	6.57e-6	4.52e-4	1.254e-7	5.29e-6	2.969e-5
$HKO(\hat{\theta}_2)$	6.006e-6	3.579e-6	3.0802e-5	8.1e-8	2.86e-7	1.568e-6

IV. SONUÇLAR

Parametre tahmincilerinin öncüsü olarak kabul edilen MME yöntemi, hesaplanmasının kolaylığı ve dağılımların çarpıklık ve basıklık gibi karakterizasyonlarının yorumu için sıklıkla tercih edilmektedir. MME ile elde edilen tahminciler için yansızlık çoğu zaman sağlanmaz ama asimptotik olarak yansız olan tahminciler üretir. Genel olarak iki veya daha çok bilinmeyen parametreye sahip dağılımlar için elde edilen MME tahmincileri karmaşık bir yapıya sahiptir. Birkaç dezavantajına rağmen diğer tahmin etme metodları ile elde edilen tahminciler, MME tahmincileri ile karşılaştırıldıktan sonra hangi tahmincinin kullanılacağına karar verilir. Dağılım teorisinin büyük bir bölümünde momentlerin sonlu olması şartı altında çoğu zaman MME ile bir tahminci elde edilebilmesi nedeniyle günümüzde halen güncelliğini korumaktadır.

Bu çalışma ile MME algoritması tanıtılarak, özel dağılımlar için nasıl bulunacağı aşamalı olarak açıklanmıştır. Ayrıca incelenen dağılımların bilinmeyen parametrelerinin MME ile elde edilen tahmincileri R programı ile tesadüfi verilere uygulanarak elde edilmiştir. MME, küçük örneklem için yanlış değerler vermesine rağmen asimptotik olarak yansız ve tutarlı tahminciler üretir. Her bir dağılım için elde edilen MME değerlerinin

performanslarını değerlendirmek için HKO değerleri hesaplanmıştır. Tablolar incelendiğinde n değeri büyüdükçe HKO değerlerinin sıfıra yaklaştığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, F., Akdi, Y., Aydoğdu, H., & Karabulut, İ. (2015). Parametre Tahmini ve Hipotez Testi. Gazi Kitapevi, Ankara, 299.
- [2] Accrachi, E. O., Dabye, A. S., & Gounoung, A. A. (2018). On the Parameter Estimation by Method of Moments and Wald Type Test for Poisson Processes. *In A Collection of Papers in Mathematics and Related Sciences*, 1, 57-74). Statistics and Probability African Society.
- [3] Bickel, P. J., Chen, A., & Levina, E. (2011). The method of moments and degree distributions for network models. *The Annals of Statistics*, 39(5), 2280-2301.
- [4] Bücher, A., & Jennessen, T. (2020). Method of moments estimators for the extremal index of a stationary time series. *Electronic Journal of Statistics*, 14(2), 3103-3156.
- [5] Wang, X., & Peng, Z. (2014). Method of moments for estimating uncertainty distributions. *Journal of Uncertainty Analysis and Applications*, 2(1), 1-10.
- [6] Wikström, D. (2015). Consistent method of moments estimation of the true fixed effects model. *Economics Letters*, 137, 62-69.
- [7] Wang, L., & Hsiao, C. (2011). Method of moments estimation and identifiability of semiparametric nonlinear errors-in-variables models. *Journal of Econometrics*, 165(1), 30-44.
- [8] Chen, R., Zhou, H., Yu, L., Jin, C., & Zhang, S. (2021). An efficient method for pricing foreign currency options. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 74, 101295.
- [9] Negri, I., & Nishiyama, Y. (2020). Change point detection based on method of moment estimators. *arXiv preprint arXiv:2010.03334*.
- [10] Aoki, R., Bolfarine, H., & Singer, J. M. (2002). Asymptotic efficiency of method of moments estimators under null intercept measurement error regression models. *Brazilian Journal of Probability and Statistics*, 157-167.
- [11] Carpenter, M., & Mishra, S. N. (2001). Bootstrap Bias Adjusted Estimators of Beta Distribution Parameters. *Calcutta Statistical Association Bulletin*, 51(1-2), 119-124.
- [12] Abarin, T., Li, H., Wang, L., & Briollais, L. (2014). On method of moments estimation in linear mixed effects models with measurement error on covariates and response with application to a longitudinal study of gene-environment interaction. *Statistics in Biosciences*, 6(1), 1-18.
- [13] Al Hayek, N. (2021). Parameter Estimation for Discrete Laplace Distribution. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 42(2), 368-373.
- [14] Lee, R. S. (2019). Improving Standard Moment Estimators of Beta Random Variables. *Academia Economic Papers*, 47(4), 547-570.
- [15] Jangphanish, K., & Budsaba, K. (2013). Parameter Estimation for Re-Parametrized Inverse Gaussian Distribution. *Science & Technology Asia*, 43-53.
- [16] Dabye, A. S., Gounoung, A. A., & Kutoyants, Y. A. (2018). Method of Moments Estimators and Multi-step MLE for Poisson Processes. *Journal of Contemporary Mathematical Analysis (Armenian Academy of Sciences)*, 53(4), 237-246.
- [17] Gu, M., & Abraham, D. A. (1999, September). Parameter estimation for McDaniel's non-Rayleigh reverberation model. In *Oceans' 99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 99CH37008)*, 1, 279-283.

Araştırma Makalesi - Research Article

Ni Nano Telinin Deformasyon Davranışına İkiz Sınır Aralığının Etkisi: Moleküler Dinamik Çalışması

Effect of Twin Boundary Spacing on Deformation Behavior of Ni Nanowire: A Molecular Dynamics Study

Sefa Kazanç^{1*}

Geliş / Received: 29/03/2022

Revize / Revised: 07/11/2022

Kabul / Accepted: 07/11/2022

ÖZ

Periyodik olarak uyumlu ikizlenmiş tane yapılarına sahip metalik nano tellere uygulanan tek eksenli çekme zorlanması, onların mekanik davranışları ve deformasyon mekanizmaları üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. Bu çalışmada tek kristal ve farklı sayıda birbiriyle uyumlu ikiz tane yapılarına sahip Nikel (Ni) nano tellerinin deformasyon davranışı Moleküler Dinamik (MD) benzetim yöntemi kullanılarak incelenmeye çalışıldı. İkiz sınır aralığının elastiklik modülü ve akma zorunda değişimler meydana getirdiği, bununla birlikte nano tellerin dislokasyon hareketi ve deformasyon ikizlenmesi ile plastik şekil değişimine uğradıkları belirlendi. Atomlar arası etkileşmelerin belirlenmesinde çok cisim etkileşmelerini içeren Gömülmüş Atom Metodu (GAM) kullanıldı.

Anahtar Kelimeler- Nano Tel, İkiz Sınır Aralığı, Moleküler Dinamik, Zor-Zorlanma

ABSTRACT

Uniaxial tensile stress applied to metallic nanowires with periodically coherent twinned grain structures has significant effects on their mechanical behavior and deformation mechanisms. In this study, the deformation behavior of Ni nanowires with single crystal and different numbers of coherent twin grain structures was investigated using the Molecular Dynamics (MD) simulation method. It was determined that the twin boundary space caused changes in the modulus of elasticity and yield strength; however, the nanowires underwent plastic deformation with dislocation motion and deformation twinning. The Embedded Atom Method (EAM), which includes many-body interactions, was used to determine the interactions between atoms.

Keywords- Nanowire, Twin Boundary Spacing, Molecular Dynamics, Stress-Strain

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: skazanc@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8896-8571>)
Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Fırat Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Elazığ, Türkiye

I. GİRİŞ

Son yıllarda nano bilim ve nano teknolojinin hızlı gelişimiyle nano yapıları malzemeler büyük ilgi görmektedir [1-3].Metalik nano teller mikro seviyedeki elektronik, optik, termal ve mekanik uygulamalarından dolayı teknolojiye önemli bir yere sahiptir [4-6]. Metalik nano tellerin deformasyon davranışları, onların teknolojiye uygulamalarını ve güvenilirliklerini etkileyen önemli faktörlerdendir. Bundan dolayı, çeşitli yapı ve özellikte üretilen nano tellerin mekanik özelliklerinin ve deformasyon mekanizmalarının detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Yüksek esneklik, çekme mukavemeti, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, optik şeffaflık ve kimyasal eylemsizlik gibi çok yönlü özelliklerinden dolayı metalik nano teller moleküler elektronik, süper kapasitörler, dokunmatik sensörler, yeni tarama mikroskobu problemleri, tanısal biyosensörler gibi yeni cihazların tasarımı ve geliştirilmesinde kullanılmaktadırlar [7-11].

Nano telleri daha güçlü hale getirmek için yeni bir malzeme olarak ikiz yapıları nano teller üretilmiş ve bunların ikiz içermeyen nano tellere göre olağandışı mekanik özellikler sergilediği belirlenmiştir [12]. İkiz yapıları metalik nano tellerin gücü ikiz sınır aralığından önemli ölçüde etkilenmektedir [13]. Nano ikizli malzemeler yüksek mukavemet, süneklilik ve tane kararlılığının yanı sıra yüksek elektriksel iletkenlik sergilemekte ve bu da onları sayısız teknolojik uygulamalar için çekici kılmaktadır [14-16]. Yapılan çalışmalarda nano ikizli yapılarda maksimum güçlendirme için tane boyutu ve kritik ikiz sınır aralığı arasında yakın bir bağlantı olduğunu göstermektedir [17, 18].

Afanasyev ve Sansoz [19], sıkıştırma altında silindirik yapıdaki nano sütunlardaki tane sınırı güçlendirme etkisini, Cao vd. [20], çekme gerilimi altında kare kesitli nano sütunlarda tane sınırlarının rolünü araştırmışlardır. Her iki çalışmada nano yapıları içindeki ikiz sınır aralığının değiştirilmesinin sonuçları üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte Dang ve Sansoz [21, 22] ikiz nano tel yapıları çekme deformasyonu altında güçlendirici ve zayıflatıcı etkisinin ikiz sınır aralığının bir fonksiyonu olduğunu gözlemlemişlerdir. Tane sınırlarının etkisinin yanı sıra ikiz yöneliminin nano ikiz sütunların çekme gerilimi altında akma dayanımı ve kopma üzerinde de etkisinin olduğu belirlenmiştir [23].

Bilgisayar teknolojisinin ve hesaplama yöntemlerinin hızlı gelişimi ile atomik benzetim teknikleri, nano malzemelerin yeni özelliklerini belirlemek ve deformasyon mekanizmasının atomik ayrıntılarını tespit etmek için yaygın olarak kullanılan popüler ve etkili bir araç haline gelmiştir. Ayrıca nano yapıları modellenmesinde kullanılan atomik benzetim ve analiz yöntemleri, deneysel süreçlerde ortaya çıkan karmaşıklığa ve zorluğa da bir alternatif olmuştur [24]. Özellikle son yıllarda MD benzetim yöntemi polikristal metallerin deformasyon karakteristiklerini incelemek için etkili bir şekilde kullanılmaktadır [25, 26].

Modellenecek bir sistem için uygun bir potansiyel fonksiyonunun seçilmesi çalışmanın en önemli adımlarından biridir. Potansiyel fonksiyonları benzetim çalışması boyunca modellenecek sistemdeki atomlar arasındaki enerjileri ve kuvvetleri belirler [27, 28]. Bu fonksiyonlar belirli malzeme özelliklerinin mümkün olduğunca deneysel değerlere yakın olacak şekilde hesaplanabilmesi için geliştirilir. Bir potansiyel enerji fonksiyonunun işlevi, atomik bağın doğasına bağlı olarak atomlar arası etkileşim enerjisini tanımlamaktır. Farklı atomlar arası potansiyel fonksiyonları mevcuttur ve bu fonksiyonlar formülizasyonun kökenine ve fonksiyonlarda kullanılan parametrelerin değerine göre sınıflandırılır. Son yıllarda nano tellerin deformasyonu GAM potansiyelinin kullanıldığı [29, 30] MD benzetim yönteminin yanı sıra yoğunluk fonksiyonu teorisine dayalı ilk-prensip metoduyla da [31, 32] incelenmiştir. Çok cisim etkileşimlerini içeren GAM, MD çalışmalarında basit matematiksel yapısı, etkili ve kabul edilebilir doğrulukta sonuç üretmesi ve büyük atomik sistemleri tanımlayabilmesindeki verimliliğinden dolayı en çok tercih edilen fonksiyonlardandır. İkiz sınır aralığının metalik nano tellerin dayanımı üzerindeki etkisi hem deneysel hem de benzetim yöntemleriyle kapsamlı bir şekilde incelenmeye çalışılmaktadır.

Bu çalışmada çekme zorlanması uygulanan periyodik olarak ikizlenmiş polikristal Ni metal nano tellerin mekanik özellikleri ve plastik şekil değiştirme mekanizması MD benzetim yöntemi kullanılarak incelenmeye çalışıldı. Modelleme çalışması için LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) MD benzetim programı kullanıldı [33]. Ni metal nano telline uygulanan tek eksenli çekme zorlanmasının ikiz sınır aralığının bir fonksiyonu olarak teline zorlanma eğrisi, elastiklik modülü, akma zoru ve atomik konumlar gibi mekanik ve yapısal özellikleri üzerinde önemli değişimler meydana getirdiği belirlendi.

II. MD BENZETİM METODU

N parçacıktan meydana gelmiş bir atomik yapının MD yöntemi ile modellenmesinde sistemin hareket denklemleri Lagrange fonksiyonu kullanılarak

$$L_{PR}(r^N, \dot{r}^N, h, \dot{h}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i (\dot{s}_i^t G \dot{s}_i) - \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \phi(|hs_{ij}|) + \frac{1}{2} M \text{Tr}(\dot{h}^t \dot{h}) - P_{ext} V \quad (1)$$

şeklinde elde edilir. Burada s_i , h , G ve P_{ext} parametreleri sırasıyla kalandırılmış koordinat, hesaplama hücrenin eksenleri, metrik tensör ve dış basıncınca karşılık gelmektedir.

Çekme veya sıkıştırma zorlanması altındaki bir atomik sistem için zor ifadesi, mikroskobik zor tensörü tarafından Denklem (2)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [34, 35].

$$\sigma = V^{-1} \left[\sum_{i=1}^N m_i \vartheta_i \vartheta_i - \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \frac{F_{ij}}{r_{ij}} r_i \cdot r_j \right] \quad (2)$$

Zor tensörü maddenin herhangi bir noktasındaki zorun dokuz bileşeni tarafından tayin edilir.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Sistem üzerine uygulanan çekme ve sıkıştırma zoru sırasıyla zor tensörünün normal bileşenlerin pozitif ve negatif değerlerine karşılık gelmektedir [36].

Çekme deformasyonu uygulanacak Ni ikiz nano tel sistemi, tek kristal ve birbiriyle uyumlu ikizlerden oluşan çoklu taneli yapı olmak üzere toplam 8 farklı başlangıç yapısında oluşturuldu. Çalışma boyunca tek kristal nano tel yapı Ni1 olarak ifade edilirken 2, 3, 4, 5, 8, 10 ve 14 taneden oluşan nano teller sırasıyla Ni2, Ni3, Ni4, Ni5, Ni8, Ni10 ve Ni14 olarak adlandırıldı. Ni1, Ni2, Ni3, Ni4, Ni5, Ni8, Ni10 ve Ni14 nano tel yapıları sırasıyla 20777, 20766, 20777, 20766, 20777, 20788, 20722 ve 20766 atomdan meydana gelmektedir. Nano tel yapıda her bir tane grain (gr) olarak tanımlanmıştır. Tek kristal yapıya sahip Ni1 nano telinde atomlar x , y ve z doğrultularında [031], [0 $\bar{1}$ 3] ve [100] kristalografik yönelimlerine sahip olacak şekilde yerleştirilirken, birbiriyle uyumlu ikiz yapı nano tellerde ise atomlar [031], [0 $\bar{1}$ 3], [100] ve [03 $\bar{1}$], [013], [100] kristalografik yönelimlerinde yerleştirildi. Nano tellerin x yönündeki uzunluğu 14 nm iken y ve z yönlerindeki uzunluğu atomların farklı yönelimlerinden dolayı 4,1 nm ile 4,48 nm arasında değerler almaktadır.

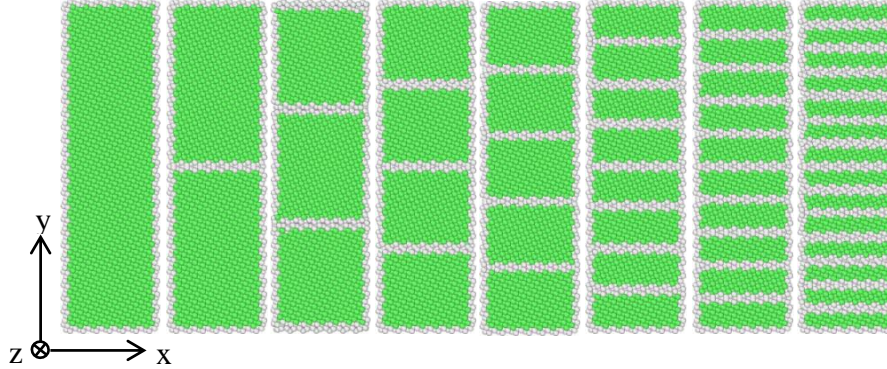
Atomik benzetim çalışmalarında model sisteme uygulanan termal ve mekanik işlemler sonrası oluşan mikro yapısal değişimlerin tespit edilmesi son derece önemlidir. Bunun için birçok yapısal analiz algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmalarda her parçacığa bir yapısal tür atamak temel amaçtır. Ayrıca bu yöntemler yerel bir yapıyı idealleştirilmiş bir yapıyla eşleştirerek, ne kadar yakın olduklarını belirlemeye çalışır. MD benzetim çalışmalarında merkez simetri parametre analizi (centrosymmetry parametre analysis), genel yakın komşu analizi (common neighbor analysis), bağ-yönelim analizi (bond-order analysis), bağ açısı analizi (bond-angle analysis), Honeycutt-Andersen, Voronoi analizi oldukça sık kullanılan yapısal analiz yöntemleridir [37, 38].

Bu çalışmada Ni nano tel sistemleri, atomlar fcc örgü noktalarına yerleştirilerek oluşturuldu. Nano telin sadece [100] doğrultusu boyunca periyodik sınır şartları uygulandı. Atomların başlangıç hızları Maxwell-Boltzman hız dağılımına uygun olarak rastgele atandı. Sistemin hareket denklemlerinin sayısal integrasyonu 1 fs zaman adımlarında Verlet algoritmasının hız formu kullanılarak gerçekleştirildi. Nano tel sistemine uygulanan tek eksenli çekme işlemleri için NVT istatistik topluluğu kullanıldı. Nano tellerin kararlı yapıya ulaşması için model sistem 5×10^4 MD adımı dengeletildi. Çalışmada bütün nano tel sistemlerine uygulanan çekme işlemleri 1×10^8 s⁻¹ zorlanma oranında ve 10K sabit sıcaklıkta gerçekleştirildi. Ni atomları arasındaki etkileşimleri hesaplamak için çok cisim etkileşimlerini içeren GAM potansiyel fonksiyonu kullanıldı. Literatürden kullanılan potansiyel fonksiyonu ile ilgili detaylar bulunabilir [39]. Fonksiyonunun kesilim mesafesi (cut-off) $r_c = 2a_{Ni}$ olarak belirlendi. Bu ifade de a , Ni elementinin örgü parametresidir.

III. BULGULAR

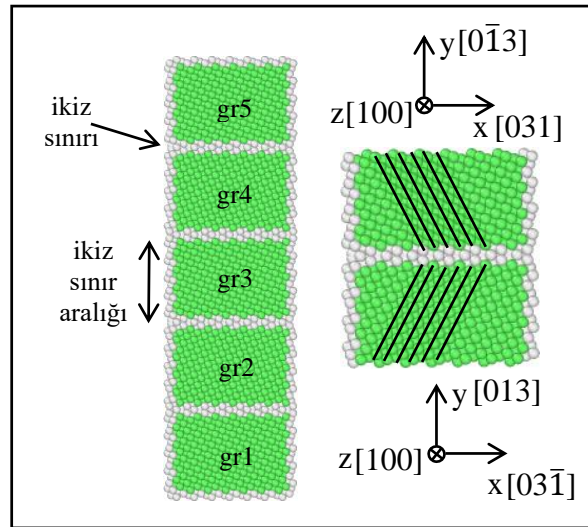
Bu çalışmada tek kristal ve birbiriyle uyumlu 7 farklı ikiz sınır aralığına sahip Ni metal nano tellerine 10 K sabit sıcaklık ve 1×10^8 s⁻¹ zorlanma oranında y doğrultusu boyunca uygulanan tek eksenli çekme işlemi sonucu, sistemin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler ve plastik deformasyon mekanizması MD yöntemi kullanılarak incelenmeye çalışıldı. Şekil 1'de çalışmada kullanılan farklı Ni nano tel yapılarının başlangıç atomik konumları verilmiştir. Herhangi bir ikizlenmenin bulunmadığı tek kristal ve 2, 3, 4, 5, 8, 10 ve

14 ikiz tane sınıra sahip nano tel model sisteminde Ni atomları başlangıç yapısı olarak fcc örgü noktalarına yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Tek kristal ve farklı ikiz yapıları tanelerden oluşan Ni nano tellerinin [001] düzlem kesitinden alınmış başlangıç atomik konumları.

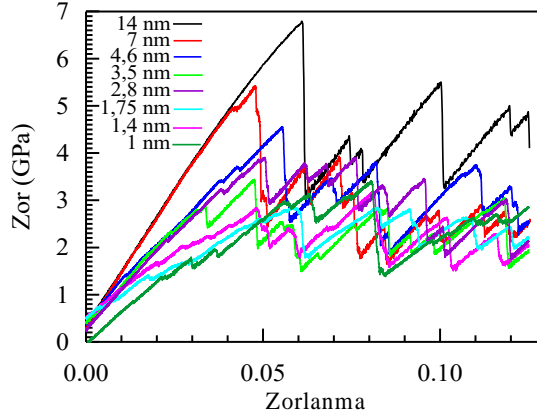
Şekil 2’de 5 taneli yapıdan oluşan Ni5 nano tel sistemi üzerinde, gr olarak ifade edilen taneler, ikiz sınırları, ikiz sınır aralığı ve birbiriyle uyumlu yönelim içinde ikizlenmiş bölgeler detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Genel komşu analizinden (Common Neighbor Analysis-CNA) elde edilen sonuçlara göre yeşil renkli atomlar fcc birim hücreli atomik yapıları ve beyaz renkli atomlar ise bu analizde tanımlanmamış düzende atomları göstermektedir. Periyodik sınır şartlarının uygulanmadığı serbest yüzey atomları ve ikiz sınırlarındaki atomlar bu düzensizliklerden dolayı beyaz renkli görülmektedir.



Şekil 2. 5 uyumlu ikizlenmiş taneden oluşan Ni5 nano telindeki ikiz sınırı, ikiz sınır aralığı ve tane içerisindeki atomların yönelimleri.

Şekil 3’te çalışmada kullanılan 14 nm uzunluğundaki tek kristal ve 7 nm, 4,6 nm, 3,5 nm, 2,8 nm, 1,75 nm, 1,4 nm, 1 nm ikiz sınır aralığına sahip Ni metal nano tellere uygulanan tek eksenli çekme zorlanması sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrileri verilmiştir. Deformasyon işlemi esnasında zor-zorlanma arasındaki ilişki malzemelerin temel mekanik özelliklerini yansıtır. Bütün model nano tellere uygulanan zorlanmanın belirli bir değerine kadar zorun, zorlanmayla hemen hemen doğrusal bir değişim sergilediği görülmektedir. Elastik bölge olarak adlandırılan bu bölgenin regrasyon analizi, malzemenin elastiklik modülünü vermektedir. Maddeye uygulanan kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin bir ölçüsü olarak bilinen elastiklik modülünün yüksek değerleri o maddenin elastik özelliğinin azaldığını ifade etmektedir. Ni1 ve Ni2 nano tellerine uygulanan çekme zorlanması sonucu elastik bölgenin hemen hemen benzer değişim sergilediği ve sırasıyla elastiklik modülünün 115,9 GPa ve 114,8 GPa değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu, iki nano telin benzer elastik deformasyon davranışı sergilediği ve ikiz sınır aralığının bu iki nano telin elastiklik modülü üzerinde zayıf bir etkisinin olduğu söylenebilir. Yapılan çalışmalarda ikiz sınır aralıklı Cu ve Ag nano tellerinde elastiklik modülünün etkisinin çok zayıf olduğu belirlenmiştir [20, 40]. Bununla birlikte ikiz sınır aralığının çalışmada kullanılan diğer nano tellerin elastiklik modülü üzerinde etkisinin olduğu Şekil 3’ten açıkça görülmektedir.

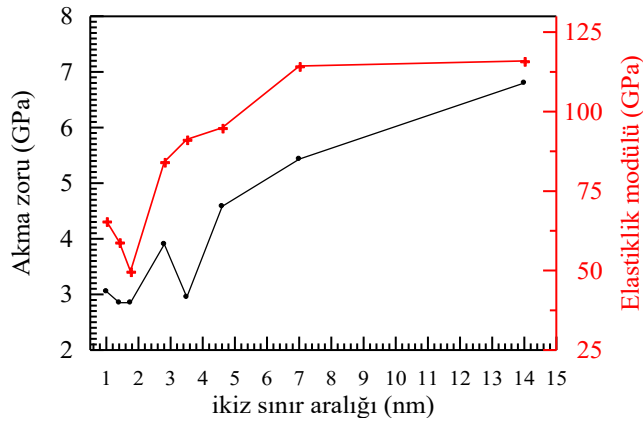
Zorlanma belirli bir değere ulaştıktan sonra bütün nano tellerde zor değerinde ani bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Bu ani düşüş başlamadan önce zorun aldığı en yüksek değer akma zoru olarak ifade edilmekte ve bu plastik şekil değişiminin başlangıcı olarak bilinmektedir. Akma zoru değerine karşılık gelen zorlanmanın üzerinde bir zorlanma malzemeye uygulandığında plastik şekil değişimi mekanizmaları devreye girmeye başlar.



Şekil 3. Farklı sınır aralığına sahip Ni nano tellerine uygulanan tek eksenli çekme deformasyonu sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrisi.

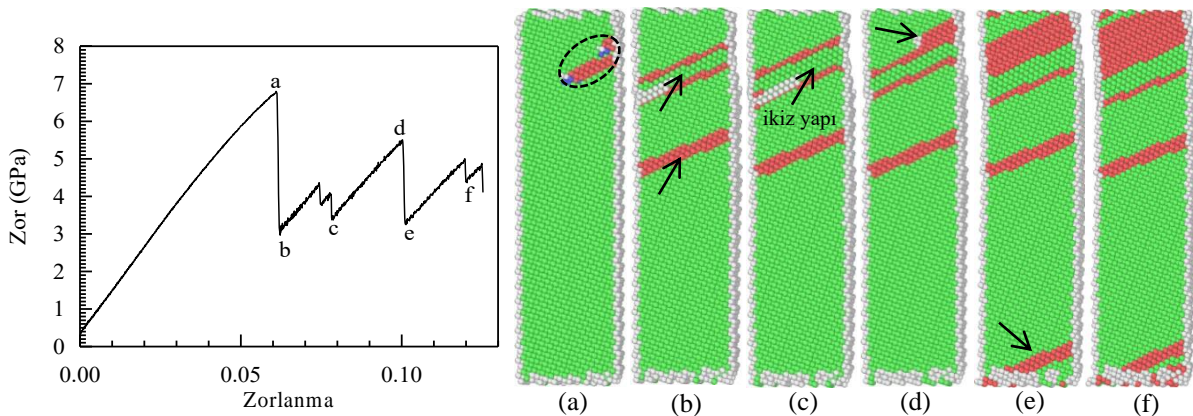
Tane sınır aralığına bağlı, elastiklik modülünün ve akma zorunun değişimi Şekil 4'te verilmiştir. İkiz sınır aralığının artışı, bir başka ifadeyle tane boyutunun büyümesi hem akma zorunda hem de elastiklik modülünde genel olarak bir yükselişe neden olduğu görülmektedir. Bu durum, tane sayısının fazla olduğu ikiz yapı nano tellerin daha sünek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Akma zoru, ikiz sınır aralığı artarken 2,8 nm değerine kadar büyük bir değişim göstermezken, bu değerde bir pik yaptıktan sonra artmaya başlamıştır. İkiz sınır aralığının artışıyla elastiklik modülünün ise 1,75 nm ikiz sınır aralığına kadar bir düşüş sergilediği bu aralıktan sonra ise artmanın başladığı tespit edilmiştir. Hou ve ark. [41] silindirik yapıda ikizlenmiş Au nano telinin tek eksenli çekme deformasyonu altında mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, ikiz sınır aralığının azalmasıyla akma zorunun azaldığı ve belirli bir değerden sonra bir artışın meydana geldiği bununla birlikte elastiklik modülünde bir değişimin olmadığını belirlemişlerdir. Ayrıca 2 nm ikiz sınır aralığına kadar elde edilen akma zorunun, tek kristal Au nano telinin akma zoru değerinin altında, 2 nm den daha küçük ikiz sınır aralığına sahip nano tellerde ise üstünde olduğu tespit edilmiştir. Yaptığımız çalışmada bütün nano teller için elde ettiğimiz akma zoru değerlerinin Ni nano yapı için elde edilen değerlerin altında olduğu belirlenmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarında ikiz sınırlarının Pd'nin akma zorunu düşürürken, aksine nano ikizli Cu'nun akma dayanımında artışa sebep olduğu tespit edilmiştir [42].

Tek kristal ve farklı ikiz sınır aralığına sahip Ni nano tellerin plastik deformasyon mekanizmalarını incelemek için OVITO [43] programında yer alan CNA analizinden elde edilen atomik görüntülerden ve DXA (Dislocation Extraction Algorithm) dislokasyon analiz yönteminden yararlanıldı. Honeycutt ve Andersen tarafından ortaya atılan CNA topolojik analiz yöntemi, kristal yapılardaki tane sınırları, yığılma kusurları, değişik fazlar gibi yapısal değişimleri ve gelişimleri tespit etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntemde, seçilen bir referans atomunun en yakın komşularının geometrik bir analizi yapılır. Her bir atom, en yakın komşuları arasındaki bağlar tarafından belirlenen bölgesel kristal yapıya göre sınıflandırılır. Hacim merkezi kübik (bcc), cisim merkezli kübik (fcc), hegzagonal sıkı paket (hcp) ve "diğer" olarak isimlendirilen 4 farklı yapı türü mevcuttur. Bölgesel bir bcc düzenindeki atomlar bcc atomları, bölgesel bir fcc düzenindeki atomlar fcc atomları olarak kabul edilir. bcc, fcc ve hcp yapılarının haricindeki diğer tüm yerel düzenlenmelerdeki atomlar "diğer" atomlar olarak adlandırılır. Elde edilen atomik konfigürasyonlarda mavi renk bcc, yeşil renk fcc, kırmızı renk hcp ve beyaz renk ise "diğer" olarak adlandırılan birim hücre yapılarını göstermektedir [44, 45].



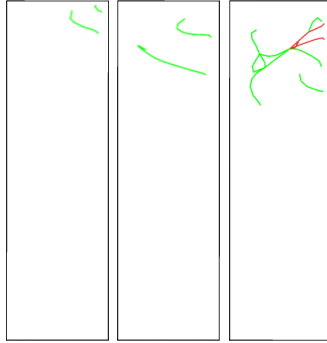
Şekil 4. Elastiklik modülü ve akma dayanımının ikiz sınır aralığına bağlı değişimi.

Farklı ikiz sınır aralığına sahip Ni nano tellerinin plastik deformasyon mekanizmasını sadece Ni1, Ni4 ve Ni10 model sistemleri için incelendi. Şekil 5’de Ni1 nano teline uygulanan çekme deformasyonu sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrisi ve bu eğride seçilen farklı noktalara karşılık gelen, CNA analizinden belirlenen atomik konumlar görülmektedir. Zor-zorlanma eğrisi üzerinde gösterilen her bir harfe karşılık gelen atomik görüntüler aynı harf ile gösterilmiştir. Zor-zorlanma eğrisinin hemen hemen doğrusal değiştiği elastik bölgenin geçilip kalıcı şekil değişiminin başladığı akma zoru olan (a) noktasına ulaşıldığında, noktali daire ile gösterilen bölgede matris içinde hcp birim hücrelerden meydana gelen bir kümelenmenin oluşmaya başladığı belirlenmiştir. Bu bölge, yapı içerisinde Shockley kısmi dislokasyonlarının çekirdeklenmesi ve aktif hale geçmesi sonucu oluşan yığılma kusurlarını ifade etmektedir [46, 47]. Birçok çalışma ikiz nano tellerin akma zorunun, dislokasyonların çekirdeklenmesiyle yakından ilişkili olduğunu göstermiştir [48-51]. Zorlanmanın artmasıyla akma noktası geçildiğinde eğride ani bir düşüşün meydana geldiği b noktasında yeni dislokasyonların çekirdeklenmesi ve matris içerisinde yayılması sonucu hcp yapılı yığılma kusurları artış göstermiştir. Yapılan bir çalışmada ikiz sınırsız tek kristal Ni nano telinin serbest yüzey köşelerinden $\{111\}$ düzleminde $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonunun çekirdeklenmesi yoluyla aktığı belirlenmiştir [52]. Bununla birlikte birçok çalışma ikiz nano tellerin ilk akma dayanımının dislokasyonların çekirdeklenmesiyle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir [48-51]. Daha sonra bu bölgeler, zorlanmanın artırılıp c noktasına ulaşılmasıyla yeni yığılma kusurları oluşturulmadan yapı içerisinde gelişir. Uygulanan zorlanmanın artması, eğride bir sonraki düşüşü üreten yeni yığılma kusur bölgelerinin ortaya çıkmasına neden olur [53]. Çekme işleminde zor-zorlanma eğrisindeki zigzaglar yığılma kusur bölgelerinin oluşumuna atfedilir ve bu durum Cu, Ag ve Ni numunelerinde gözlenmiştir [54, 55]. Bununla birlikte zor-zorlanma eğrisindeki (a-c) noktaları için belirlenen DXA analizi sonucu, $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonunun çekirdeklenmesi ve yayılması Şekil 6’da verilmiştir. Yeşil renkli çizgiler $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyon çizgilerini, kırmızı renkli çizgiler ise DXA analizinde tanımsız olan dislokasyon çizgilerini göstermektedir.



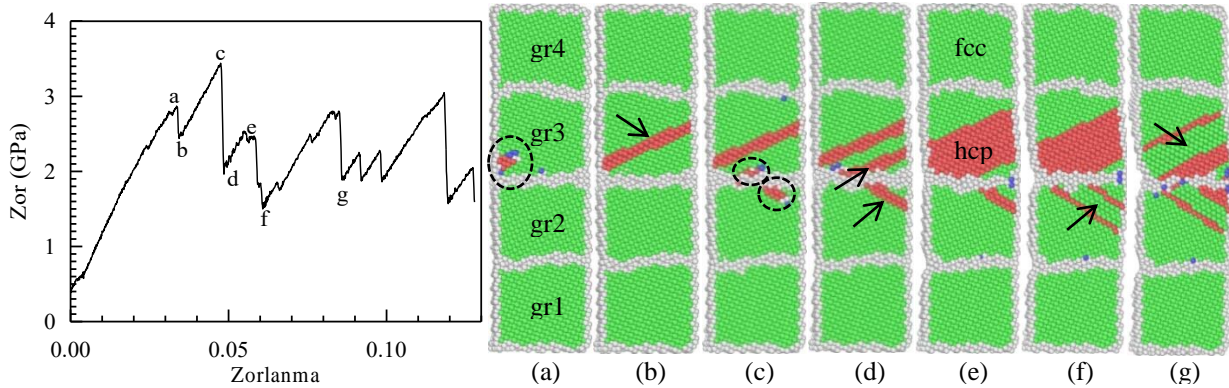
Şekil 5. Tek kristal Ni nano tel model sistemi için elde edilen zor-zorlanma eğrisi ve bu eğri üzerinde gösterilen farklı noktalar için [001] düzlem kesitinden CNA analizi kullanılarak belirlenen atomik görüntüler.

İki bitişik hcp atom katmanı içsel yığılma kusuru olarak tanımlanır. Aralarında bir fcc atom katmanı bulunan iki hcp atom katmanı dışsal yığılma kusuru ve iki hcp katman arasında birden fazla fcc atomlardan oluşan tabaka ise deformasyon ikizleri olarak ifade edilir [1, 41]. Buna göre Şekil 5' de (b) noktasına karşılık gelen ve nano telin orta bölgesinde okla gösterilen yerde bir içsel yığılma kusuru ve nano telin üst bölgesinde bir harici yığılma kusuru oluşumu tespit edilmiştir. (c) noktasında ise zorun artmasıyla okla gösterilen bölgede atomların yeniden düzenlenmesi sonucu küçük ikiz plakalar şeklinde oluşan deformasyon ikizlenmesi bölgesinin meydana geldiği gözlenmiştir. Devam eden süreçte Şekil 5(d-f) de verilen atomik görüntülerden hcp yığılma kusurlarının arttığı ve yeni yığılma kusurlarının oluşumu sonucu plastik şekil değişiminin devam ettiği tespit edilmiştir.



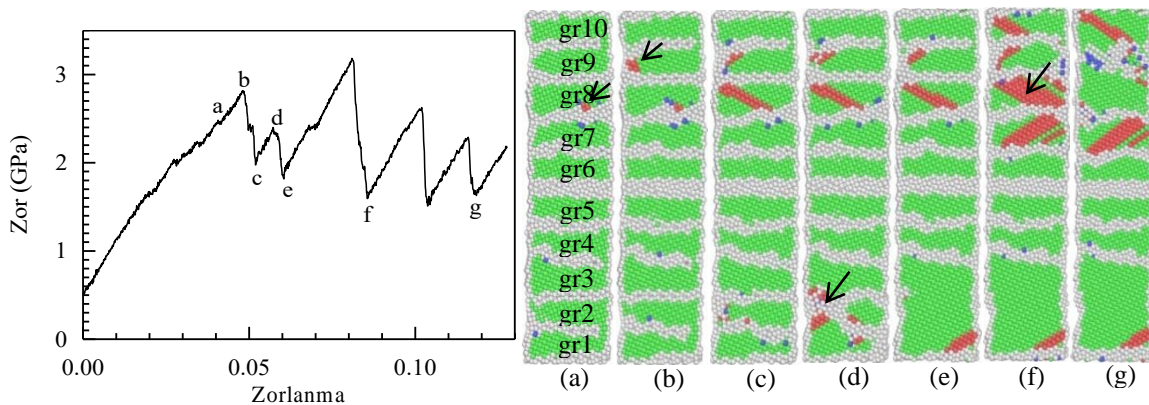
Şekil 6. Tek kristal Ni nano telinin zor-zorlanma eğrisinde a-c noktaları için elde edilen atomik konfigürasyonların DXA analizi sonucu Shockly kısmi dislokasyon çizgilerinin yapı içerisindeki gelişimi.

Şekil 7'de Ni4 ikiz sınırlı nano teline uygulanan çekme deformasyonu sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrisi ve bu eğrinin farklı noktaları için [001] düzlem kesitinden belirlenen atomik konumlar verilmiştir. Şekil 7'(a) da 3,5 nm ikiz sınır aralığına sahip Ni4 nano telinin akma noktası (a) da gr3 tanesi içerisinde, noktali daire ile gösterilen ikiz sınırı ve serbest yüzeyin kesişim noktasında hcp ve bcc birim hücreli atomlarının kümelendiği bölgede $1/6[\bar{1}12]$ burgers vektörlü, $1/6\langle 112 \rangle$ Shockley kısmi dislokasyonunun çekirdeklenmesi tespit edilmiştir. Cu nano teline çekme deformasyonunun uygulandığı bir çalışmada, akma başlangıcının uyumlu ikiz sınırları ve serbest yüzey arasındaki kesişim noktasında kısmi dislokasyonların çekirdeklenmesi ve yayılmasıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir [22]. Bununla birlikte serbest yüzeyden çekirdeklenen kısmi dislokasyonlar bloke olmadan uyumlu ikiz sınırlarını kesebilir, bu da ilk akma noktasından sonra keskin bir akma ve önemli zor düşmesine neden olur [22]. Zorlanmanın artmasıyla hcp birim hücreli yapıların tane içerisinde yayılması sonucu içsel yığılma kusurlarının oluşumu Şekil 7 (b)'de ok ile gösterilmiştir. Zor-zorlanma eğrisinin c noktası için elde edilen atomik görüntüde, gr2 ve gr3 tanelerini ayıran ikiz sınırında noktali daireler ile işaretlenen bölgelerde hcp birim hücrelerinden oluşan yeni çekirdeklenme noktaları tespit edilmiştir. Zor değerinin yeniden ani bir düşüş gösterdiği d noktasında, gr2 ve gr3 taneleri içerisinde çekirdeklerin gelişip tane içlerine yayılması sonucu oklarla gösterilen hcp yapı yığılma kusur düzlemlerinin oluşumu görülmektedir. Bununla birlikte gr3 tanesi içerisinde hcp birim hücreli yığılma kusur düzlemlerinin arasında dışsal bir yığılmanın da meydana geldiği dikkat çekmektedir. İkiz sınırlarının, dislokasyon çekirdeklenmesi için kritik zoru azaltan bir kaynak olarak hizmet ettiği ve dislokasyonların ikiz sınırları ile serbest yüzeyler arasındaki kesişim noktasında çekirdeklenmeyi tercih ettiği bildirilmiştir [49-51]. Zorlanmanın artmasıyla gr3 tanesinin içinde hcp atomlarından oluşan yığılma kusurlu tabakaların sayısının arttığı, (e) de verilen atomik konfigürasyonlardan açıkça görülmektedir. İlerleyen çekme işlemi esnasında gr2 ve gr3 taneleri içerisinde okla gösterilen bölgelerde deformasyon ikizlenmelerinin oluşumu, (f) ve (g) atomik konumlarından tespit edilmiştir. Deformasyon ikizlenmesi, dislokasyon kaymasına ek olarak plastik deformasyonda önemli bir rol oynayan büyük taneli fcc metaller ve alaşımlarda yaygın olarak gözlemlenir [56, 57]. Deformasyon ikizlerinin oluşumunun, bitişik {111} kayma düzlemleri üzerinde ard arda Shockly kısmi dislokasyon kaymasını içerdiği kabul edilmektedir. Dislokasyonlar ve ikiz sınırları arasındaki etkileşimler ikiz oluşumunu teşvik eder [58].



Şekil 7. İkiz yapılı Ni4 nano tel model sistemi için elde edilen zor-zorlanma eğrisi ve bu eğri üzerinde gösterilen farklı noktalar için CNA analizinden belirlenen atomik görüntüler.

Şekil 8’de, Ni10 nano tel model sistemine uygulanan çekme deformasyonu esnasında elde edilen zor-zorlanma eğrisi ve bu egride belirlenen farklı noktalar için nano telin atomik konumları gösterilmiştir. Zor-zorlanma eğrisinde akma noktasından önceki a noktası ve plastik şekil değişiminin başladığı b-c noktalarından elde edilen atomik görüntülerden, oklarla gösterildiği gibi gr8 tanesinin tane sınırında ve gr9 tanesinin tane sınırı ve serbest yüzeyin kesiştiği noktada Shockly kısmı dislokasyonlarının çekirdeklendiği ve sonrasında da bu dislokasyonların yapı içerisinde yığılım kusurları oluşturduğu tespit edilmiştir. İkiz yapıdaki Cu nano sütunlar üzerine yapılan çekme testlerinde ikiz sınırları ve serbest yüzeylerin kesiştiği yerlerde dislokasyon çekirdeklenmelerinin baskın olduğu bulunmuştur [59]. Tane sınırlarının, oluşan yığılım kusurlarının yayılımını engellediği elde edilen bütün atomik konfigürasyonlarda açıkça görülmektedir. Bununla birlikte zor-zorlanma eğrisinde (d) noktasına karşılık gelen atomik konumda, gr1 ve gr2 tanelerini ayıran ikiz tane sınırı ile gr2 ve gr3 tanelerini ayıran ikiz tane sınırlarının okla gösterilen bölgede birleşmeye başladığı dikkat çekmektedir. Artan zorlanmayla birlikte atomlar yeniden düzenlenerek gr1, gr2 ve gr3 tanelerinin sınır bölgelerinin kalktığı ve tek bir tane yapısına dönüştüğü ve bu yapının ilerleyen süreçlerde korunduğu belirlenmiştir. Koherent ikiz sınırları dislokasyon kayması için bir bariyer görevi görür. Ancak belirli koşullar altında kayma, koherent ikiz sınırları üzerinden aktarılabilir. Koharent ikiz sınırlarının tüm kristal yönelimleri için etkili bir bariyer olarak hareket etmediği, kayma transfer mekanizmasının tüm fcc metalleri için aynı olmadığı tespit edilmiştir [60]. Düşük açılı tane sınır oluşturan ayırık örgü dislokasyonları belirli bir gerilim seviyesinde hareketli hale gelebilir ve tane sınırı ortadan kalkar [61]. Benzer bir davranış koherent ikiz konfigürasyonuna sahip olan tane sınırları için de rapor edilmiştir [62, 63]. Yapılan çalışmalarda Ni nano tel sistemine uygulanan çekme deformasyonu sonucu ikiz sınırların birbirine doğru yayıldığı ve ardından bozulmamış bir <100> nano tel bırakarak yok oldukları belirlenmiştir [64]. (f) noktası için elde edilen atomik görüntüde gr7, gr8 ve gr10 tanelerinde hcp atomlarından oluşan yığılım kusurlu düzlemlerin sayısının arttığı tespit edilmiştir. Son olarak gr8 tanesindeki yığılım kusurlarının ortadan kalktığı, atomların yeniden düzenlenerek fcc birim hücreli tane yapısının oluştuğu ve gr9 tanesinin ise diğer olarak adlandırılan tanımsız birim hücrelerden oluşan bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 8. İkiz yapılı Ni10 nano tel model sistemi için elde edilen zor-zorlanma eğrisi ve bu eğri üzerinde gösterilen farklı noktalar için CNA analizinden belirlenen atomik görüntüler.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada farklı ikiz sınır aralığına sahip Ni nano tellerine uygulanan tek eksenli çekme zorlanması sonucu mekanik özelliklerin değişimi ve plastik şekil değişiminin mikro yapısal gelişimleri MD benzetim yöntemi ile incelendi. Farklı ikiz sınır aralığına sahip ve uyumlu ikiz sınırlar içeren Ni nano tellerinde atomlar arası etkileşimler GAM kullanılarak modellendi. İkiz sınır aralığının Ni nano tellerinin elastiklik modülü ve akma zoru üzerinde etkili olduğu belirlendi. Plastik şekil değişiminin dislokasyonlar ve ikiz deformasyonu oluşumu ile meydana geldiği görüldü. Bununla birlikte nano tel içerisinde yığılım kusurlarının ve dislokasyonların yayılımının ikiz sınırları tarafından engellendiği belirlendi. Dislokasyon emisyonunun her zaman Shockly kısmi dislokasyonunun tane sınırlarında çekirdeklenmesiyle gerçekleştiği görüldü. İkiz sınır aralığının azalmasıyla nano tellerde sünekliliğin arttığı bilinirken çalışmamızda bu artışın istenilen düzeyde olmadığı belirlenmiştir. Bu durumun atom sayısı, nano telin geometrisi, ikiz sınır açısı, uygulanan zorlanma oranı gibi faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Wu, B., Heidelberg, A., & Boland, J. J. (2005). Mechanical properties of ultrahigh-strength gold nanowires. *Nature Materials*, 4(7), 525-529.
- [2] Hasmy, A., & Medina, E. (2002). Thickness Induced Structural Transition in Suspended fcc Metal Nanofilms. *Physical Review Letters*, 88, 096103.
- [3] da Silva, E. Z., da Silva, A. J. R., & Fazzio, A. (2001). How Do Gold Nanowires Break?. *Physical Review Letters*, 87, 256102.
- [4] Xia, S., Liu, L., Kong, Y., Wang, M. (2016). Uniaxial strain effects on the optoelectronic properties of GaN nanowires, *Superlattices and Microstructures*, 97, 327-334.
- [5] Sainath, G., Choudhary, B. (2015). Molecular dynamics simulation of twin boundary effect on deformation of Cu nanopillars. *Physics Letters A*, 379(34), 1902-1905.
- [6] Zhan, H., Gu, Y., Yan, C., & Yarlagadda, P. K. (2014). Bending properties of Ag nanowires with pre-existing surface defects. *Computational Materials Science*, 81, 45-51.
- [7] Pak, O. S., Gao, W., Wang, J., Lauga E. (2011). High-speed propulsion of flexible nano wire motors: theory and experiments, *Soft Matter*, 7, 8169-8181.
- [8] Weinberger, C. R., Cai, W. (2012). Plasticity of metal nano wires. *J. Mater. Chem.* 22, 3277-3292.
- [9] Wu, H., Kong, D., Ruan, Z., Hsu, P. C., Wang, S., Yu, Z., Carney, T. J., Hu, L., Fan, S., & Cui, Y. (2013). A transparent electrode based on a metal nanotrough network. *Nature Nanotechnology*, 8 (6), 421-425.
- [10] Jang, J., Hyun, B. G., Ji, S., Cho, E., An, B. W., Cheong, W. H., & Park, J. U. (2017). Rapid production of large-area, transparent and stretchable electrodes using metal nanofibers as wirelessly operated wearable heaters. *NPG Asia Materials*, 9 (9), e432.
- [11] Ji, S., Jang, J., Cho, E., Kim, S. H., Kang, E. S., Kim, J., Kim, H. K., Konh, H., Kim, S. K., Kim, J. Y., Park, J. U. (2017). High dielectric performances of flexible and transparent cellulose hybrid films controlled by multidimensional metal nanostructures. *Advanced Materials*, 29, 1700538.
- [12] Liu, H., Zhou, J. (2016). Plasticity in nanotwinned polycrystalline Ni nanowires under uniaxial compression. *Materials Letters*, 163, 179-182.
- [13] Wang, L., Zhang, Z., Han, X. (2013). In situ experimental mechanics of nanomaterials at the atomic scale. *NPG Asia Materials*, 5, e40.
- [14] Lu, L., Shen, Y., Chen, X., Qian, L., Lu, K. (2004). Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper. *Science*, 304, 422-426.
- [15] Lu, L., Chen, X., Huang, X., Lu, K. (2009). Revealing the maximum strength in nanotwinned copper. *Science*, 323, 607-610.
- [16] Hammami, F., & Kulkarni, Y. (2014). Size effects in twinned nanopillars. *Journal of Applied Physics*, 116, 033512.

- [17] Li, X., Wei, Y., Lu, L., Lu, K., & Gao, H. (2010). Dislocation nucleation governed softening and maximum strength in nano-twinned metals. *Nature*, 464, 877-880.
- [18] Wei, Y. (2011). Scaling of maximum strength with grain size in nanotwinned fcc metals. *Physical Review B*, 83, 132104.
- [19] Afanasyev, K. A., & Sansoz, F. (2007). Strengthening in Gold Nanopillars with Nanoscale Twins. *Nano Letters*, 7, 2056-2062.
- [20] Cao, A. J., Wei, Y. G., & Mao, S. X. (2007). Deformation mechanisms of face-centered-cubic metal nanowires with twin boundaries. *Applied Physics Letters*, 90, 151909.
- [21] Deng C., & Sansoz, F. (2009). Size-dependent yield stress in twinned gold nanowires mediated by site-specific surface dislocation emission. *Applied Physics Letters*, 95, 091914.
- [22] Deng, C., & Sansoz, F. (2009). Fundamental differences in the plasticity of periodically twinned nanowires in Au, Ag, Al, Cu, Pb and Ni. *Acta Materialia*, 57, 6090-6101.
- [23] Jang, D., Li, X., Gao, H., & Greer, J. R. (2012). Deformation mechanisms in nanotwinned metal nanopillars. *Nature Nanotechnology*, 7, 594-601.
- [24] Sofiah, A. G. N., Samykano, M., Kadirgama, K., Mohan, R. V., Lah, N. A. C. (2018). Metallic nanowires: Mechanical properties-Theory and experiment. *Applied Materials Today*, 11, 320-337.
- [25] Spearot, D. E., Tschopp, M. A., Jacob, K. I., McDowell, D. L. (2007). Tensile strength of <100> and <110> tilt bicrystal copper interfaces. *Acta Materialia*, 55(2), 705-714.
- [26] Spearot, D. E., Capolungo, L., Qu, J., Cherkaoui, M. (2008). On the elastic tensile deformation of <100> bicrystal interfaces in copper. *Computational Material Science*, 42(1), 57-67.
- [27] Rapaport, D. (2004). *The art of molecular dynamics simulation*, 2nd ed. Cambridge University press., 199-244.
- [28] Leach, A. R., Schomburg, D. (2001). *Molecular Modelling: Principles and Applications*, 2nd ed. Longman, London, 353-406.
- [29] Finbow, G. M., Lynden-Bell, R. M., McDonald, I. R. (1997). Atomistic simulation of the stretching of nanoscale metal wires. *Molecular Physics*, 92, 705-714.
- [30] Branicio, P. S., Rino, J. P. (2000). Large Deformation and Amorphization of Ni Nanowires under Uniaxial Strain: A Molecular Dynamics Study. *Physical Review B*, 62, 16950-16955.
- [31] Nakamura, A., Brandbyge, M., Hansen, L. B., Jacobsen, K. W. (1999). Density functional simulation of a breaking nanowire. *Physical Review Letters*, 82, 1538-1541.
- [32] Walsh, P., Li, W., Kalia, R. K., Nakano, A., Vashishta, P., Saini, S. (2001). Structural Transformation, Amorphization, and Fracture in Nanowires: A Multi-million Atom Molecular Dynamics Study. *Applied Physics Letters*, 78, 3328-3330.
- [33] <http://lammps.sandia.gov/>. LAMMPS Molecular Dynamics Simulator (Erişim Tarihi:02.04.2021).
- [34] Kazanc, S. (2013). The effects on the lattice dynamical properties of the temperature and pressure in random NiPd alloy. *Canadian Journal of Physics*, 91, 833-838.
- [35] Kazanc, S., Ozgen, S., Adiguzel, O. (2003). Pressure effects on martensitic transformation under quenching process in a molecular dynamics model of NiAl alloy. *Physica Bi* 334, 375-381.
- [36] Jacobus, K., Sehitoglu, H., Balzer, M. (1996). Effect of stress state on the stress-induced martensitic transformation in polycrystalline Ni-Ti alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27(A), 3066-3073.
- [37] Malins, A., Williams, S. R., Eggers, J., Royall, C. P. (2013). Identification of structure in condensed matter with the topological cluster classification. *The Journal of Chemical Physics*, 139, 234506.
- [38] Stukowski, A. (2012). Structure identification methods for atomistic simulations of crystalline materials. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 20, 045021.
- [39] Foiles, S. M., Baskes, M. I., & Daw, M. S. (1986). Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys. *Physical Review B*, 33, 7983.
- [40] Gao, Y., Sun, Y., Yang, Y., Sun, Q., Zhao, J. (2015). Twin boundary spacing-dependent deformation behaviours of twinned silver nanowires. *Molecular Simulations*, 41, 1546.
- [41] Hou, Z., Xiao, Q., Wang, Z., Wang, J., Liu, R., Wang, C. (2020). Effect of twin boundary spacing on the deformation behaviour of Au nanowire. *Physica B*, 581, 411952.
- [42] Stukowski, A. (2010). *Atomic- Scale Modeling of Nanostructured Metals and Alloys*. Zur Erlangung des akademischen Grades des Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Dissertation vorgelegt von Dipl.-Phys. Technische Universität, Darmstadt.
- [43] Stukowski, A. (2010). Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO-the Open Visualization Tool. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 18(1), 015012.

- [44] Bañuelos, E. U., Aburto, C. C., Arce, A. M. (2016). A common neighbor analysis of crystallization kinetics and excess entropy of charged spherical colloids. *The Journal of Chemical Physics*, 144, 094504.
- [45] Fanga, R., Wanga, W., Guoa, L., Zhanga, K., Zhanga, X., Lib, H. (2020). Atomic insight into the solidification of Cu melt confined in graphene Nanoslits. *Journal of Crystal Growth*, 532, 125382.
- [46] Wen, Y. H., Zhang, Y., Wang, Q., Zheng J. C., Zhu, Z. Z. (2010). Orientation-dependent mechanical properties of Au nanowires. *Computational Materials Science*, 48, 513-519.
- [47] Wu, H. A. (2006). Molecular dynamics study of the mechanism of metal nanowires at finite temperature. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 25, 370-377.
- [48] Hyde, B., Espinosa, H. D., Farkas, D. (2005). An atomistic investigation of elastic and plastic properties of Au nanowires. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 57, 62-66.
- [49] Yin, Q., Wang, Z., Mishra, R., & Xia, Z. (2017). Atomic simulations of twist grain boundary structures and deformation behaviors in aluminum. *Aip Advances*, 7, 015040.
- [50] Deng, C., Sansoz, F. (2009). Near-Ideal Strength in Gold Nanowires Achieved through Microstructural Design. *ACS Nano*, 3, 3001.
- [51] Guo, X., Xia, Y. Z. (2011). Repulsive force vs. source number: Competing mechanisms in the yield of twinned gold nanowires of finite length. *Acta Materialia*, 59, 2350.
- [52] Paul, S. K. (2018). Effect of twist boundary angle on deformation behavior of $\langle 100 \rangle$ FCC copper nanowires. *Computational Materials Science*, 150, 24–32.
- [53] Kardani, A., & Montazeri, A. (2020). Metal-matrix nanocomposites under compressive loading: Towards an understanding of how twinning formation can enhance their plastic deformation. *Scientific Reports*, 10, 9745.
- [54] Bejaud, R., Durinck, J., & Brochard, S. (2018). Twin-interface interactions in nanostructured Cu/Ag: Molecular dynamics study. *Acta Materialia*, 144, 314–324.
- [55] Pukic, N., Jenko, M., Godec, M., & Mcguiness, P. J. A. (2017). comparison of the uniaxial deformation of copper and nickel (1119). surfaces: A molecular dynamics study. *Scientific Reports*, 7, 42234.
- [56] Christian, J. W., Mahajan, S. (1995). Deformation twinning. *Prog.Mater Sci.*, 39, 1– 157.
- [57] Beyerlein, I. J., Zhang, X., Misra, A. (2014). Growth twins and deformation twins in metals. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 44, 329–363.
- [58] Zhao, X., Lu, C., Tieu, A. K., Zhan, L., Huang, M., Su, L., Pei, L., Zhang, L. (2018). Deformation twinning and dislocation processes in nanotwinned copper by molecular dynamics simulations. *Computational Materials Science*, 142, 59–71.
- [59] Jang, D., Li, X., Gao, H., Greer, J. (2012). Deformation mechanisms in nanotwinned metal nanopillars. *Nature Nanotechnology*, 7, 594.
- [60] Ezaz, T., Sangid, M. D., Sehitoglu, H. (2011). Energy barriers associated with slip twin interactions. *Phil. Mag.*, 91, 1464-1488.
- [61] Farkas, D., & Patrick, L. (2009). Tensile deformation of fcc Ni as described by an EAM potential. *Philos. Mag.*, 89(34),3435–3450.
- [62] Bitzek, E., Derlet, P. M., Anderson, P. M., & Swygenhoven, H. V. (2008). The stress-strain response of nanocrystalline metals: A statistical analysis of atomistic simulations. *Acta Materialia*, 56(17), 4846–4857.
- [63] Froseth, A. G., Derlet, P. M., & Swygenhoven, H. V. (2006). Vicinal twin boundaries providing dislocation sources in nanocrystalline. *Al. Scr. Mater.*, 54(3), 477–481.
- [64] Park, H. S., Gall, K., Zimmerman, J. A. (2006). Deformation of fcc nanowires by twinning and slip. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 54, 1862–1881.

Araştırma Makalesi - Research Article

Design, Synthesis, and Biological Evaluation of Curcumin- β -sitosterol Conjugate a Potential Candidate for Breast Cancer Therapy

Meme Kanseri Tedavisi için Potansiyel Bir Aday Olan Kurkumin- β -Sitosterol Konjugatının Tasarımı, Sentezi ve Biyolojik Değerlendirmesi

Sevinç İlkar Erdağı^{1*}

Geliş / Received: 01/04/2022

Revize / Revised: 09/12/2022

Kabul / Accepted: 09/12/2022

ABSTRACT

In this study, a novel steroidal conjugate was prepared via a convenient click chemistry technique. β -sitosterol (BS), a widely distributed phytosterol throughout the plant kingdom, was chosen as a steroidal component. It is known that BS uses in the stabilization of cell membranes and has beneficial effects in different diseases. On the other hand, curcumin (CUR), a phenolic compound, was used as a phytochemical agent with a variety of biological activities. The steroidal conjugate (BS-CUR) was achieved in high yield using azide-alkyne cyclization reaction. The structure of BS-CUR was elucidated by using FTIR, NMR, HRMS, and fluorescence spectroscopy techniques. *In vitro* cytotoxicity assays of the BS-CUR conjugate were evaluated against human breast cancer (MDA-MB-231) and healthy mouse fibroblast cell line (L929), respectively. The preliminary evaluation indicated that BS conjugate exhibited good cytotoxicity compare with the native compounds, CUR and BS. The BS-CUR conjugate could be considered a potential compound for further design and synthesis of highly effective anticancer agents.

Keywords- *Curcumin, Cytotoxicity, Steroid, Steroidal conjugate, β -Sitosterol*

ÖZ

Bu çalışmada, klik kimyası tekniği ile yeni bir steroidal konjugat hazırlandı. Bitki dünyasında yaygın olarak kullanılan bir fitosterol olan β -sitosterol (BS) steroidal bir bileşen olarak seçildi. BS'nin hücre zarlarının stabilizasyonunda kullanıldığı ve farklı hastalıklarda faydalı etkileri olduğu bilinmektedir. Fenolik bir bileşik olan kurkumin (CUR) ise çeşitli biyolojik aktivitelere sahip bir fitokimyasal ajan olarak kullanıldı. Steroidal konjugat (BS-CUR), azid-alkin halkalaşma reaksiyonu kullanılarak yüksek verimle elde edildi. BS-CUR'nin yapısı FTIR, NMR, HRMS ve floresans spektroskopisi teknikleri kullanılarak aydınlatıldı. BS-CUR konjugatının anti-kanser ve biyoyumluluk analizleri, sırasıyla insan meme kanseri (MDA-MB-231) ve sağlıklı fare fibroblast (L929) hücre hatlarına karşı değerlendirildi. Ön değerlendirme, BS konjugatının, doğal bileşikler CUR ve BS ile karşılaştırıldığında iyi sitotoksikite sergilediğini gösterdi. BS konjugat, yüksek potansiyele sahip anti-kanser ajanlarının daha ileri tasarımı ve sentezi için umut verici bir ajan olarak düşünülebilir.

Anahtar Kelimeler- *Kurkumin, Steroid, Steroidal Konjugat, β -Sitosterol, Sitotoksikite*

^{1*}Corresponding author contact: sevincilkar@kocaeli.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5811-2302>)
Department of Chemistry, Kocaeli University, Umuttepe campus, 41001, Kocaeli, Turkey

I. INTRODUCTION

Steroids are classes of natural products that play an important role in the development of novel drugs. The broad bioactivity spectrum of steroids has drawn the attention of researchers to develop new approaches and synthesize novel steroid derivatives [1, 2]. Phytosterols or plant sterols are a subgroup of the steroids found exclusively in plants, vegetable oils and foods such as peanut butter, pistachios and sunflower seeds [3]. Phytosterols have cholesterol-like structure from which they differ in their side chains and ability to reduce of cholesterol level in blood by inhibiting its absorption from the intestine in humans. β -sitosterol ((24R)-ethyl-5-cholestene-3 β -ol) (BS) is the most abundant phytosterol and has a chemical structure similar to that of cholesterol [4]. It reduces the absorption of exogenous cholesterol in the intestine and is therefore used as an anti cholesteremic [5]. In vivo and in vitro studies have demonstrated that BS as a steroidal drug has the potential to inhibit tumour cell growth such as human colon, prostate, and breast cancer [6]. It has also anti-inflammatory effects, antioxidant, antidiabetic, antimicrobial, and antiviral activities [7]. BS has been found not toxic and is considered a safe and natural compound with many potential benefits [8]. Estrogen plays a role in the development of breast cancer, especially in its early stages. It has been shown in both clinical studies and epidemiologic data that BS inhibits in vitro proliferation of MCF-7, an estrogen receptor positive breast cancer cell line due to showing estrogen-mimetic activity. On the other hand, it has been reported that BS has a significant effect on inducing apoptosis in hormone-insensitive and metastatic MDA-MB-231 cells (estrogen receptor negative) [3, 9].

A current approach to the design of active molecular species relies on the conjugation of two or more biologically active compounds. With the combination molecules provided by this conjugation, a higher synergistic effect can be achieved on a single target molecule. Multifunctional conjugates may exert therapeutic effects at lower concentrations compared to single molecules [10]. In recent years, steroids have been widely used for conjugation with other biologically active molecules and have shown a variety of applications in biology, material sciences as well as pharmaceutical sciences [11]. Phytosterols have a therapeutic effect only at high concentrations, and it is therefore thought that combining steroids with other biologically active agents may be effective even at low concentrations [12]. Conjugation of an active agent to a steroid can enhance the antiproliferative activity and diminish the side effects and change its selectivity.

Natural products are promising bioactive compounds for bioconjugates in drug discovery. They show effective properties not only structural diversity but also many biological activities. Many research studies describe the bioconjugates derived from natural products having a range of biological activities [13]. *Curcuma longa* L. from the Zingiberaceae family is one of the famous natural products for its bioactive compound called curcumin as its main substance [14]. Curcumin (CUR), a natural diphenolic yellow-orange polyphenol, has various therapeutic properties such as anticancer, anti-inflammatory, antioxidant, antimicrobial, and antiviral properties [15]. It has been proven that curcumin is not toxic and safe by several in vitro and in vivo studies. CUR has three sites, two phenolic and one active methylene group, for attachment of the drugs or ligands and it is a good candidate to synthesize novel drugs [16].

Conjugation of biologically active compounds provides two benefits: First, conjugation of steroids with biologically active agents can have enhanced biological activity compared to unconjugated steroids. Second, the conjugation of biologically active agents with steroids can increase their ability to penetrate cells and achieve specific targets. Altogether, the conjugation of these two compounds provides a better therapeutic effect, more specific activity, and less toxicity. In this study, we reported to synthesis of an effective steroidal-conjugate by the combination of BS, an important phytosterol, and CUR, which has broad spectrum of pharmacological effects. We obtained this conjugation using the copper(I)-catalyzed "click reaction", between azide-terminated BS and alkyne-terminated CUR. We elucidated the structural analysis of the obtained target β -sitosterol-curcumin (BS-CUR) conjugate using FTIR, NMR, HRMS, and fluorescence techniques. We also evaluated the in vitro cytotoxicity of BS-CUR conjugate on MDA-MB-231 and L929 cell lines. According to the results obtained, we can say that it is biocompatible and not toxic to L929 cells, but it is toxic to the MDA-MB-231 cell line.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Materials

The starting compounds β -sitosterol ($\geq 95\%$) and curcumin (from *Curcuma longa* (Turmeric), powder), Triethylamine (TEA) ($\geq 99.5\%$), 4-Bromobutyl chloride (95%), Sodium azide (NaN_3) ($\geq 99.5\%$), Sodium sulfate (Na_2SO_4) ($\geq 99.0\%$, anhydrous, powder), Propargyl bromide solution ($\sim 80\%$ in toluene), Potassium carbonate (K_2CO_3) ($\geq 99.0\%$), N,N,N',N',N'-Pentamethyldiethylenetriamine (PMDETA) (99%), and Copper (I) bromide (CuBr) (98%) were purchased from Sigma Chemicals, USA. All solvents used in this study were of analytical grade.

B. Characterization methods

Reactions were monitored in Merck aluminium sheet silica gel thin layer plates (TLC, 60F254), visualized in UV-cabinet ($\lambda_{\text{max}} = 254$ and 365 nm) and further charred with 1% p-anisaldehyde in 2% aqueous sulphuric acid with subsequent heating at 105°C . Melting points were determined in open capillaries in E-Z Melt melting point apparatus, Stanford Research System, USA. Solvents were evaporated under reduced pressure at 50°C in Buchi Rotavapor. ^1H and ^{13}C Nuclear Magnetic Resonance (NMR) experiments were performed on NMR Bruker Avance DRX 500 MHz spectrometer using tetramethylsilane (TMS, δ scale, 0.00 ppm) as internal standard. The chloroform (δ - CDCl_3) and dimethyl sulfoxide (DMSO- δ_6) as the solvents, and their chemical shifts were stated in ppm (δ). The NMR data were processed using MestreNova 12.0 software (Mestrelab Research, Spain). Coupling constants (J) are given in Hertz (Hz). Splitting of peaks are abbreviated as s for singlet, d for doublet, t for triplet, q for quartet, bs for broad singlet, and m for multiplet. Electrospray mass analysis was done on API 3000 Triple Quad LC-MS (Applied Biosystem, USA) mass spectrometer after dissolving samples in methanol or acetonitrile. IR spectra were recorded on a Perkin Elmer Frontier apparatus (ν , cm^{-1}) (PerkinElmer Inc., Waltham, MA, USA).

C. Experimental methods

Synthesis of BS-(CH_2)₃-Br

β -sitosterol (1 g, 2.4 mmol) was dissolved in anhydrous THF (100 mL) in a two-necked flask equipped with a magnetic stirrer and rubber septum under inert argon atmosphere. TEA (0.632 g, 6.24 mmol) was then added to the reaction vessel, which was cooled to -15°C using an ice-salt mixture. A mixture of 4-bromobutyl chloride (0.586 g, 3.16 mmol) and THF (20 mL) was added dropwise to the reaction mixture for 20 min. The whole mixture was stirred at room temperature for 48 h, diluted with DCM (100 mL), and washed with 1 N HCl solution (2×50 mL). After the organic layers were combined and dried with Na_2SO_4 , the solvent was removed by a rotary evaporator and the compound was dried under reduced pressure at ambient temperature until a constant weight was obtained.

Yield: 1.132 g, 86%. m.p: 56 – 60°C . FTIR (ATR, cm^{-1}): 2950 and 2870 (C-H), 1720 (C=O), 1472 (C-H), 1236 ((C=O)-O), and 1044 (C-O-C). ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3 , δ , ppm): 5.38 (s, H-6, 1H), 4.63 (m, H-3, 1H), 3.47 (t, J= 11 Hz, O(C=O)CH₂CH₂CH₂Br, 2H), 2.48 (t, O(C=O)CH₂CH₂CH₂Br, 2H), 2.17 (m, O(C=O)CH₂CH₂CH₂Br, 2H), 1.02 (s, H-18, 3H), 0.92 (d, J= 5.6 Hz, H-21, 3H), 0.85 (d, J= 8 Hz, H-26, 3H), 0.84 (d, J=7.2 Hz, H-29, 3H), 0.68 (s, H-18, 3H). Elemental analysis: Calcd for $\text{C}_{33}\text{H}_{55}\text{O}_2\text{Br}$, C, 70.31; H, 9.83; O, 5.68; Br, 14.18. Found 70.18; H, 9.86; O, 5.66; Br, 14.3. HRMS (m/z): (M+H)⁺, Calcd for $\text{C}_{33}\text{H}_{55}\text{O}_2\text{Br}$, 562.33635, found 562.33510.

Synthesis of BS-(CH_2)₃-N₃

BS-(CH_2)₃-Br (1 g, 1.82 mmol) and NaN_3 (0.35 g, 5.42 mmol) were dissolved in anhydrous DMF (20 mL) under inert argon atmosphere and stirred for 24 h at 90°C . This mixture was cooled to room temperature, transferred into water (300 mL), extracted with diethyl ether (2×50 mL), and the organic phases were collected and dried with Na_2SO_4 . Consequently, the solvent was removed by a rotary evaporator, and the compound was dried under reduced pressure at ambient temperature until a constant weight was obtained.

Yield: 0.82 g (88%). m.p: 51 – 53°C ; FTIR (ATR, cm^{-1}): 2945 and 2850 (C-H), 2100 (N₃), 1720 (C=O), 1465 (C-H), 1256 ((C=O)-O), and 1045 (C-O-C). ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3 , δ , ppm): 5.38 (s, 1H, H-6), 4.62 (m, 1H, H-3), 3.35 (t, J= 10.6 Hz, 2H, O(C=O)CH₂CH₂CH₂N₃), 2.38 (t, J= 11 Hz, 2H, O(C=O)CH₂CH₂CH₂N₃), 1.90 (m, 2 H, O(C=O)CH₂CH₂CH₂N₃), 1.01 (s, 3H, H-18), 0.90 (d, J= 5.6 Hz, 3H, H-21), 0.86 (d, J= 8 Hz, 3H, H-26), 0.86 (d, J=7.2 Hz, 3H, H-29), 0.67 (s, 3H, H-18). Elemental analysis: Calcd for $\text{C}_{33}\text{H}_{55}\text{O}_2\text{N}_3$ C, 75.38; H, 10.54;

O, 6.09; N, 7.99. Found 75.13; H, 10.45; O, 6.01; N, 8.41. HRMS (m/z): (M+H)⁺, Calcd for C₃₃H₅₅O₂N₃ 525.42945, found 525.43612.

Synthesis of curcumin mono alkyne

Curcumin (5 g (purity is around 65%), 8.82 mmol) was reacted with propargyl bromide (0.783 mL 80 wt. % in toluene, 8.82 mmol) in the presence of K₂CO₃ (1.21 g, 8.82 mmol) with 70 mL acetone under N₂ atmosphere for 48 h at room temperature. The reaction solvent was removed under reduced pressure, the reaction mixture was extracted with CH₂Cl₂ and the combined organic phases were washed with water and brine, dried and concentrated. The resulting residue was purified by column chromatography (silica gel, 0.5% ~ 1% acetone in CH₂Cl₂) to give the desired product as an orange solid.

Yield: 42%. FTIR (ATR, cm⁻¹): 3290, 3260, 2970, 2920, 1620, 1578, 1410, 1250. ¹H NMR (500 MHz, CDCl₃, δ): 7.62–7.58 (d, 2H), 7.15–6.98 (m, 6H), 6.52–6.49 (d, 2H), 5.93 (d, 1H), 5.80 (s, 1H), 4.81 (d, 2H), 3.92 (s, 6H), 2.54 (s, 1H). Elemental analysis: Calcd for C₂₄H₂₂O₆ C, 70.92, H, 5.46, O, 23.62. Found C, 70.94, H, 5.43, O, 24.63. HRMS (m/z): for C₂₄H₂₂O₆ [M+H]⁺calcd. 407.1484, found 407.1857.

Synthesis of BS-CUR conjugate

BS-(CH₂)₃-N₃ (0.511 g, 1 mmol) and CMA (0.487 g, 1.2 mmol) were dissolved in degassed DMF (5 mL) under argon atmosphere. PMDETA (0.554 g, 3.2 mmol) was then added, and the solution was gently purged with argon for 5 min. Then, copper (I) bromide (0.459 g, 3.2 mmol) was added to the reaction mixture, and again degassed by purging with argon for 5 min. After stirring the reaction mixture at room temperature for 48 h, azido-functional Merrifield resin (0.150 g) was added [17]. This suspension was purged with argon for 5 min and stirred for additional 72 h at ambient temperature. The insoluble resin was removed by gravity filtration through a paper filter (Schleicher & Schuell, blue ribbon, 2 μm) and washed with DCM. Then, the solution was diluted to 100 mL with DCM and washed with brine (50 mL) and water (50 mL). After the collected organic phases were combined and dried with Na₂SO₄, the solvent was removed by a rotary evaporator and product was obtained as an orange solid.

Yield: 0.8 g (86%). m.p: 112–116 °C. FTIR (ATR, cm⁻¹): 3350-3290 (O-H), 2940 and 2868 (C-H), 1730 (C=O), 1655 (C=C), 1460 (C-H), 1250 ((C=O)-O), and 1040 (C-O-C). ¹H NMR (500 MHz, CDCl₃, δ, ppm): 8.18 (s, 1H, -C=CH-N₃ triazole ring), 7.71-6.66 (m, H_{curcumin}), 5.95-5.88 (d, 2H), 5.34 (s, 1H, H-6), 4.64-4.62 (m, 5H, H-3, O(C=O)CH₂CH₂CH₂N₃, and O-CH₂-triazole, respectively), 2.46 (m, 2H, O(C=O)CH₂CH₂CH₂N₃ and m, 2 H, O(C=O)CH₂CH₂CH₂N₃), 1.00 (s, 3H, H-18), 0.92 (d, J= 5.6 Hz, 3H, H-21), 0.86 (d, J= 8 Hz, 3H, H-26), 0.86 (d, J=7.2 Hz, 3H, H-29), 0.67 (s, 3H, H-18). ¹³C NMR (500 MHz, CDCl₃, δ, ppm): 195.19 (2C), 173.98, 151.80, 150.38, 149.33, 148.11, 147.36 (2C), 141.20, 140.82, 129.66, 127.80, 127.13, 126.82, 123.72, 123.30, 122.19, 121.85, 115.67, 114.78, 111.77, 111.12, 75.20, 60.84, 60.06, 56.51 (2C), 56.46, 56.21, 56.24, 51.18, 45.26, 43.60, 40.25 (2C), 39.78 (2C), 37.22, 36.64, 32.55 (2C), 31.84, 31.59, 31.09, 31.03, 30.49, 28.79, 24.87, 21.43, 19.89 (2C), 19.55, 19.43, 18.16, 18.30, 12.66. Elemental analysis: Calcd for C₅₇H₇₇O₈N₃ C, 73.44; H, 8.33; O, 13.73; N, 4.51. Found 73.61; H, 8.42; O, 12.98; N, 4.99. HRMS (m/z): (M+H)⁺, Calcd for C₅₇H₇₇O₈N₃ 931.5711, found 932.5622.

D. In vitro cell viability assays in cell cultures

Cell culture

L929 healthy mouse fibroblast and breast adenocarcinoma (MDA-MB-231) cell lines (American Type Culture Collection (ATCC) Manassas, VA, USA) were used in the present study. Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM), fetal bovine serum (FBS), trypsin-EDTA, and penicillin-streptomycin were obtained from PAN BIOTECH. The cells were cultured in DMEM supplemented with 10% FBS, 10 000 U mL⁻¹ penicillin, and 100 mg mL⁻¹ streptomycin at 37 °C in a humidified environment with 5% CO₂. The culture medium was replenished over alternating days, and the cells were sub-cultured by detaching with trypsin (0.25%)/ethylene diamine tetra acetic acid (EDTA) (0.02%) in phosphate buffer solution. The elution test method was used to obtain an extract from the samples. 0.5 g mL⁻¹ of samples were placed in DMEM with 5% FBS and 100 mg mL⁻¹ of penicillin-streptomycin in the incubator with 5% CO₂ and at 37 °C for 24 h so that any soluble factor could leach into DMEM. After elution, the eluents were sterilized using a 0.22 mm syringe; various concentrations of target compounds were prepared using fresh DMEM for the MTT (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazoliumbromide, Biofroxx, Germany) assay. β-sitosterol and curcumin were used as a positive control and tested in the same manner.

Cytotoxic activity studies (MTT assay)

L929 and MDA-MB-231 cells were plated in flat-bottom 96-well plates at a seeding density 10^5 cells per mL. After seeding, the cells were allowed to attach in an incubator at 37 °C in an environment with 5% CO₂ for 24 h. After attachment, the culture media were removed and replaced with 100 mL of fresh medium containing the test compounds with a concentration gradient of compound ranging from 0.5 µM to 100 µM. Cells with extract-free media were used to determine relative cell survival. The cells were treated with DMSO (Biofroxx, Germany) as a positive control. After the addition of extract concentrations, the cells were incubated for 24 h to observe the cytotoxic and proliferative effects. Finally, a colorimetric MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide) assay was used to determine the cytotoxicity and proliferation. 10 mL of MTT solution (5 mg of MTT mL⁻¹ in phosphate buffer saline (PBS) (15 mM, pH 7.4, Gibco, Paisley, UK) was added to each well and incubated for 3 h at 37 °C so that formazan crystals were formed in the cells. Then, 100 mL of DMSO was added to each well to dissolve the formazan crystals. After 30 min, the optical density (OD) at 570 nm was measured using an Elisa Reader (Thermo scientific Multiskan GO). The mean OD570 value of the negative control group without extract was standardized as 100% alive, and the OD570 values of the test samples were compared to this value. The half-maximal inhibitory concentration (IC₅₀) was determined by nonlinear regression analysis using the Boltzmann sigmoidal function from Origin 9 (OriginLab, Northampton, USA). Selectivity index (SI) values, indicating selectivity for tested cell lines, were calculated from the ratio of IC₅₀ values of the compounds obtained for normal vs. cancer cells. An SI score >3 represented good selectivity. SI was calculated as a ratio of IC₅₀ for a normal cell line to IC₅₀ value for the respective cancerous cell line using the following equation:

$$SI = \frac{IC_{50} \text{ for normal cell line}}{IC_{50} \text{ for cancerous cell line}}$$

E. Statistical analysis

All statistical analyses were performed by the analysis of variance (ANOVA) at the 5% probability level. ANOVA was used to identify the statistical significance between different groups. All measurements were done for at least three replicates. In all studies, $P \leq 0.05$ was considered to be of statistical significance. The results were each presented as mean \pm standard error.

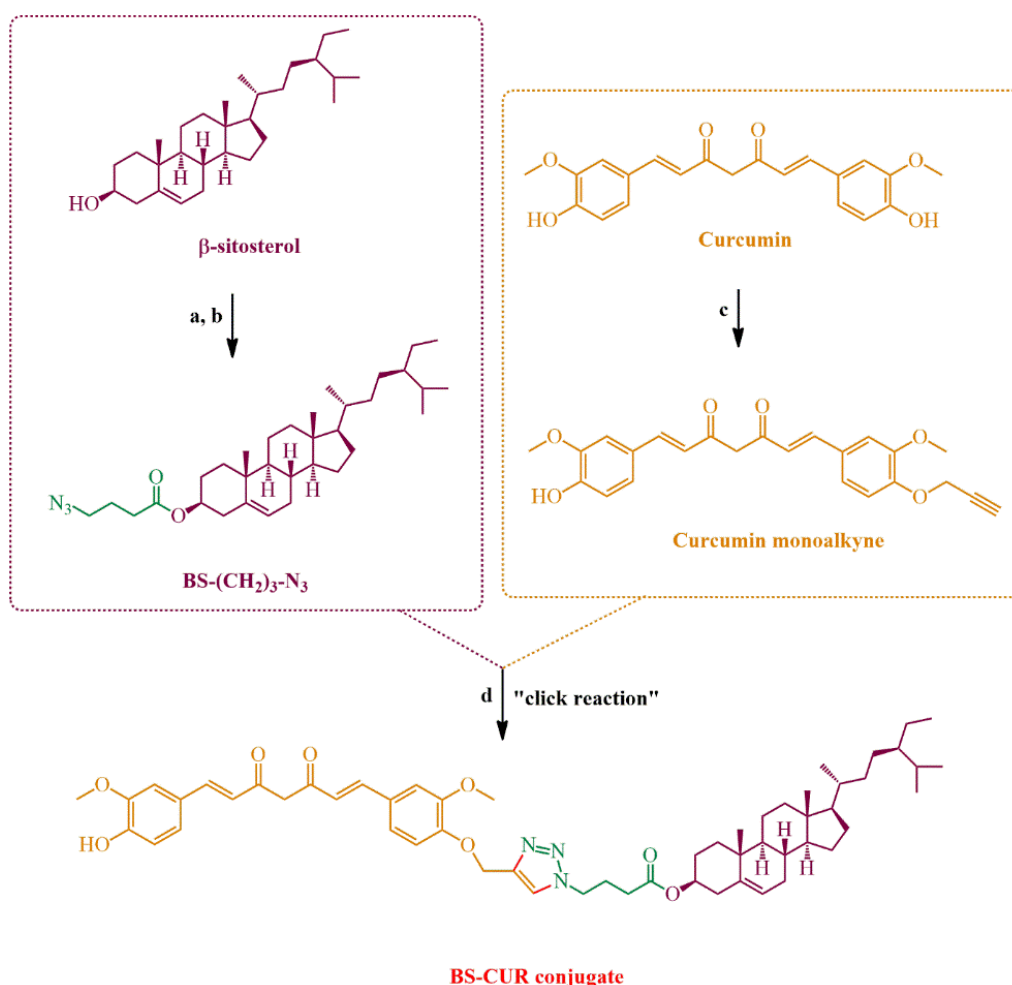
F. Abbreviation List

American Type Culture Collection	ATTC
Analysis of variance	ANOVA
Coupling constants	<i>J</i>
Dulbecco's Modified Eagle's Medium	DMEM
Ethylene diamine tetra acetic acid	EDTA
Fetal bovine serum	FBS
Fourier-transform infrared spectroscopy	FTIR
Half-maximal inhibitory concentration	IC ₅₀
Hertz	Hz
High resolution mass spectrometry	HRMS
Nuclear magnetic resonance	NMR
Optical density	OD
Phosphate buffer solution	PBS
Ppm	δ
Selectivity index	SI
Thin layer chromatography	TLC
Tetramethylsilane	TMS
Wavelength	λ

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Chemistry

The synthesis of the β -sitosterol-curcumin (BS-CUR) conjugate was successfully accomplished using a strategy similar to the one described previously [18]. The general synthetic method for the preparation of BS-CUR is outlined in Scheme 1. The crucial consideration in designing the BS-CUR conjugate is to determine that these two molecules retain their biological activity after chemical bonding. It was reported that the functionalization of the 3-OH of sterols does not affect their binding affinities to cells. On the other hand, it was announced that one of the phenolic oxygens and the C-4 position of curcumin was used to bind the sterol does not change the effect of curcumin in that study [19]. We selected easily available steroid β -sitosterol as a starting compound, which was converted initially to the bromide-functionalized derivative (BS-(CH₂)₃-Br) in high yield (86%) and purity. BS-(CH₂)₃-Br was obtained via reacting the 3-OH group of BS with 4-bromobutrylchloride in the presence of a sufficient amount of TEA in the THF solution. This compound was then reacted with sodium azide to yield an azide-functionalized derivative (BS-(CH₂)₃-N₃). It served as the intermediate for the preparation of the BS-CUR conjugate. On the other hand, for the alkyne derivative, we prepared the curcumin mono alkyne which was then coupled to the BS-(CH₂)₃-N₃ using the "click reaction" to give BS-CUR conjugate. The copper catalyzed "click reaction" was used between the alkyne and azide group for its simplicity and high selectivity. The isolated yield for the BS-CUR conjugate was 86%. The structure of BS-CUR was fully characterized by FTIR, elemental analysis, ¹H NMR techniques, and mass spectrometry. The results are in good agreement with the expected structures.



Scheme 1. Synthesis of BS-CUR conjugate. Reagents and conditions: (a) 4-bromobutrylchloride, THF, TEA; (b) NaN₃, DMF; (c) Propargyl bromide, K₂CO₃, acetone; (d) PMDETA, CuBr.

The FTIR spectrum of BS-CUR conjugate and the intermediate derivatives was shown in Fig.1. The spectrum of BS was also included for comparison. The disappearance of the absorption peak at 3500 cm^{-1} (Fig. 1a) after the reaction BS with 4-bromobutryl chloride, confirmed the conversion of the hydroxyl group into the bromide group (Fig.1b). The strong and sharp absorption peak at 1720 cm^{-1} is attributed to the carbonyl group in the BS-(CH₂)₃-Br. After reaction with NaN₃, the absorption peak at 2100 cm^{-1} belonging to the azide group was seen in Fig.1c. The absence of the azide signal at 2100 cm^{-1} indicated that the click reaction occurred successfully. As seen in Fig.1d, the peaks at 1650, 1732, and $3355\text{-}3295\text{ cm}^{-1}$ in the FTIR spectrum of BS-CUR indicated the presence of the C=C double bond, the ester bond, and the OH group vibrations, respectively. Moreover, the absorption peaks at $2935\text{-}2870\text{ cm}^{-1}$ corresponded to the aliphatic C-H stretching band of the compounds.

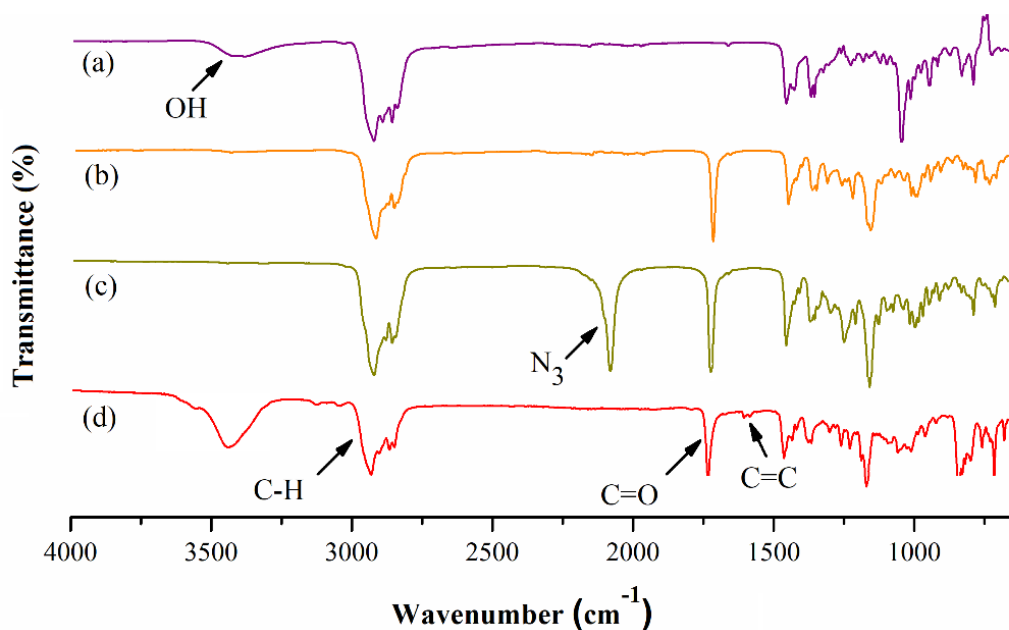


Figure 1. FTIR spectrum of (a) β -sitosterol (b) BS-(CH₂)₃-Br (c) BS-(CH₂)₃-N₃ (d) BS-CUR conjugate.

The structure of the target BS-CUR conjugate was confirmed by ¹H NMR analysis based on chemical shifts (Fig. S1, S2, S3, and S4). BS-CUR conjugate showed the signals at lower fields in the range of 7.71–6.66 ppm corresponding to the aromatic protons of curcumin moiety, and the singlet signal at 8.18 ppm assigned to CH proton in the triazole ring as shown in Fig. 2, which confirmed the successful conjugation of curcumin and BS. The distinctive signal for the olefinic proton in the part of steroidal BS was located as a singlet at 5.34 ppm. The signal of methine proton attached to the hydroxyl group was observed at about 4.6 ppm. The CH protons close to the triazole ring were junction with the methine proton and seen between 4.64 and 4.62 ppm. The multi signals that appeared in their ¹H NMR spectra at higher fields were attributed to the other protons of the BS unit. In addition, steroidal BS backbone showed the signals for methyl groups at 1.02 (H-19, 3H), 0.92 (H-28 and H-29, 6H), 0.86 (H-26 and H-21, 3H), and 0.67 (H-18, 3H). In the ¹³C NMR spectrum (Fig.S5), 57 signals were found, the signals of carbonyl carbons at curcumin moiety at δ_c 195.07, the signals of the double bonds C-5 and C-6 in the β -sitosterol moiety at δ_c 140.85 and 122.13, and the signal of C-3 in the β -sitosterol moiety at δ_c 75.21 were observed. The conjugation of BS with curcumin was also supported by mass spectral data. It revealed a molecular peak [M+H]⁺, $m/z=932.5662$ was consistent with the calculated value of the molecular weight.

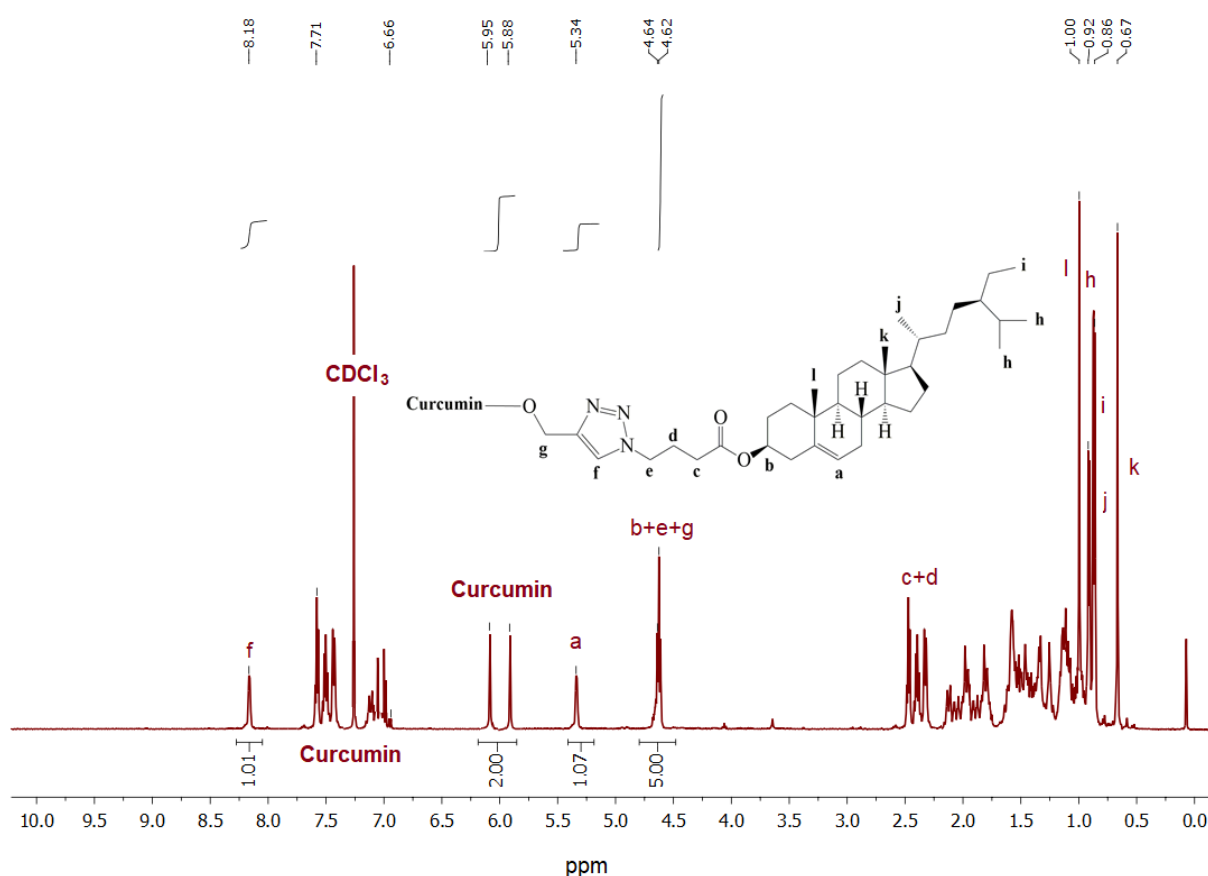


Figure 2. ¹H NMR spectrum of BS-CUR conjugate.

The UV-vis absorbance and fluorescence properties of curcumin mono alkyne and BS-CUR were demonstrated in Fig. 3. BS-CUR conjugate showed the absorption bands at 426 and 443 nm ($\pi-\pi^*$ transition) similar to that of curcumin mono alkyne, which indicates the successful conjugation [20]. The solution of curcumin mono alkyne exhibited a bright yellow color due to the $\pi-\pi^*$ transition of the chromophore. The solution of BS-CUR conjugate showed a blue shift after conjugation which were recorded by irradiating with a 365-nm UV lamp. It is related to the conjugating with BS increases the energy level of the π^* orbital. Hence the visual demonstration of BS-CUR gave a color towards the blue. The fluorescence emission spectrum of BS-CUR conjugate exhibited the hypsochromic shift (to lower wavelength) by ~15 nm attributed to the conjugation between curcumin mono alkyne and BS [21, 22]. The conjugate also showed a similar peak reflecting that the optical properties of curcumin mono alkyne were retained after binding.

B. Biological assays

In vitro evaluation of cytotoxic activity

The evaluation of the *in vitro* cytotoxicity of curcumin, β -sitosterol, and BS-CUR conjugate was carried out by cell viability assay for 24 h against human breast cancer cell line (MDA-MB-231) and healthy mouse fibroblast cell lines (L929). The cell viabilities were assessed versus increasing concentrations for tested compounds. The cell viability rate for healthy mouse fibroblast L929 cell line was similar to the control group, indicating that the studied compounds were non-toxic within the test range (0–50 μ g/mL) (Fig. 4A). The cell viability in the positive control group was considered as 100%, and the percentage values for BS-CUR conjugate were calculated as 112.6%, 116.8%, 120.2%, and 122.5% at the 5, 10, 25, and 50 μ g/mL concentrations, respectively. For the MDA-MB-231 cells, statistical significant differences were observed for experimental groups, compared with control group ($p < 0.05$) (Fig. 4B). Percentages of cell viability significantly lower than control group for all experimental groups at the same concentrations. The cell viability percentages for BS-CUR conjugate were 72.4%, 42.02%, 25.3%, and 16.1% at the 5, 10, 25, and 50 μ g/mL concentrations, respectively.

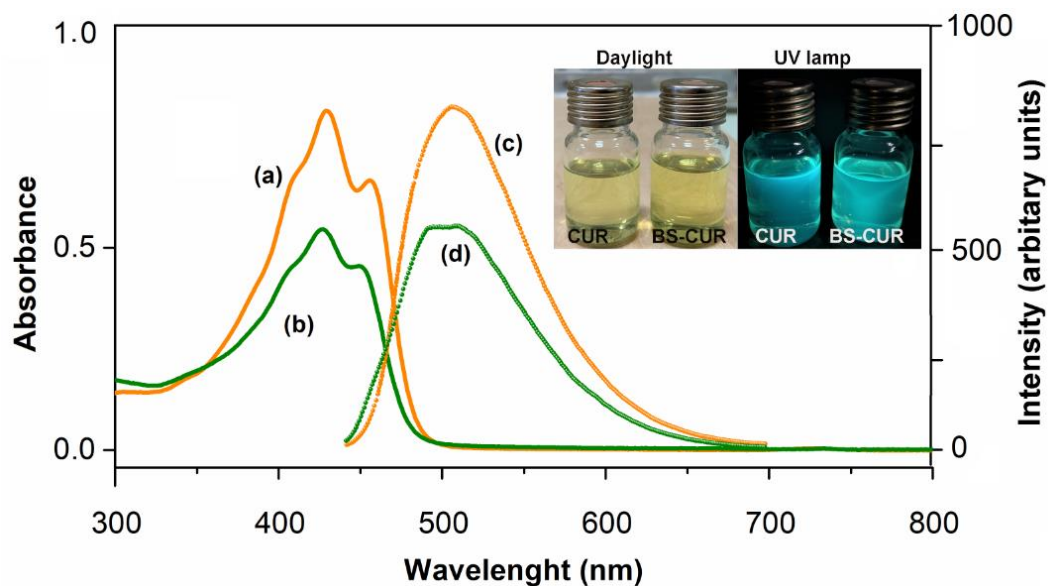


Figure 3. Absorption and Emission spectra of CUR mono alkyne (1×10^{-3} mol L⁻¹) (a and c) and BS-CUR (1×10^{-3} mol L⁻¹) conjugate (b and d) in DMF.

The chemopreventive impacts of curcumin have been credited to different natural properties, including neutralization of cancer-causing free radicals and anti-angiogenesis activity, which restricts the blood supply to quickly developing threatening cells [23]. β -sitosterol, on the other hand, can influence distinctive levels of tumor improvement, such as their inhibitory effects on the creation, development, and acceptance of cancerous cells, as well as restraint of tumor cell attack and metastasis [24]. The half-maximal inhibitory concentration (IC₅₀) values were 8.41 ± 0.51 μ g/mL, 5.98 ± 0.31 μ g/mL, and 4.47 ± 0.14 μ g/mL for curcumin, β -sitosterol, and BS-CUR conjugate, respectively. According to the criteria of the National Cancer Institute, natural extracts with an IC₅₀ value of ≤ 20 μ g/mL are considered highly cytotoxic [25, 26]. As indicated by the IC₅₀ values in Table 1, the BS-CUR conjugate showed a significantly increased toxic effect in comparison with the bare compounds, β -sitosterol and curcumin. Hence, the combination of CUR and BS has a synergistic cytotoxic effect and strong *in vitro* cytotoxic activity against MDA-MB-231 cells with IC₅₀ values ≤ 10 μ g/mL. On the other hand, the IC₅₀ value of BS-CUR conjugate was compared with cisplatin, one of the most commonly used chemotherapeutic agents for breast cancer treatment. IC₅₀ values of cisplatin against the MDA-MB-231 cells were previously determined as 9.03 and 13.85 μ g/mL at 24 h, respectively [27, 28]. The BS-CUR conjugate showed a good IC₅₀ value compared to that of the free cisplatin. To determine the real therapeutic potential of novel anticancer drug candidates, it is necessary to check their selectivity towards normal cells. The SI, which indicates the safety level of a compound toward normal breast cells, indicated that BS-CUR has high cytotoxic activity against MDA-MB-231 (SI=48.31) but was less harmful to normal L929. Higher values of SI indicate greater anticancer specificity, and the compounds displaying an SI above 3.0 are considered highly selective agents [29]. Commonly used anticancer drugs, such as cisplatin or doxorubicin have a big disadvantage of being toxic to both cancer and normal cells.

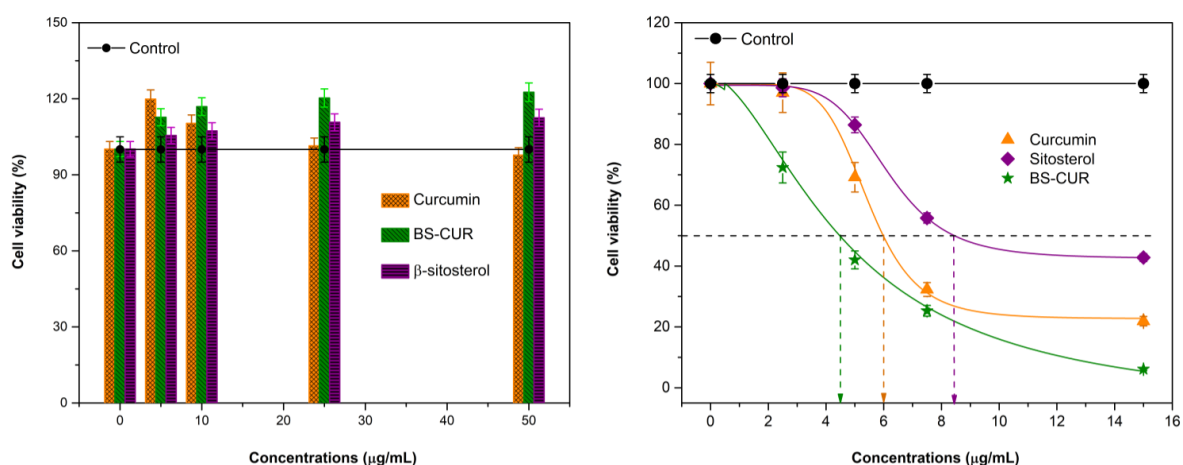


Figure 4. Cell viability of L929 cells (A) and MDA-MB-231 (B) cells treated with curcumin, β -sitosterol, and BS-CUR conjugate (n=3, error bars represent standard deviation ($P < 0.05$)).

Table 1. SI and IC_{50} values of compounds on the L929 and the MDA-MB-231.

Compounds	$(IC_{50}, \mu\text{g/mL})$		
	MDA-MB-231	L929	SI
Curcumin	8.41 ± 0.51	126.05 ± 1.1	15.00
β -sitosterol	5.98 ± 0.31	197.07 ± 0.5	32.95
BS-CUR	4.47 ± 0.14	215.97 ± 0.9	48.31
<i>Cisplatin</i> ^a	9.03^b [27]	18.06 [30]	2.00
	13.85^b [28]		1.30

^a Reference drug

^b The IC_{50} value of cisplatin was referred from already published work.

Structure activity relationship

The analysis of structure-activity relationships demonstrates, to begin with, that the cytotoxicity of the tested compounds appears to be connected to the incorporation of the heterocyclic rings into the steroid moiety as comparing the cytotoxicity results in Table 1. The following structure-activity relationships (SARs) were drawn: (a) Curcumin has two (or three) functional sides: aromatic rings joined by means of olefin bonds to a β -diketone. The olefin double bonds, while recognized to be important for activity, are usually considered to be a linker between the two key basic components and have not been widely modified. Instead, synthetic endeavors have basically been coordinated at variations of the aromatic rings and their substituents [31]. (b) β -sitosterol has three functional sides for inhibitory effects. A double bond on C-5, the ethyl group on C-24, and absence of double bond on C-22 position of β -sitosterol [32]. In a structure-activity study on the effects of different groups in phytosterols on the inhibition of the relative absorption of cholesterol, the following conclusions were reached for β -sitosterol and stigmaterol, which have similar structures: the presence of C-5 double bond and C-24 ethyl groups of β -sitosterol makes it more effective than stigmaterol [33]. Elmegeed et al. reported previously the inhibitory activity of heterocyclic steroids and curcumin derivatives on breast cancer cells. The results suggested that the hybridization of curcumin and steroid derivatives formed promising anticancer agents. The different functional groups on the steroid backbone increased the inhibitory effect of derivatives with compare to the bare compounds [34]. The synthesis study of steroid curcumin derivatives as anti-Alzheimer's disease candidates resulted that the functional groups such as carbonyl and enolic groups, methoxy and phenolic hydroxyl groups, and the phenyl rings on the curcumin moiety and the presence of steroid moiety showed anti-Alzheimer's disease properties [35].

IV. CONCLUSIONS

In the present study, β -sitosterol and curcumin conjugate was designed and synthesized. The “click chemistry” approach was used in the conjugation of compounds containing alkyne and azide-end groups. The chemical structure of the conjugate was assessed with FTIR, HNMR, HRMS, and UV/fluorescence spectroscopy techniques. The results showed the two natural compounds were successfully conjugated in good yields. *In vitro* cytotoxicity studies showed that the conjugate was safe and biocompatibility with healthy fibroblast cell lines. A biological evaluation of this conjugate to the proliferation of the estrogen-negative breast cancer cell line, MDA-MB-231, was also performed. The conjugate showed the lowest IC₅₀ values against the MDA-MB-231 cell line compared to the BS and CUR. It can be suggested that the BS-CUR conjugate may be used as a potential therapeutic compound for cancer treatment *in vitro* and *in vivo*.

ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thank Prof. Dr. Ufuk YILDIZ (Kocaeli University, Chemistry Department) for his suggestions and for allowing the use of facilities at the Chemistry Research Laboratory to be used in this study.

REFERENCES

- [1] Singla, P., Salunke, D. B. (2020). Recent advances in steroid amino acid conjugates: Old scaffolds with new dimensions. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 187, 111909.
- [2] Ke, S., Zhang, Z., Liu, M., Fang, W., Huang, D., Wan, Z., Zhou, R., Wang, K., Shi, L. (2019). Synthesis and bioevaluation of novel steroidal isatin conjugates derived from epiandrosterone/androsterone. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*. 34(1), 1607-1614.
- [3] Awad, A., Chinnam, M., Fink, C., Bradford, P. (2007). β -Sitosterol activates Fas signaling in human breast cancer cells. *Phytomedicine*, 14(11), 747-754.
- [4] Rashed, K. (2020). Beta-Sitosterol Medicinal Properties: A Review Article. *International Journal of Science Inventions Today*, 9(4), 208-212.
- [5] Lin, Y. T., Wu, S. S., Wu, H. L. (2007). Highly sensitive analysis of cholesterol and sitosterol in foods and human biosamples by liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography A*, 1156(1-2), 280-287.
- [6] Yuan, J. W., Qu, L. B. (2017). Efficient synthesis of novel β -sitosterol scaffolds containing 1, 2, 3-triazole via copper (I)-catalyzed click reaction under microwave irradiation. *Zeitschrift für Naturforschung B*, 72(10) 717-724.
- [7] Paniagua Pérez, R., Madrigal Bujaidar, E., Reyes Cadena, S., Molina Jasso, D., Gallaga, J.P., Silva Miranda, A., Velazco, O., Hernández, N., Chamorro, G. (2005). Genotoxic and cytotoxic studies of beta-sitosterol and pteropodine in mouse. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 3, 242-247.
- [8] Li, R., Jia, C. S., Yue, L., Zhang, X. M., Xia, Q. Y., Zhao, S. L., Feng, B., Zhong, F., Chen, W. J. (2010). Lipase-catalyzed synthesis of conjugated linoleyl β -sitosterol and its cholesterol-lowering properties in mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(3), 1898-1902.
- [9] Bin Sayeed, M. S., Ameen, S. S. (2015). Beta-sitosterol: a promising but orphan nutraceutical to fight against cancer. *Nutrition and Cancer*, 67(8), 1216-1222.
- [10] Zolottsev, V. A., Latysheva, A. S., Pokrovsky, V. S., Khan, I. I., Misharin, A. Y. (2021). Promising applications of steroid conjugates for cancer research and treatment. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 210, 113089.
- [11] Ulu, A., Ates, B. (2017). Immobilization of L-asparaginase on carrier materials: a comprehensive review. *Bioconjugate Chemistry*, 28(6), 1598-1610.
- [12] Lesma, G., Luraghi, A., Bavaro, T., Bortolozzi, R., Rainoldi, G., Roda, G., Viola, G., Ubiali, D., Silvani, A. (2018). Phytosterol and γ -oryzanol conjugates: synthesis and evaluation of their antioxidant, antiproliferative, and anticholesterol activities. *Journal of Natural Products*, 81(10), 2212-2221.
- [13] Ke, S., Shi, L., Yang, Z. (2015). Discovery of novel isatin-dehydroepiandrosterone conjugates as potential anticancer agents. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 25(20), 4628-4631.
- [14] Yuyun, Y., Ratnatilaka Na Bhuket, P., Supasena, W., Suwattanaturuk, P., Praengam, K., Vajragupta, O., Muangnoi, C., Rojsitthisak, P. (2021). A novel curcumin-mycophenolic acid conjugate inhibited hyperproliferation of tumor necrosis factor-alpha-induced human keratinocyte cells. *Pharmaceutics*, 13(7), 956.

- [15] El Khoury, E., Abiad, M., Kassaiyf, Z. G., Patra, D. (2015). Green synthesis of curcumin conjugated nanosilver for the applications in nucleic acid sensing and anti-bacterial activity. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 127, 274-280.
- [16] Jain, S., Gill, M., Pawar, H., Suresh, S. (2014). Novel curcumin diclofenac conjugate enhanced curcumin bioavailability and efficacy in streptococcal cell wall-induced arthritis. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 76(5), 415.
- [17] Ilkar Erdagi, S., Uyanik, C. (2020). Biological evaluation of bioavailable amphiphilic polymeric conjugate based-on natural products: Diosgenin and curcumin. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 69(2), 73-84.
- [18] Ilkar Erdagi, S., Doganci, E., Uyanik, C., Yilmaz, F. (2016). Heterobifunctional poly (ϵ -caprolactone): Synthesis of α -cholesterol- ω -pyrene PCL via combination of ring-opening polymerization and “click” chemistry. *Reactive and Functional Polymers*, 99, 49-58.
- [19] Lenhart, J. A., Ling, X., Gandhi, R., Guo, T. L., Gerk, P. M., Brunzell, D. H., Zhang, S. (2010). “Clicked” bivalent ligands containing curcumin and cholesterol as multifunctional A β oligomerization inhibitors: Design, synthesis, and biological characterization. *Journal of Medicinal Chemistry*, 53(16), 6198-6209.
- [20] Gogoi, B., Sen Sarma, N. (2015). Curcumin–cysteine and curcumin–tryptophan conjugate as fluorescence turn on sensors for picric acid in aqueous media. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(21), 11195-11202.
- [21] Dey, S., Sreenivasan, K. (2014). Conjugation of curcumin onto alginate enhances aqueous solubility and stability of curcumin. *Carbohydrate Polymers*, 99, 499-507.
- [22] Yang, R., Zhang, S., Kong, D., Gao, X., Zhao, Y., Wang, Z. (2012). Biodegradable polymer-curcumin conjugate micelles enhance the loading and delivery of low-potency curcumin. *Pharmaceutical Research*, 29(12), 3512-3525.
- [23] Youssef, K. M., El- Sherbeny, M. A. (2005). Synthesis and antitumor activity of some curcumin analogs. *Archiv der Pharmazie: An International Journal Pharmaceutical and Medicinal Chemistry*, 338(4), 181-189.
- [24] Saeidnia, S., Manayi, A., Gohari, A. R., Abdollahi, M. (2014). The story of beta-sitosterol-a review. *European Journal of Medicinal Plants*, 4(5), 590.
- [25] Vo, T. K., Ta, Q. T. H., Chu, Q. T., Nguyen, T. T., Vo, V. G. (2020). Anti-hepatocellular-cancer activity exerted by β -Sitosterol and β -Sitosterol-glucoside from *Indigofera zollingeriana* Miq. *Molecules*, 25(13), 3021.
- [26] Trafalis, D., Geromichalou, E., Dalezis, P., Nikoleousakos, N., Sarli, V. (2016). Synthesis and evaluation of new steroidal lactam conjugates with aniline mustards as potential antileukemic therapeutics. *Steroids*, 115, 1-8.
- [27] Karpagam, S., Mamindla, A., Sali, V. K., Niranjana, R. S., Periasamy, V. S., Alshatwi, A. A., Akbarsha, M. A., Rajendiran, V. (2022). Folic acid-conjugated mixed-ligand copper(II) complexes as promising cytotoxic agents for triple-negative breast cancers: A case study using MDA-MB-231 cell. *Inorganica Chimica Acta* 531, 120729.
- [28] Ozdemir, F., Sever, A., Kececi, Y. O., Incesu, Z. (2021). Resveratrol increases the sensitivity of breast cancer MDAMB-231 cell line to cisplatin by regulating intrinsic apoptosis. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 24(1), 66.
- [29] Michalak, M., Lach, M. S., Antoszczak, M., Huczynski, A., Suchorska, W. M. (2020). Overcoming Resistance to Platinum-Based Drugs in Ovarian Cancer by Salinomycin and Its Derivatives-An In Vitro Study. *Molecules*, 25(3), 537.
- [30] Haribabu, J., Sabapathi, G., Tamizh, M. M., Balachandran, C., Bhuvanesh, N. S. P., Venuvanalingam, P., Karvembu, R. (2018). Water-Soluble Mono- and Binuclear Ru(η^6 -p-cymene) Complexes Containing Indole Thiosemicarbazones: Synthesis, DFT Modeling, Biomolecular Interactions, and In Vitro Anticancer Activity through Apoptosis. *Organometallics*, 37(8), 1242–1257.
- [31] Fuchs, J. R., Pandit, B., Bhasin, D., Etter, J. P., Regan, N., Abdelhamid, D., Li, C., Lin, J., Li, P. K. (2009). Structure–activity relationship studies of curcumin analogues. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 19(7), 2065-2069.
- [32] Yuan, L., Zhang, F., Shen, M., Jia, S., Xie, J. (2019). Phytosterols suppress phagocytosis and inhibit inflammatory mediators via ERK pathway on LPS-triggered inflammatory responses in RAW264. 7 macrophages and the correlation with their structure. *Foods*, 8(11), 582.
- [33] Yuan, L., Zhang, F., Jia, S., Xie, J., Shen, M. (2020). Differences between phytosterols with different structures in regulating cholesterol synthesis, transport and metabolism in Caco-2 cells. *Journal of Functional Foods*, 65, 103715.

- [34] Elmegeed, G. A., Yahya, S. M., Abd-Elhalim, M. M., Mohamed, M. S., Mohareb, R. M., Elsayed, G. H. (2016). Evaluation of heterocyclic steroids and curcumin derivatives as anti-breast cancer agents: Studying the effect on apoptosis in MCF-7 breast cancer cells. *Steroids*, 115, 80-89.
- [35] Elmegeed, G. A., Ahmed, H. H., Hashash, M. A., Abd Elhalim, M. M., El Kady, D. S. (2015). Synthesis of novel steroidal curcumin derivatives as anti-Alzheimer's disease candidates: Evidences-based on in vivo study. *Steroids*, 101, 78-89.

Supplementary Information for

Design, Synthesis, and Biological Evaluation of Curcumin- β -sitosterol Conjugate a

Potential Candidate for Breast Cancer Therapy

Meme Kanseri Tedavisi için Potansiyel Bir Aday Olan Kurkumin- β -Sitosterol

Konjugatının Tasarımı, Sentezi ve Biyolojik Değerlendirmesi

Sevinç İlkar Erdağ^{1*}

*Corresponding author contact: sevincilkar@kocaeli.edu.tr

¹H and ¹³C NMR spectra of compounds

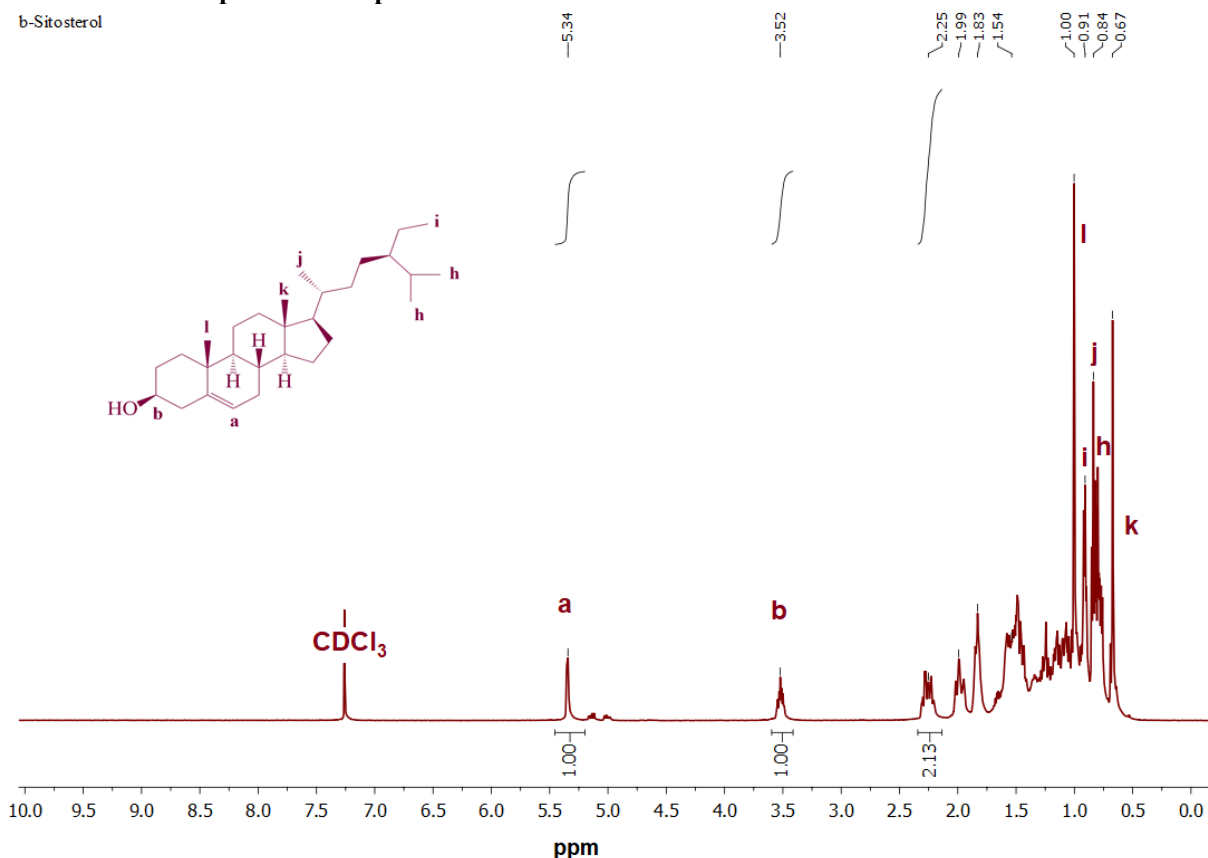


Figure S1. ¹H NMR spectrum of β -sitosterol.

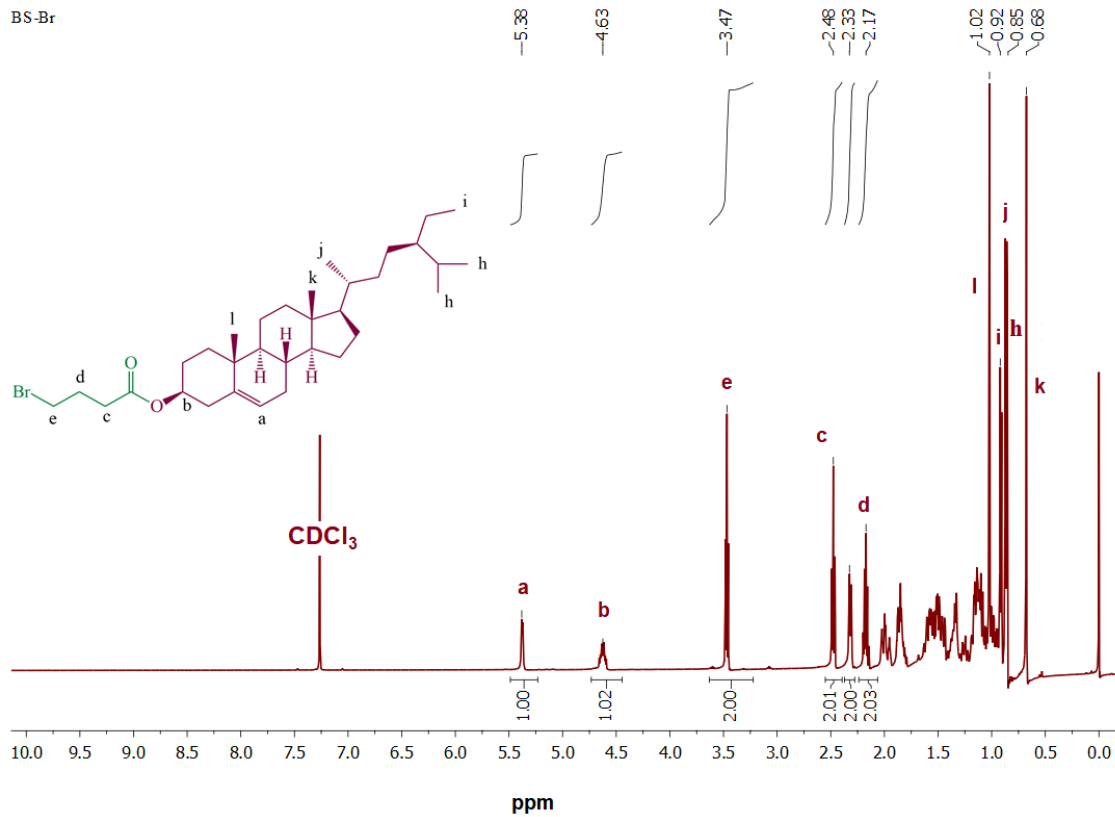


Figure S2. ¹H NMR spectrum of BS-(CH₂)₃-Br.

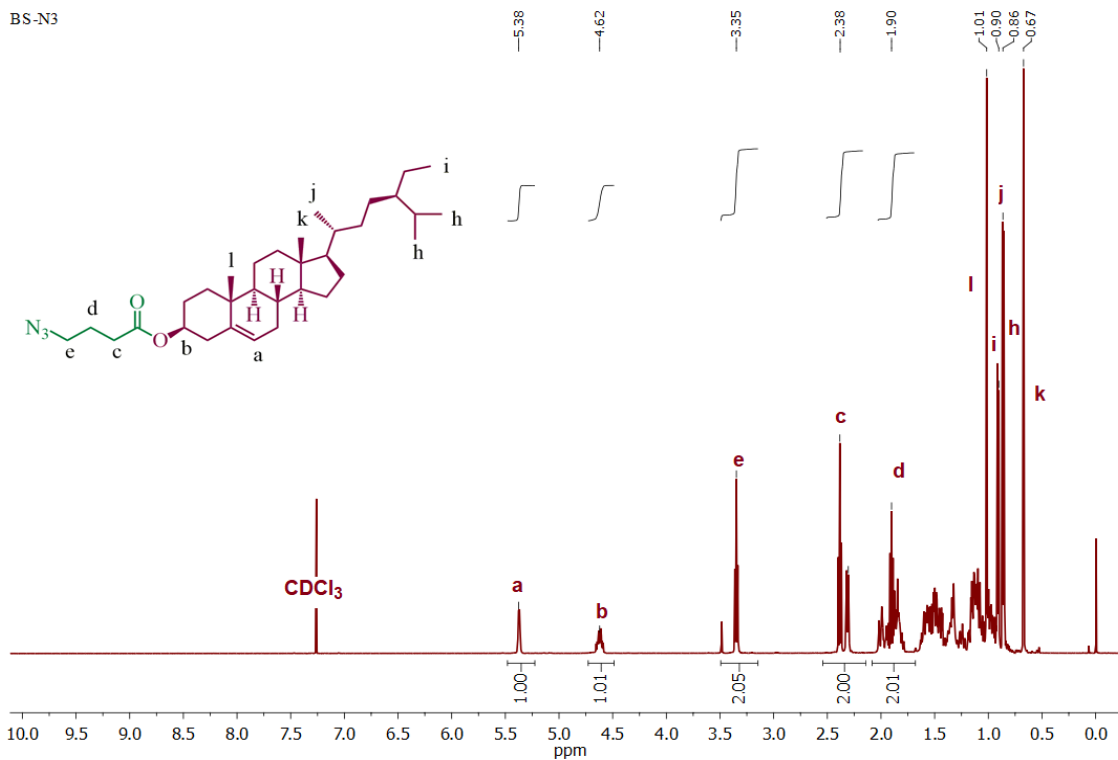


Figure S3. ¹H NMR spectrum of BS-(CH₂)₃-N₃.

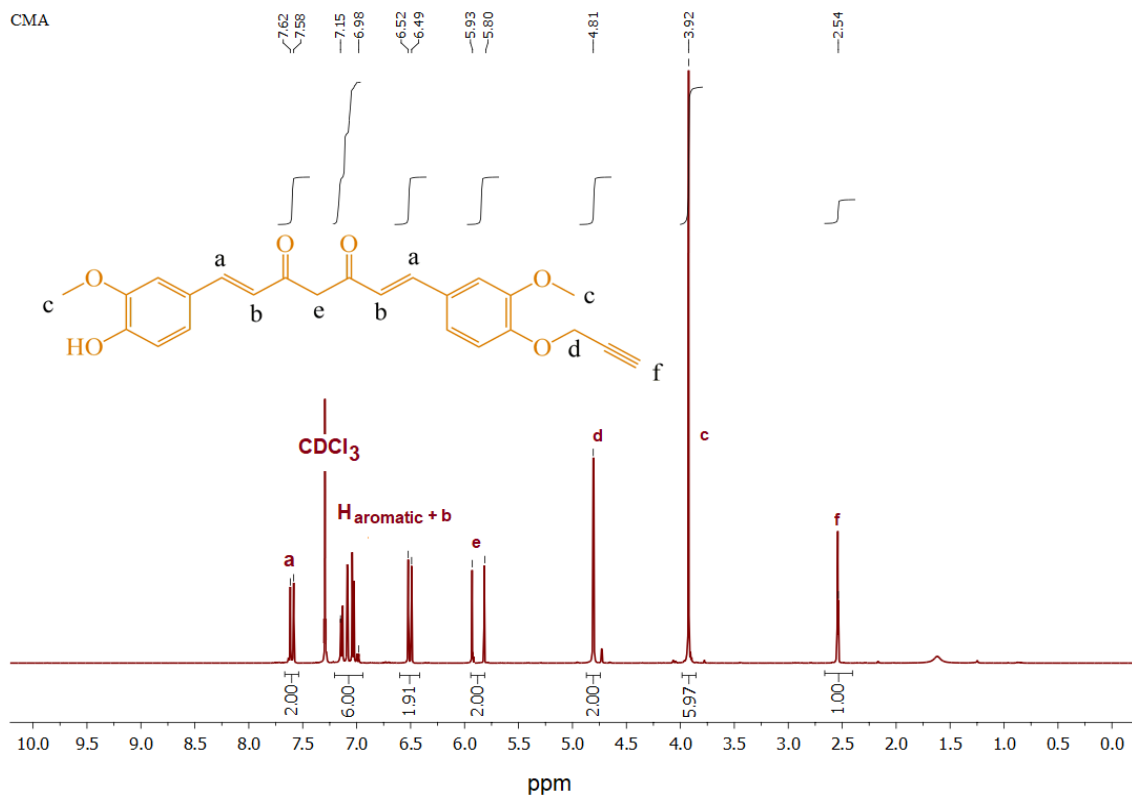


Figure S4. ^1H NMR spectrum of curcumin mono alkyne

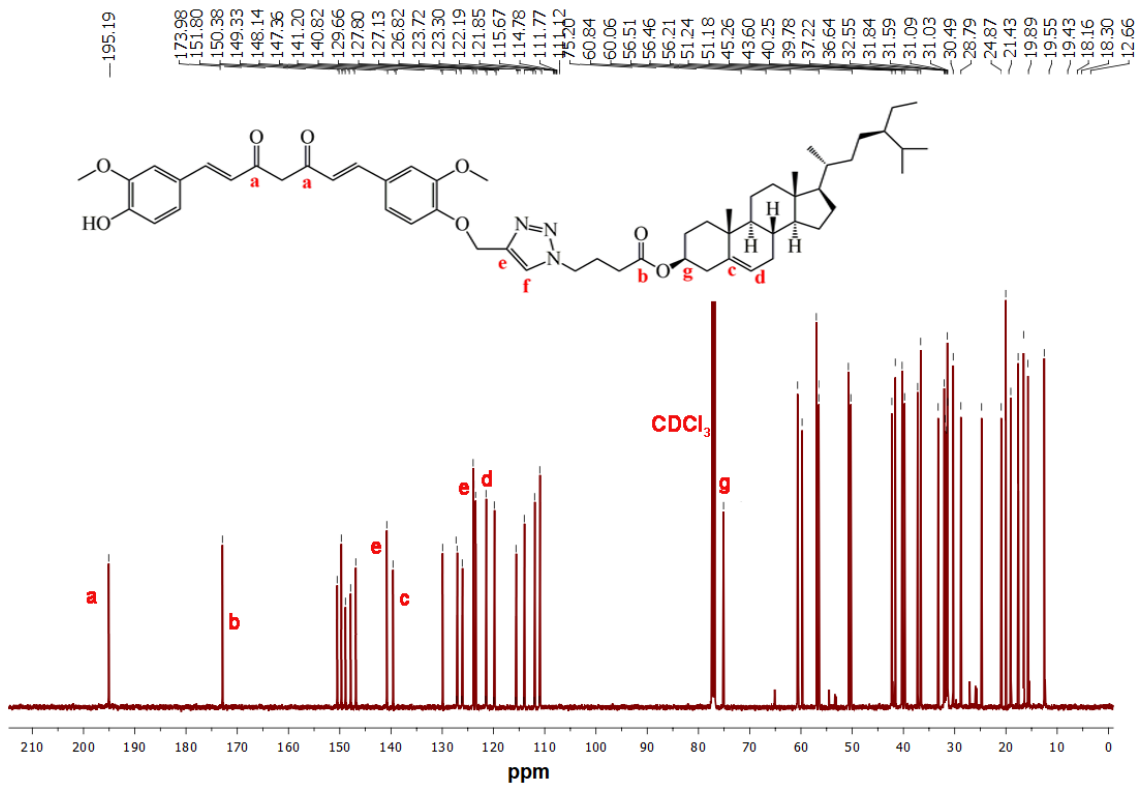


Figure S5. ^{13}C NMR spectrum of BS-CUR

Araştırma Makalesi –Research Article

Ulusal Demiryolu Mirasının Korunması: Konya Tarihi Gar Kompleksi Model Önerisi

Preservation of National Railway Heritage: Konya Historical Station Complex Model Proposal

Emine Yavuz Pakih^{1*}, Esin Sarıman Özen²

Geliş / Received: 06/04/2022

Revize / Revised: 06/07/2022

Kabul / Accepted: 06/07/2022

ÖZ

Endüstrileşmeyi olanaklı kılan en önemli faktörlerden olan demiryolu sistemleri bugün yaşanan teknolojik gelişmeler neticesinde önemlerini yitirmekte ve ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Bu nedenle dünyanın pek çok yerinde demiryolu mirası yapılarının 21. yüzyıl ihtiyacı olan çok fonksiyonlu ulaşım yapılarına dönüştürülmüştür. Ülkemiz demiryolu taşımacılığı ve yeni inşa edilen demiryolu yapıları ile Avrupa standartlarını büyük ölçüde sağlamayı hedeflemektedir. Bu nedenle inşası hızlanan YHT hatları ile beraber trenlerin güzergâhlarının değişmesi ve güzergâh üzerindeki durakların kapatılması çok sayıda istasyon binasının atıl kalmasına neden olmaktadır. Demiryolu yapılarına ve demiryolu mirasına yönelik yapılan akademik çalışmalarda son yıllarda meydana gelen artış, ulusal demiryolu mirasımızın yok olma endişesi içerisinde olduğumuz düşüncesini beraberinde getirmektedir. Çalışma kapsamında dünya üzerindeki diğer örnekler incelenmiş, Avrupa standartları ve ön görülen ulaşım yapıları göz önünde bulundurularak, SWOT analizi ve anket uygulaması sonucunda, ulusal demiryolu mirasında önemli yer tutan Konya Tarihi Gar Kompleksine yönelik model önerisi getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler-Demiryolu Mirası, Yeniden Değerlendirme, Koruma, Model Önerisi

ABSTRACT

Railway systems, which are one of the most important factors that make industrialization possible, are losing their importance as a result of technological developments today and cannot meet the needs. For this reason, in many parts of the world, the transformation of railway heritage structures into multi-functional transportation structures, which is needed in the 21st century, has started to be discussed. Our country aims to provide European standards to a large extent with railway transportation and newly built railway structures in. For this reason, the changes in the routes of the trains and the closure of the stops on the route, together with the YHT lines whose construction is accelerating, cause many station buildings to remain idle. The increase in academic studies on railway structures and railway heritage in recent years brings with the thought that we are concerned about the extinction of our national railway heritage. Within the scope of the study, other examples around the world were examined, and a model proposal was made for Konya Historical Station Complex, which is one of our national railway heritage structures as a result of the SWOT analysis and survey application, taking into account the European standards and the foreseen transportation structures.

Keywords- Railway Heritage, Re-evaluation, Conservation, Model Proposal

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: emineyvuz@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7336-1462>)

İç Mimarlık, Adıyaman Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Adıyaman, Türkiye

²İletişim: esinsariman@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-0553-117X>)

İç Mimarlık, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul, Türkiye

I. GİRİŞ

18.yüzyıl sonlarında meydana gelen endüstri devrimi teknolojiyi günlük yaşantıya sokmuştur. 20. yüzyıl ve sonrasına bakıldığında hızla ilerleyen teknolojik gelişmeler, değişen yaşam şartları ihtiyaçlarımızın farklılaşmasına neden olmuştur. Örneğin, bilgi teknolojisinde yaşanan gelişmeler herhangi bir bilgiye erişim hızını artırmakta ve yaşanan çağdaki zamanla olan mücadelemize destek olmaktadır. Aynı şekilde ilk icadıyla beraber ulaşım, zaman ve ekonomide büyük katkı sağladığı için tercih edilen demiryolu taşımacılığı, hız ve teknoloji çağına ayak uydurmak için her gün yeni bir gelişme ile karşımıza çıkmaktadır. Yaşanan gelişmeler bir zamanlar hayatın içinde olan pek çok şeyin atıl kalmasına, kullanılmamasına neden olmaktadır. Bu nedenle kültürel miras, mimari miras, endüstri miras vb. hangi isimle olursa olsun döneminin manevi, mimari, geleneksel, kültürel, ekonomik, siyasi ve sosyal izlerini taşıyan somut-soyut, taşınır-taşınmaz her eser koruma altına alınmaktadır.

1965 yılında ICOMOS dünyadaki kültürel miras alanlarının korunması üzerine kurulmuş uluslararası bir konsey olarak çalışmalarını sürdürmektedir [1]. 20. Yüzyıl başlarında farkındalığının arttığı koruma kavramı koruma başlıklarının çeşitlenmesi veya çeşitli kurum ve kuruluşların oluşturulmasıyla sınıflandırılabilir hale gelmiştir. Örneğin, bugün yaşanan pek çok teknolojik gelişmenin temelini atan endüstri devriminin izlerini taşıyan çok sayıda endüstri yapısı, makine ve aletler 1978 yılında kurulan TICCIH tarafından koruma altına alınmaktadır aynı zamanda 1977 yılında İngiltere’de düzenlenen demiryolu sergisi de demiryolu mirası ve korunması başlığını gündeme getirmiştir.

Ulusal demiryolu yatırımları ve inşası 1856 yılında başlamış, 1950li yıllarda ulaşım stratejilerinin değişmesi sonucunda yavaşlamıştır. 2003 yılına gelindiğinde ise Avrupa Birliğinin talebi üzerine Avrupa standartları ölçüsünde demiryolu inşası ivme kazanmıştır [2]. Demiryollarının yapısıyla birlikte kentlerin birer simgesi olan istasyon binalarının da inşası söz konusu olmuştur. Yapıldıkları dönemde ülkelerin ekonomik, siyasi, politik ve mimari bir simgesi olan bu yapılar kentin odak noktasında olmaları, mimari değerleri ve peyzajları ile kentin en önemli kamusal mekânı olmuşlardır.

Hızla gelişen ulaşım sistemleri ile birlikte yeni tip demiryolu yapılarının inşası gündeme gelmektedir. Toplumun değişen ihtiyaçları doğrultusunda inşa edilen yeni istasyon yapıları, mevcut istasyon binalarının işlevlerini yitirmelerine neden olmaktadır. Bu yapıların demiryolu mirası veya kültürel miras olarak tescillenmesi korunması yönünden yeterli değildir. Hafızalarda yer eden kentin kamusal mekânlarından olan bu yapılar tekrar topluma kazandırılarak sahip oldukları değeri sürdürebilirler. Maalesef ki ülke olarak bu konuda yetersiz kalmaktayız, atıl kalan yapılar ya özel mülk olup yarı ölü mekânlar olarak işlev almaktadır ya da restore edilip işlev verilmeden kaderine terk edilmektedir. Oysaki dünyada özellikle İngiltere’de tarihi gar binaları mevcut teknoloji ile gar binası olarak yeniden işlevlendirilerek kentin simgesi olan kamusal mekânlar olarak hizmet vermeye devam etmektedirler.

Çalışmada demiryolu mirasının koruma yöntemleri içerisinde yer alan yeniden işlev verme, var olan işlevi ile koruma başlıkları kapsamında, hazırlanan anketler sonucunda elde edilen verilere göre tarihi gar binalarının yeniden değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Çalışma dahilinde geliştirilen model önerisinin diğer Ulusal demiryolu mirası yapılarının yeniden değerlendirilmelerinde altlık olması hedeflenmektedir.

Çalışma sürecinde yapılan araştırmalar neticesinde ülkemizde bulunan istasyon yapılarının hacim olarak Avrupa’da bulunan çok sayıda yapıdan küçük olduğu görülmüştür. Ulusal demiryolu mirası kapsamında ele aldığımız yapılardan uç istasyon olan Haydarpaşa Garı yapılan çalışma için uygun olabilmektedir ancak ülkemiz geneline bakıldığında kentlerin merkezlerinde bulunan istasyon yapılarının genellikle kompleks şeklinde inşa edildiği görülmüştür. Hem bu özellikler göz önüne alındığında hem de yakın tarihte (2019 yılında) inşası tamamlanan hızlı tren gar binasının varlığı söz konusu olduğu için, kullanıcıların karşılaştırmaları ve talepleri doğrultusunda daha iyi sonuç alınacağı düşünülmüş bu nedenle Konya Gar Kompleksi üzerinde çalışılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma yöntem olarak şu şekilde ilerlemiştir;

- Öncelikli olarak literatür taraması yapılmış, demiryolu mirası, koruma kavramı, ulusal demiryolu inşasının gelişimi üzerine araştırmalar yapılmıştır.
- Ardından çalışma dahilinde ele alınan Konya Gar Kompleksi ve Selçuklu Yüksek Hızlı Tren Gar Binası (YHT Gar Binası) için çevresel ve mimari SWOT analizi yapılmıştır. SWOT analizi ile her bir yapının

ve çevresinin güçlü ve zayıf yönleri belirlenmiş, oluşabilecek tehditler ve karşılaşılabilecek fırsatlar üzerinde durulmuştur.

- Yapılara yönelik yapılan analizin yeni işlev vermede tek başına yeterli olmayacağı düşünüldüğü için kullanıcılara yönelik anket uygulanmıştır. Gerekli etik kurul izni alınan anket, Google form üzerinden her iki garı da kullanan 103 katılımcı tarafından doldurulmuştur. Katılımcıların iki gar binasını en az bir kez kullanmış olması şartı ile katılım sağlamışlardır. Anket verileri SPSS 28.0 yardımı ile istatistiksel olarak ele alınmıştır.
- Katılımcılara uygulanan ankette Likert tipi ölçek kullanılmıştır, sorulan maddelere ilişkin olarak, kendilerine en yakın gördükleri ifadelerden, Kesinlikle katılmıyorum, katılmıyorum, kararsızım, katılıyorum ve kesinlikle katılıyorum şeklinde ifade belirtmişlerdir. Bu ifadeler, veri düzenleme araçlarınınca kesinlikle katılmıyorum 1, katılmıyorum 2, kararsızım 3, katılıyorum 4 ve kesinlikle katılıyorum 5 puan olacak şekilde düzenlenmiştir.
- Anket 25 madde 48 kapalı uçlu sorudan oluşmaktadır. 24 madde garın işlevselliği, ulaşılabilirliği ve erişimi açısından olumlu anlam içeren maddeler kullanılarak sorulmuştur. Bahsi geçen maddeler çalışmanın “D. Anket ve Sonuçlar” kısmında Tablo 3’ de gösterilmiştir. Yalnızca bir madde “Gar çevresinde trafik yoğunluğu oldukça fazladır” ifadesi ile olumsuz anlam içerdiğinden ters kodlanma yapılmıştır.
- Yapılan SWOT analizi neticesinde YHT gar kompleksinin sanayi bölgesine yakın olması, kent merkezi ile bağının kopuk olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak yapılan anketlerde de garın toplu taşıma ve yaya erişimi için uygun olmadığı, turizm alanlarına uzak olduğu kullanıcılar tarafından belirtilmiştir. Tarihi gar kompleksine dair yapılan SWOT analizinde yapının kent merkezinde oluşu, ulaşım ağlarına yakın oluşu üzerinde durulmuştur. Tarihi gar kompleksine yönelik yapılan ankette kullanıcıların garın ulaşılabilirliği, erişimi, merkezde oluşundan memnun olduğu görülmüştür. Toplumsal hafızanın da etkisinin olduğu düşünüldüğünde tarihi gar kompleksinin geliştirilmesinin uygun olduğu düşünülmüştür.
- Sonuç olarak tarihi gar kompleksi içerisinde bulunan yapılar için model önerisi geliştirilmiştir.

III. LİTERATÜR TARAMASI

A. Ulusal Demiryolunun Gelişimi

Demiryolu taşımacılığında rayların tarihsel gelişiminin yanı sıra lokomotifin icadı ve tarihsel gelişimi de büyük öneme sahiptir. Raylar üzerinde hareket eden taşıtlara baktığımızda 1814 yılında ilk lokomotifin üretimine [3] kadar karşımıza antik dönemdeki taş yollar üzerinde hareket eden hayvanlar ve onların çektiği taşıtlardan, madenlerde kullanılan ahşap raylar üzerinde insan gücü gerektiren araçlara, metal raylar üzerinde hayvan gücü ile hareket eden arabalara kadar çok sayıda taşıt karşımıza çıkmaktadır.

1829 yılında buharlı lokomotif ile Manchester-Liverpool arasında ilk yolcu taşımacılığı yapılmıştır Bu tarihten itibaren hızla artan demiryolu inşası hızlı teknolojik gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. 19. yüzyıl başlarında bilinen ilk elektrikli lokomotif bir kimyager tarafından bulunmuştur. Ardından 19. yüzyıl sonlarında dizel lokomotifler kullanılmaya başlanmıştır. 20. yüzyıl başlarına geldiğimizde ise elektrikli-dizel lokomotifler kullanılmaya başlamış ve 1964 yılında Japonya’da elektrikli yüksek hızlı tren tanıtımı yapılmıştır [3]. Demiryollarında yaşanan en son teknolojik gelişme ise bugün Japonya ve Almanya’da hizmet veren Maglev trenidir.

Bütün bu teknolojik gelişmeler ışığında bilinen anlamda metal raylar üzerinde metal tekerleklerin hareketinden doğan demiryolu taşımacılığı yayılması ve demiryolu hatlarının yapımı 1880-1890 ve 1900-1910 yılları arasında artış göstermiştir. 1860 yılına Dünya’da 108.000 km demiryolu hattı varken 1914’te 1.339.000 km demiryolu hattı bulunmaktadır [3].

Ülkemizde demiryolu inşası ise Osmanlı Devleti’nin ekonomik ve teknik yetersizliği nedeniyle imtiyazlar ışığında başlamıştır.19.yüzyılın ilk yıllarında Alman, Fransız, İngiliz yatırımcılar ülkemizde demiryolu inşasını hızlandırmışlardır. Demiryolu inşası için ekonomik ve teknik olanakları yetersiz kalan Osmanlı Devleti bu oluşumlara sıcak bakmıştır. Ülke sınırlarımızdaki ilk demiryolu olan İzmir-Aydın hattı İngilizler tarafından 1856 yılında yapılmıştır.1948-1952 yılları arasında alınan Marshall yardımı karayolu inşasını hızlandırmış, 1950’lerde demiryolu yapımı durmuştur [2]. 1960 yılından 2003 yılına kadar toplam 847 km demiryolu inşa edilmiştir. 2003 yılından itibaren demiryolları yeniden devlet politikası haline gelmiştir. 2003 yılında Ankara-Eskişehir hızlı tren

hattının temeli atılmıştır. 2014 yılına gelindiğinde ise Ankara-Eskişehir, Konya-Ankara, Eskişehir -İstanbul hattı olmak üzere 1213 km'lik yüksek hızlı tren hattı tamamlanmıştır [4]. 2018 Yılı itibarıyla toplam hat uzunluğu 12.710 kilometreye ulaşmıştır.

B. Demiryolu Mirası Kavramı

20. yüzyılın ikinci yarısında gündeme gelen demiryolu mirası kavramı oldukça zengin bir alt metne sahiptir. Demiryolu mirasının kapsamı; demiryolu arşivleri, hareketli tüm makinalar, yapılar, yapılarla ilişkili sanayi yapıları, kentsel alanlar, kırsal alanlar, altyapı ve sinyalizasyon, taşınabilir nesnelere olarak toparlanabilir [5]

Demiryolu inşasının ve taşımacılığının ilk gerçekleştiği yer olan İngiltere demiryolu yapılarının miras olarak tescillenmesi ve korunmasında da öncülük etmiştir. 1977 yılında "Save Britain's Heritage" kapsamında düzenlenen "Off The Rails" sergisi tarihsel önem sahip olan demiryolu yapılarını miras olarak gündeme getirmiştir [6]. 1984 yılında İngiltere'de bulunan demiryolu yapılarının korunması için British Railways kurumuna bağlı Railways Heritage Trust kurulmuştur. Ayrıca 1993 yılında demiryolu kanunu revize edilmiş ve demiryolu yapılarının tescillenip, envanterlerinin oluşturulması için bir kurum oluşturulmasına karar verilmiştir [5].

Dünya çapında ise demiryolu yapılarının miras olarak korunması için ICOMOS 1999 yılında "Railways as World Heritage Sites" isimli Dünya Mirası Sözleşmesini yayınlamıştır.

Uluslararası öneme sahip demiryolu mirası yapıları için önerilen kriterler şu şekildedir;

- Bir dehanın göstergesi olan yaratıcı bir çalışma olması; mühendisler tarafından tasarlanan ve inşa edilen demiryollarının mühendislerle özdeşleştirmek mümkündür. Oldukça karmaşık bir sosyo-tekniğe sahip olan demiryollarının tasarımında beceri ve yetenek gerekmektedir.
- Yenilikçi teknolojinin etkisi; Bir demiryolunun en birincil hizmeti olan taşımacılık için teknoloji ve teknolojik gelişmeler kritik bir role sahiptir. Ray yatağı, setler, kesimler, mimari yapılar ve kullanılan inşa yöntemleri demiryolunun teknoloji rotasını içerir. 1860'larda çeliğe geçişle yapılan teknikler ve 19. yüzyıl sonlarında betonla yapılan deneyler birer örnektir. Ayrıca demiryollarının inşa edildiği coğrafya için geliştirilen yöntemlerde birer örnek olabilir (Himalaya Demiryolu). Sosyal, ekonomik, çevresel ve siyasi faktörlerde modern teknoloji tarihçiliğinin yaklaşımı olan tipik disiplinler arası yaklaşımıyla, demiryollarındaki teknik değişim ve gelişimi etkiler.
- Tipik ve olağanüstü örnek olması; demiryolu yapıları içerisinde spesifik öneme sahip yapıları içermektedir. Örneğin; su kuleleri, hangarlar, döner tablolar ve yakıt ikmal tesisleri birer tipik örnek olabilir. Yapıldıkları önemde buldukları coğrafyaya getirdikleri çözüm önerileri de olağanüstü örnekler arasına girmektedir. İsviçre ve Avusturya'da buluna dağ demiryolları buna örnektir.
- Ekonomik ve sosyal gelişimleri gösteren örnek; demiryolları ulaşım için inşa edilmiş olmalarına rağmen birçok siyasi, ekonomik, sosyal ve kültürel amaca da hizmet etmişlerdir. Kentlerin ticaret hacminin artmasına etki etmelerinin yanı sıra şehir içi raylı sistemleri kentlerin büyükşehir olmalarında kritik rol oynamaktadır [7].

Demiryolları evrensel bir deneyimi temsil ederler bu nedenle biri ekonomik olarak üstünken diğeri sosyo-tekniğe olarak değerli olabilmektedir. Miras durumu tüm dünyada aday gösterilen her alana uygulanmaktadır.

C. Koruma Kavramı

Geleneksel ve çağdaş yapım teknikleriyle inşa edilmiş ve günümüze kadar ayakta kalabilmiş yapılar birer taşınmaz kültür varlıklarıdır. Uluslararası kuruluşların düzenlediği toplantılarda alınan koruma kararları neticesinde yaşatılmaya çalışan kültürel miras yapılarının içerisinde, toplumları teknolojik alanda etkilemiş Endüstri Devrimi'nin izlerini taşıyan endüstri yapıları, 'Endüstri Mirası' başlığı altında incelenmektedir. Endüstri mirasının alt başlığı olarak karşımıza çıkan "Demiryolu Mirası" kavramı olarak yeni bir kavram olmasına rağmen, korunması gereken diğer değerlerden farklı değildir. Bu nedenle endüstri mirasının korunmasına yönelik yapılan çalışmalar demiryolu mirasını da kapsamaktadır.

Höhmann (1992) endüstri anıtlarını korumada uygulanan yöntemleri 4'e ayırmıştır;

- Herhangi bir müdahale yapmadan veya en az müdahale ile yeni işlev vermeksizin olduğu gibi korumaktır.

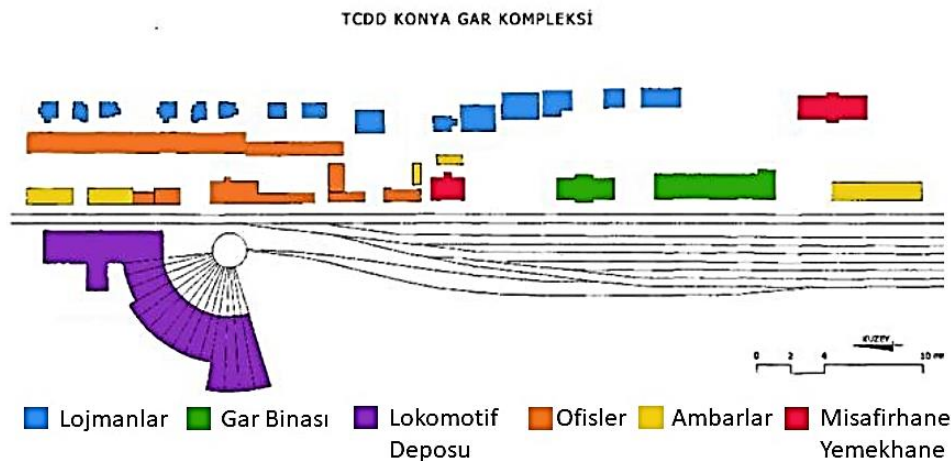
- Çok az bir değişimle ve eski işlevine yakın bir işlevle korumaktır.
- Yapıya müze işlevi vererek korumaktır. Bu noktada endüstri müzesi ile teknik müze ayırımına dikkat edilmesi gereklidir. Teknik müzede sadece konuyla ilgili ürünler, üretim teknikleri ve fabrikaya dair bilgiler verilir. Ancak endüstri müzesinde, sunulan dönemin sosyal, ekonomik ve teknik gelişimi, işçilerin günlük yaşamları, ürünlerin günlük yaşamda kullanım biçimleri gibi bilgilerin yanı sıra sosyal ve kültürel bilgilerin de verilmesi gereklidir [8].
- Endüstri yapılarını yeni bir işlevle yeniden kullanmaktır. Endüstri anıtlarını yeniden işlevlendirmek diğer yapı türlerinden daha kolaydır. Genelde yalın olan bu yapıların her metrekaresindeki ayrıntılarla uğraşmak gerekemeyebilir. Ancak yapıyı bir kabuk olarak algılayıp içinde istenilen değişikliği yapmak yerine, onu özgün kılan özelliklerin bozulmamasına özen gösterilmelidir. Bu yapıların taşıyıcı sistemini, dökme demir sütunlarını, ahşap taşıyıcılarını, pencere oranlarını ve profillerini, iç açıklığını, mekân bütünlüğünü, gabarisini, duvar dokusunu, avlularını, tesis içinde ulaşımı sağlayan raylar vb. özelliklerini korumak gerekmektedir. Bunların sağlanabilmesi; uygun işlevin bulunmasına ve uygulamanın doğru yapılmasına bağlıdır.

Endüstri Mirasının özel niteliğini, çağdaş ekonomik, yasal, kültürel ve çevresel konularla ilişkisini, karşı karşıya olduğu tehditleri göz önüne alarak tasarlandığı için kullanıcı taleplerinin değerlendirilmesi ve yeni inşa edilen bir yapı olarak mimari kriterler açısından karşılaştırmanın daha kolay olacağı düşünüldüğü için 2020 yılında hizmet vermeye başlayan YHT Gar Binasına yer verilecektir. Ayrıca bahsi geçen yapılar ve çevresi ile ilgili yapılan SWOT analizine, anket sonuçlarına değinilecek ve demiryolunun inşası ile hizmet vermeye başlayan tarihi istasyon kompleksine yönelik yapılan model önerisine ve öneri kapsamında geliştirilen mobilya ve aydınlatma tasarımlarına yer verilecektir.

IV. ALAN ÇALIŞMASI

Çalışmanın bu kısmında Konya gar kompleksi içerisindeki yapıların mekân oluşumlarına değinilecektir. Dönem ihtiyaçları göz önüne alınarak tasarlandığı için kullanıcı taleplerinin değerlendirilmesi ve yeni inşa edilen bir yapı olarak mimari kriterler açısından karşılaştırmanın daha kolay olacağı düşünüldüğü için 2020 yılında hizmet vermeye başlayan YHT Gar Binasına yer verilecektir. Ayrıca bahsi geçen yapılar ve çevresi ile ilgili yapılan SWOT analizine, anket sonuçlarına değinilecek ve demiryolunun inşası ile hizmet vermeye başlayan tarihi istasyon kompleksine yönelik yapılan model önerisine ve öneri kapsamında geliştirilen mobilya ve aydınlatma tasarımlarına yer verilecektir.

1888 yılında Almanlar tarafından imtiyazlar ile inşa edilmeye başlayan Anadolu demiryolu hattının bir parçası olan Konya demiryolları 1896 yılında tamamlanmıştır. Demiryolu inşası ile aynı dönemde tamamlanan yapı kompleksi bünyesinde farklı fonksiyon içeren yapıların bulunduğu bir yapı grubudur. Gar kompleksi kuzey-güney aksında 160 x 22 m uzunluğunda bir alana inşa edilmiştir [9].



Şekil 1. Konya Tarihi Gar Kompleksi (TCDD arşivleri yardımı ile yazar tarafından yeniden düzenlenmiştir.)

Yapı kompleksinin doğu cephesinde toplam 14 adet lojman yapısı bulunmaktadır. Bu yapılardan 6 tanesi Alman evi olarak bilinen demiryolunun ve istasyonunun inşası ile aynı dönemde yapılan iki katlı müstakil yapılardır. 2014-2015 yıllarında geçirilen restorasyon sonrası yapılar belediye ve özel kurumlara kiralanarak işyeri olarak

kullanılmaya başlanmıştır. 1990'lı yıllarda inşa edilen dörder katlı lojman yapıları restorasyon esnasında yıkılmışlardır.

Gar kompleksinin güneydoğusunda bulunan 1912 yılında yapılan yapı otel işlevi için inşa edilmiştir. Dönem dönem farklı işlevler yüklenen yapı restorasyon sonrasında misafirhane olarak hizmet vermeye başlamıştır. İstasyon binasının kuzeybatısında yer alan büyüklüğü ve mimari planı ile dikkat çeken yapı lokomotif deposu olarak inşa edilmiştir. Yay formunda 13 bölümden oluşan atölye binası ve lokomotifleri girecekleri yöne çevirmeye yarayan dairesel platform bulunmaktadır.

1896 yılında hizmet vermeye başlayan gar binası iki katlı ve simetrik planlı bir yapıdır. Giriş katta yolculara hizmet veren birimler, birinci katta ise lojmanlar tasarlanmıştır. Alman üslubu ile yapılmış istasyon binası aynı dönemde yapılan Ankara ve Eskişehir istasyon binalarına benzemektedir [9].



Şekil 2. Konya Tarihi Gar Binası (Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

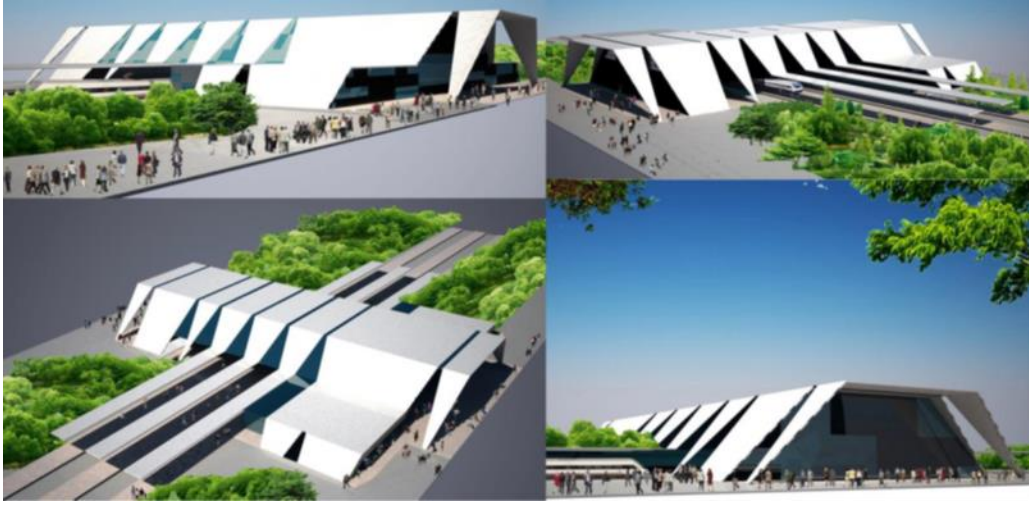
Yapı bir dönem restoran işlevi ile hizmet vermiştir. Restorasyon sonrasında ise YHT VIP bekleme salonu ve müdürlüklerin olduğu bir yapı olarak hizmet vermektedir. Demiryolu mirasının korunması kapsamında yapının işlevinin değerlendirilmesi SWOT analizi ve anket çalışması ile yapılmıştır. Yapıya yönelik yapılan SWOT analizi çevresel ve mimari olarak ele alınmıştır. Çevresel değerlendirilirken yapının konumu, ulaşımı, kültürel ve sosyal altyapısı, nüfusu dikkate alınmıştır. Mimari olarak değerlendirilirken ise yapının metrekaresi, donatı elemanlarının yeterliliği, ulaşılabilirliği, erişilebilirliği, müdahale ölçekleri dikkate alınmıştır.

Tablo 1. Konya Gar Binası Çevresel ve Mimari SWOT Analizi

		GÜÇLÜ YÖNLER	ZAYIF YÖNLER	FIRSATLAR	TEHDİTLER
ÇEVRESEL	<ul style="list-style-type: none"> Konum Ulaşım Otopark Nüfus Sosyal-Kültürel Yapı Ekonomi Eğitim 	Yapının kent merkezine ve turizm alanlarına yakın oluşu	Yapının bulunduğu konum itibari ile şehir merkezine yakın oluşu	Yapının toplum hafızasındaki yeri,	Yapının çevresinin büyümeye imkân vermemesi
		Yapının toplu taşıma araçlarına yakın oluşu, yaya erişimi ve özel araç erişimi için uygun oluşu	belirli saatlerde trafik yoğunluğunun fazla oluşu	Yapının ulaşılabilirliği	Yapının işlevinin ekonomik kaygısı
		Yapının çevresinde yapılaşmanın konut, kamu alanları ağırlıklı oluşu	Yapının yeterli otopark alanına sahip olmayışı	Yapının çevresi ile kurmuş olduğu ekonomik- sosyal ve kültürel bağlantı	
		Yapının sosyal ve kültürel alanlara (tiyatro, spor merkezi, alışveriş merkezi, sinema vs.) yakın oluşu			
		Yapının çevresinde gelişen yapılaşmanın ekonomik kalkınmaya yönelik ticaret alanlarını barındırması(kafe-restoran vs.)			
		Yapının çevresinde eğitim yapılarının varlığı			
MİMARİ	<ul style="list-style-type: none"> Mekânın Yeterliliği (m²) Donatının Yeterliliği Mekânın Erişilebilirliği Müdahale Ölçekleri Yapının Değeri Yapının Özgünlüğü Sürdürülebilirlik 	Yapının yapıldığı dönem itibari ile özgün oluşu	Yapının donatı elemanlarının (wc sayısı, oturma birimi sayısı ve niteliği) yetersizliği	Yapı grubunun birden fazla mimari özelliklere sahip yapıyı barındırması	Yapının mimari miras – demiryolu miras değerinden ötürü müdahale ölçeğinin sınırlı oluşu
		Yapının 2019 yılına kadar aynı işlev ile sürdürülebilirliğini devam ettiriyor oluşu	Yapının erişilebilirlik kriterlerini tam karşılayamıyor oluşu	Verilecek işlevler için uygun metrekarelerde alanların varlığı	
				Yapının mimarisinin özgün oluşu	
				Yapının konumu itibari ile sürdürülebilirliğe yanıt verebilecek oluşu	
				Yapının kolektif bellekte yer edinmiş oluşu	

2011 yılında hızlı trenin Konya'ya gelişi ile birlikte 2013 yılında projesi hazırlanan Yüksek Hızlı Tren Gar Binası eski buğday pazarına inşa edilmiş ve 2020 yılında hizmet vermeye başlamıştır. Buğday pazarı eski gar binasının kuzeyinde 4,5 km uzaklıkta yer almaktadır. Yapının bulunduğu yer oto tamircilerin, ayakkabı satış ve imalat dükkanlarının olduğu, tekstil işyerlerinin bulunduğu küçük sanayi sitesinin içerisinde yer almaktadır.

Demiryolunda iki adet hızlı tren ve bir adet konvansiyonel hat olmak üzere üç hat bulunmaktadır, gelecekte dört hat ve 3 peron eklenmesi planlanmaktadır [10]. Yapının kullanımı iki yöndedir ve yapı demiryolu hattının üzerinden geçen bir köprü gibi tasarlanmıştır.



Şekil 3. Konya Yüksek Hızlı Tren Garı [10]

Yüksek Hızlı Tren Gar Binası dönem ihtiyaçları göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Yapının çevresi ile ilişkisi ve mimari özellikleri göz önüne alınarak SWOT analizi yapılmış daha sonrasında ise anket uygulanarak kullanıcı memnuniyeti ölçülmüştür. Çevresel değerlendirilirken yapının konumu, ulaşımı, kültürel ve sosyal altyapısı, nüfusu dikkate alınmıştır. Mimari olarak değerlendirilirken ise yapının metrekaresi, donatı elemanlarının yeterliliği, ulaşılabilirliği, erişilebilirliği dikkate alınmıştır.

Tablo 2. Yüksek Hızlı Tren Gar Binası Çevresel ve Mimari SWOT Analizi

		GÜÇLÜ YÖNLER	ZAYIF YÖNLER	FIRSATLAR	TEHDİTLER
ÇEVRESEL	<ul style="list-style-type: none"> Konum Ulaşım Otopark Nüfus Sosyal-Kültürel Yapı Ekonomi Eğitim 	<p>Yapının yeni inşa edilmiş olması nedeniyle ulaşım alt yapısının planlanmış olması</p> <p>Yapının çevresinde az katlı yapılaşmanın oluşu yapının kent silüetinde yer etmesine olanak sağlamaktadır.</p> <p>Yapının yeterli otopark alanına sahip olması</p>	<p>Yapının toplu taşıma alanlarına uzak oluşu</p> <p>Yapının turizm merkezlerine uzak oluşu</p> <p>Yapının çevresinde kullanıcının ihtiyaçlarını karşılayan alanların olmayışı</p>	<p>Yapının çevresinin yeni yapılaşmalara izin veriyor oluşu</p> <p>Kullanıcı talebi doğrultusunda yapının çevresinde sosyal alanların artacak olması</p>	<p>Yapının konumunun sanayi bölgesine yakın oluşu</p> <p>toplumun yapının varlığını kabul etmeyişi (Ankara ATG AVM gibi)</p>
	MİMARİ	<ul style="list-style-type: none"> Mekânın Yeterliliği (m²) Donatının Yeterliliği Mekânın Erişilebilirliği Müdahale Ölçekleri Yapının Değeri Yapının Özgünlüğü Sürdürülebilirlik 	<p>Yapı içerisindeki mekânların işlevlerine uygun metrekarelerde tasarlanmış oluşu</p> <p>Yapı içerisindeki donatı elemanlarının yeterliliği</p> <p>Yapının erişilebilirlik kriterleri doğrultusunda tasarlanmış olması</p> <p>Yapının tarihi değerinin olmayışı ve müdahale ölçeklerinin sınırlı olmayışı</p> <p>Yapının özgün olarak tasarlanması</p>		<p>Yapının 2019 yılında hizmet vermeye başlaması ve uzun vadede yenileme gerektirmemesi ekonomi ve sürdürülebilirlik açısından katkı sağlamaktadır</p>

D. Anket Verileri ve Sonuçlar

SWOT analizinden sonra yapılan anket kullanıcı memnuniyetini ölçmeye yöneliktir. Anket üç bölüm ve toplam 48 sorudan oluşmaktadır. İlk bölüm demografik soruları, ikinci bölüm eski gar binasının ulaşılabilirlik ve erişilebilirliğini, yapının tasarım kriterlerini, fonksiyon ve olanaklarını, üçüncü bölüm ise yeni gar binasının ulaşılabilirlik ve erişilebilirliğini, yapının tasarım kriterlerini, fonksiyon ve olanaklarını içermektedir.

Tablo 3. Likert Ölçeği kapsamında kullanıcılara yöneltilen sorular

	Kesinlikle Katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Katılıyorum	Kesinlikle Katılıyorum
Garın Ulaşılabilirliği ve erişimi					
Garın Tasarım Kriterleri					

Tablo 3. (Devamı)

	Kesinlikle Katılmıyorum	Katılmıyorum	Kararsızım	Katılıyorum	Kesinlikle Katılıyorum
Garın Fonksiyonelliği					

Gar memnuniyet anketi, Google form üzerinden her iki garı da kullanan 103 katılımcı tarafından doldurulmuştur. Katılımcılar sorulan maddelere ilişkin olarak, kendilerine en yakın gördükleri ifadelerden, Kesinlikle katılmıyorum, katılmıyorum, kararsızım, katılıyorum ve kesinlikle katılıyorum şeklinde ifade belirtmişlerdir. Bu ifadeler, veri düzenleme araçlarınca kesinlikle katılmıyorum 1, katılmıyorum 2, kararsızım 3, katılıyorum 4 ve kesinlikle katılıyorum 5 puan olacak şekilde düzenlenmiştir. Anket 25 maddeden oluşmaktadır. 24 madde garın işlevselliği, ulaşılabilirliği ve erişimi açısından olumlu anlam içeren maddeler kullanılarak sorulmuştur. Bir madde “Gar çevresinde trafik yoğunluğu oldukça fazladır” ifadesi ile olumsuz anlam içerdiğinden dolayı ters kodlama yapılmıştır. Anket verileri SPSS 28.0 programı yardımı ile değerlendirilmiş ve iki gar binasının kullanıcı memnuniyeti istatistiksel olarak da ele alınmıştır.

Veriler düzenlenirken, her iki gar için de yanıt veren katılımcıların yanıtları alınmış, yarım bırakan katılımcılar analizden çıkarılmıştır. Sonuçta 72 katılımcının vermiş olduğu yanıtlar üzerinden analizler yapılmıştır. Aşağıda Tablo 4’te Gar1(Tarihi Gar) ve Gar2(Yeni Gar) için 25 maddelik memnuniyet anketi üzerinden elde edilen ortalama puanlara ilişkin betimsel istatistikler ve yapılan ölçümün güvenilirliğine ilişkin güvenilirlik katsayısı sunulmuştur

Tablo 4. Gar1 ve Gar2 Memnuniyet Anketine Yönelik Puan Ortalamalarına Ait Betimsel İstatistikler ve Güvenilirlik Katsayısı

	N	Min	Max	Ortalama	SS	Cronbach Alpha
Gar1	72	1,38	4,88	3,33	0,70	0,93
Gar2	72	1,21	4,88	3,27	0,79	0,94

Katılımcıların Gar1(Tarihi Gar) için memnuniyet puan ortalaması 3,33 iken, Gar 2(Yeni Gar) için memnuniyet puan ortalaması 3,27'dir. Katılımcıların puan ortalamalarındaki farklılığın istatistiksel olarak anlamlılığını sınamak için öncelikle verilerin dağılımının normalliği Kolmogorov-Smirnov testi ile sınanmış ve katılımcıların her iki gar için de memnuniyet anketi puan ortalamalarının normal dağılımdan istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılaştığı görülmüştür [$p < 0.05$].

Katılımcıların Gar1(Tarihi Gar) ve Gar 2 (Yeni Gar) için memnuniyet anketi puanlarının normal dağılımı sergilemediğinden dolayı, iki gar için memnuniyet anketi puan ortalamaları, parametrik olmayan Wilcoxon İşaretili Sıralar testi ile kontrol edilmiş, teste ait değerler aşağıdaki Tablo 5 de belirtilmiştir.

Tablo 5. Gar 1 ve Gar 2 Willcoxon İşaretili Sıralar Testi

Gar2 Ortalama Puan - Gar1 Ortalama Puan	N	Sıra Ortalaması	Sıra Toplamı	z	p
Negatif Sıralar	42	34,12	1433	-1,11	0,26
Pozitif Sıralar	28	37,57	1052		
Fark Olmayan	2				

Katılımcıların Gar1 (Tarihi Gar) ve Gar 2 (Yeni Gar) puan ortalamaları arasında bir fark olup olmadığını ortaya koymak için yapılan Wilcoxon İşaretili Sıralar testinin sonucuna göre katılımcıların Gar1 (Eski Gar) ve Gar 2 (Yeni Gar) memnuniyet puanları arasında istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılık gözlenmemiştir [$z = -1,11$, $p > 0,05$].

Ancak, Tablo 3 ve Tablo 4 incelendiğinde, Gar1 (Tarihi Gar) ve Gar 2 (Yeni Gar) için memnuniyet anketini dolduran toplam 72 kişiden 42'sinin Gar1, 28'inin de Gar2 için daha yüksek puan verdiği gözlemlenmiştir. İki kişinin ise her iki gar için verdiği puanlar arasında fark yoktur. Benzer şekilde, katılımcıların Gar1 (Tarihi Gar) için vermiş olduğu puan ortalamaları 5 üzerinden 3,33 iken, Gar 2 (Yeni Gar) için 3,27'dir. Buna göre katılımcıların Gar1 ve Gar2 için verdikleri puan ortalamaları istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılaşmasa dahi, hem gar1 için yüksek puan veren katılımcıların daha çok olduğu hem de katılımcıların gar1 için verdikleri puan ortalamasının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca anketin ikinci bölümünde eski gar binasına verilecek işlev seçimine yönelik soruda kullanıcıların %33,7 sinin tekrar gar binası olarak değerlendirilmesini talep ettiği sonucuna varılmıştır. Kullanıcıların diğer seçeneklere verdikleri oranlar ve garın fonksiyonelliği üzerine vermiş oldukları yanıtlar da göz önüne alındığında yeni gar binasının birden fazla fonksiyon içerecek olmasına rağmen talep edilmediği görülmüştür. Bunun nedenlerinden en önemlisi eski gar kompleksinin toplum hafızasında sahip olduğu yerdir. Yapılan yeni gar binası ile birlikte sadece bir durak ve bakım noktası olması planlanan eski gar kompleksi zamanla şehrin ortasında atılacaktır.

Çalışmanın bu aşamasında gelişen teknoloji ve değişen kullanıcı ihtiyaç ve talepleri dikkate alınarak elverdiği ölçüde koruma değer ve ölçütlerine dikkat edilerek eski gar binasına yönelik kullanım önerisi getirmektedir.

V. TARİHİ GAR KOMPLEKSİ İÇİN MODEL ÖNERİSİ

Kentin değişik işlev alanları arasındaki hareketlilik aslında gelişen ticari ve ekonomik hayatın bir gereğidir. Kamusal alanların bu hareketi destekler şekilde organizasyonu harekete, ticarete ve değişime hız

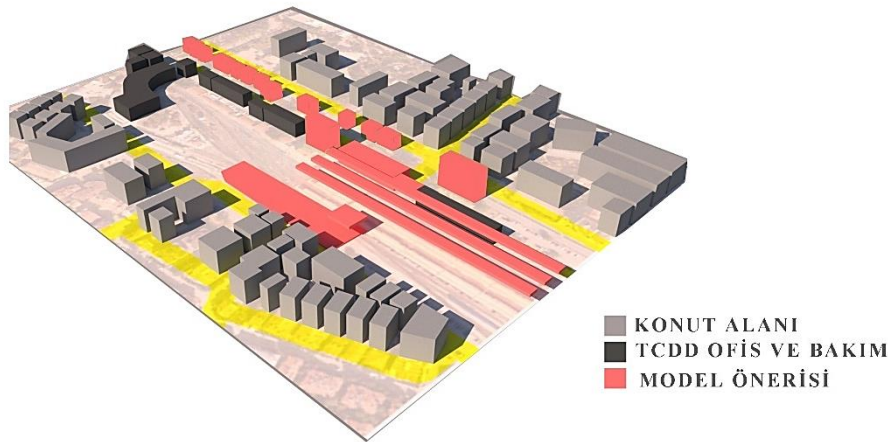
vermektedir. Kamusal bir mekân olan gar binaları da teknolojik gelişmeler ile birlikte toplumun talep ve ihtiyaçları da göz önüne alındığında birçok fonksiyonu içinde barındıran kamusal yapılar haline gelmektedir.

Çalışma kapsamında ele alınan alanda planlanan ulaşım stratejileri neticesinde zamanla yapıların toplum ile bağının kopacağı düşünülmektedir. Yapılan öneri ile yapı ve çevresinin bölge halkının daha aktif kullanabileceği bir alan olması hedeflenmektedir. Yapının bulunduğu mahalleyi ikiye bölüyor olması ve bundan dolayı bugüne kadar aktif bir köprü görevi görmesi model önerisinde dikkate alınmıştır. Yapının sit alan olarak tescillenmesi, toplum hafızasında edindiği yer de göz önüne alınarak tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarım yaklaşımında *bakım, fonksiyonellik-esneklik ile erişilebilirlik, mekân kimliği ve sürdürülebilirlik* ilkeleri dikkate alınmıştır. Var olan yapılara Demiryolu Mirası yapılarının korunmasına yönelik yöntemler [8] (Tablo 6) dikkate alınarak müdahale edilmiştir. Bu kapsamda ek gar binasına mevcut işlevi ile örtüşen bir işlev verilmiştir. Ayrıca misafirhaneye ve peronlara yapıların mimarisine, cephe özelliklerine, fiziksel konfor şartlarına uygun olan önceki işlevi ile örtüşen işlev önerileri getirilmiştir. Tarihi gar binasının bekleme salonu olan giriş katı için mekânın fiziksel koşullarının uygun olduğu, farklı bir işlev olan restoran işlevi düşünülmüştür. İkinci katlar daha öncesinde lojman olarak kullanılmıştır, çalışmada mekanlara en az müdahalenin olacağı ofis işlevi önerisi getirilmiştir. Yapı kompleksinin içerisinde bulunan müstakil durumdaki lojman binalarının ofis, dernek vb. gibi işlevlerle yapıların mimari oluşumu ve cephe özelliklerine uygun işlevlerin verilmesi önerisinde bulunulmuştur. Peron örtüleri, mobilyaları, aydınlatma elemanları, yönlendirme ve bilgilendirme panoları, ek gar binası içerisinde bulunan oturma elemanları, gişe giydirmeleri, danışma bankosu, aydınlatma elemanları, yönlendirme ve bilgilendirme panoları ile döşeme ve donatı elemanları tasarlanmıştır.

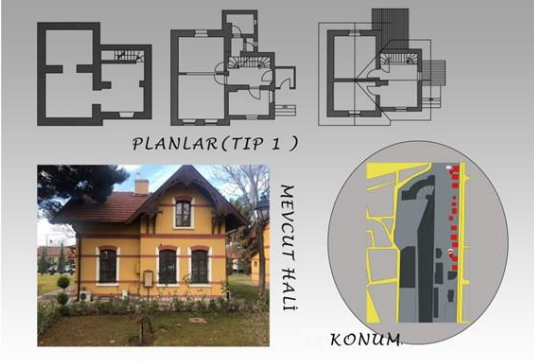

Tablo 6. Endüstri Mirası Koruma Yöntemleri Işığında Yapılan Müdahaleler [8] (Yazar tarafından düzenlenerek tablolaştırılmıştır.)

Herhangi bir müdahale yapmadan veya en az müdahale ile yeni işlev vermeksizin olduğu gibi koruma	Çok az bir değişimle ve eski işlevine yakın bir işlevle koruma	Endüstri yapılarını yeni bir işlevle yeniden kullanma
Ek Gar Binası	Misafirhane	Lojman Binaları
	Tarihi Gar Binası	
	Peronlar	

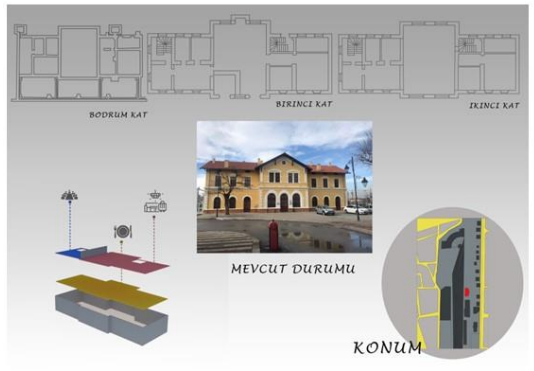
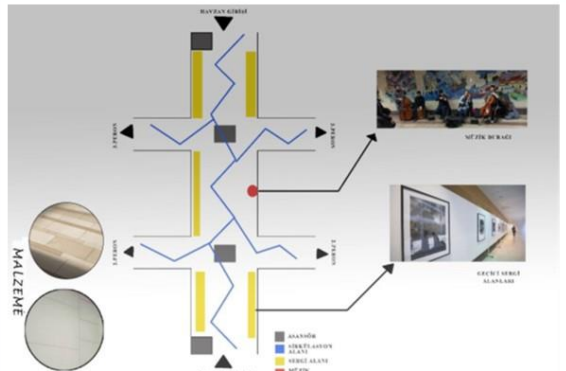
Ayrıca kullanıcıların talepleri arasında bulunan rekreasyon alanı seçeneği de dikkate alındığında ve yapı çevresinde yeterli açık kamusal alanın olmadığı göz önünde bulundurularak yapı kompleksi içerisinde yaklaşık 5.000 m² alana sahip bir açık alan tasarlanmıştır.



Şekil 4. Konya Tarihi Gar Kompleksi Model Önerisi

	LOJMANLAR	MİSAFİRHANE-BAĞDAT OTELİ
İŞLEV ÖNERİSİ	<p>Gar kompleksi içerisinde restorasyon sonrasında belediye tarafından kiralanılan lojman yapılarının günümüzdeki işlevleri ile devam etmesi uygun görülmüştür.</p>	<p>Eski garda yakın illerden İstanbul, Ankara ve Eskişehir hızlı trenleri için gerek otobüs ile gerekse tren ile yolcu aktarımı yapılmaktadır. Konya'nın turizm potansiyeli göz önüne alındığında yolcuların günlük bir turu tercih etmeleri ve teşvik edilmesi için eski Bağdat Otel olan bugün misafirhane işlevi gören yapının tekrar otel olarak değerlendirilmesi üzerinde durulmaktadır. Yapı kompleksi içerisinde TCDD tarafından işletilen bir konaklama yapısının varlığının kullanıcılar için cazip olacağı düşünülmüştür.</p>
		


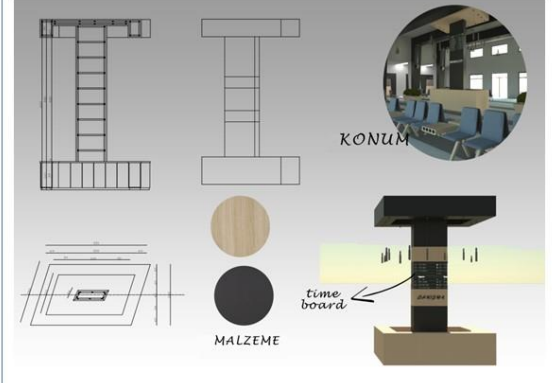
Şekil 5. Tarihi Gar Kompleksi Lojman-Misafirhane İşlev Önerisi

	TARİHİ GAR BİNASI	ALT GEÇİT
İŞLEV ÖNERİSİ	<p>Şu anda VIP bekleme salonu ve yönetim ofisleri olarak hizmet veren eski gar binasının giriş katının restoran, doğu cepheden girişi bulunan birinci katların ise VIP bekleme ve yönetim ofisleri olarak hizmet vermesi planlanmıştır.</p>	<p>Eskiden Havzan Mahallesi ile bağlantıyı sağlayan üst geçidin iptal edilip yerine alt geçit yapılmıştır. Yapılan alt geçit ara peron olan ikinci ve üçüncü peron ile de bağlantı sağlamaktadır. Model önerisi doğrultusunda bu alt geçitte geçici sergilerin yapılabileceği ve bir noktada müzik durağının olabileceği düşünülmüştür.</p>
		

Şekil 6. Tarihi Gar Kompleksi Gar Binası ve Alt geçit İçin İşlev Önerisi

	HAVZAN GİRİŞİ	BİSİKLET DURAĞI
REKREASYON ALANI	<p>Alt geçidin Havzan girişinin üst örtüsü yeniden tasarlanmıştır. Düşey sirkülasyon elemanlarının ve asansörlerin etrafında bulunan alan biraz daha ötelenerek yeşil alana dahil edilmiştir. Etrafında 150 cm lik yeşil alan tasarlanmıştır ve peronlarda kullanılan oturma birimlerine yer verilmiştir. Üst örtü peronlarda bulunan üst örtü ile aynı tasarlanmış, yeşil alan üzerindeki kısımda kısmen açıklık bırakılmıştır. Çelik kolonlarla taşıtılan üst örtüde kompozit malzeme kullanılmıştır.</p>	<p>Havzan girişinin olduğu alana konumlandırılan bisiklet durağının üst örtüsünde bulunan solar enerji sistemi aydınlatma, dijital gösterim alanı ve elektrikli bisiklet kilidinin ihtiyacı olan enerjiyi üretmektedir. Ahşap sakı ve oturma birimi bisiklet kilit noktalarına dönüşmektedir.</p>
		

Şekil 7. Tarihi Gar Kompleksi Havzan Girişi-Bisiklet Durağı Model Önerisi

	GENEL	DANIŞMA BANKOSU
EK GAR BİNASI	<p>Tarihi gar binasının zamanla yetersiz kalmasından dolayı 1974 yılında inşa edilen gar binasının orta hacmi bekleme salonlarının ve gişelerin bulunduğu bölgedir. Yapının kuzey yönünde WC ler ve bir bekleme salonu daha bulunmaktadır. Yapının güneyinde ise sonradan inşa edilen üç katlı PTT binası ve ofisler bulunmaktadır.</p>	<p>Daha önce gişelerin bulunduğu yerde bulunan danışma bekleme salonunun ortasında dijital zaman tabelasının bulunduğu taşıyıcı ile beraber tasarlanmıştır. Danışma bankosu ve üzerinde bulunan üst örtü tasarımında da siyah melamin kaplı mdf lam kullanılmıştır.</p>
		

Şekil 8. Tarihi Gar Kompleksi Ek Gar Binası Model Önerisi

EK GAR BİNASI	
<p>BEKLEME SALONU</p> <p>Yapının bekleme holü ve gişeler yeniden ele alınmıştır. Bekleme salonunun zemin döşemesinde hijyenik ve aşınmaya karşı kısmen dayanıklı malzeme olarak üç farklı renkte linolyum kullanılmıştır. Bekleme salonunun duvarları beyaz renkte duvar boyası ile boyanmış, bekleme salonunda bulunan dört adet taşıyıcı da ise siyah melamin kaplı panel kullanılmıştır.</p>  <p>MEVCUT DURUMU</p> <p>MALZEMELER</p> <p>DUVAR</p> <p>ZEMİN</p>	<p>OTURMA BİRİMİ</p> <p>Bekleme salonu için tasarlanan oturma birimlerinin taşıyıcısı ahşaptır, oturma birimlerinin örtüsü ise kamu alanlarında çoğunlukla tercih edilen suni deri kaplamadır. Sırtlıklı ve sırtlıksız olmak üzere iki çeşit oturma biriminin bulunduğu oturma ünitesinde bulunan elektrik panelleri ile yolcuların elektronik eşyalarını kullanımlarını sağlamak amaçlanmıştır</p>  <p>MALZEME</p> <p>elektrik ünitesi</p> <p>KONUM</p>

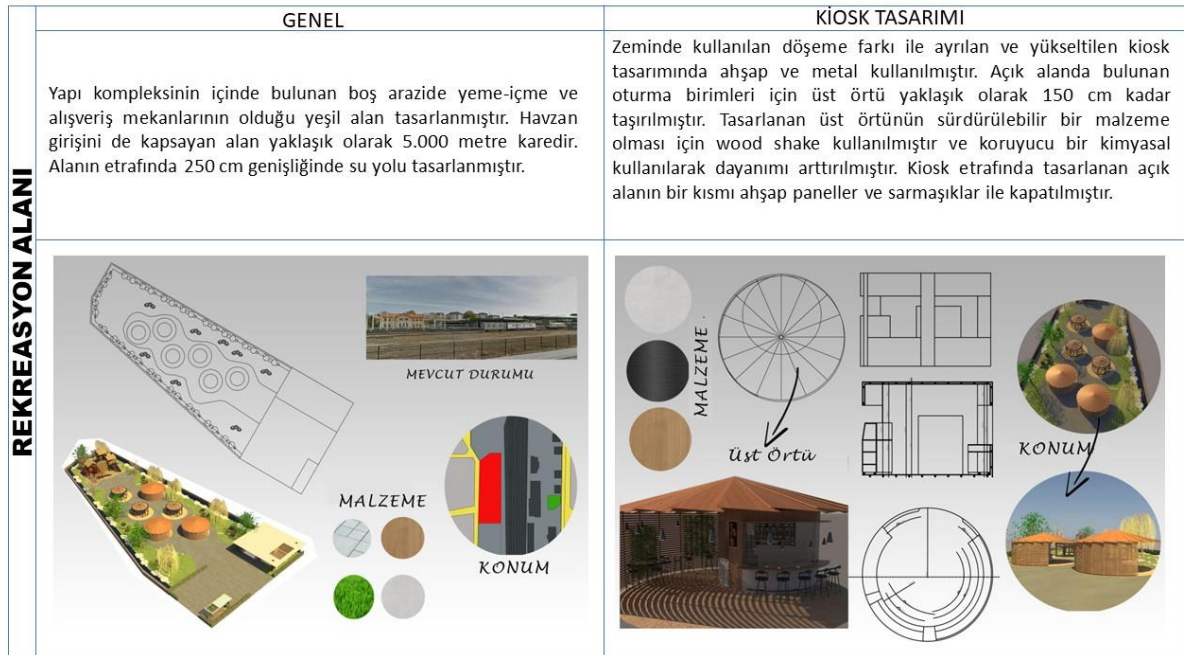
Şekil 9. Tarihi Gar Kompleksi Ek Gar Binası Model Önerisi(Bekleme Salonu- Oturma Birimi)

EK GAR BİNASI	
<p>GİŞELER</p> <p>Gişelerde de ön plana çıkması için siyah melamin kaplama kullanılmış, gişe giydirmelerinin iç ayrıtlarında led aydınlatma tasarlanmıştır. Gişe bankoları ise meşe kaplı mdf lamdır. Gişelerin bulunduğu açık koridorda kolonların aksını takip eden aynı genişlikte barisol aydınlatmalar kullanılmıştır.Aydınlatma elemanı olarak sarkıt, alüminyum malzemeden tasarlanmış silindirik formda iki kademeli aydınlatmalar tasarlanmıştır. Bekleme salonunda bulunan siyah melamin kaplı kolonların üzerinde yine alüminyum malzemeden tasarlanmış duvar aplikleri kullanılmıştır.</p>  <p>barisol aydınlatma</p> <p>KONUM</p> <p>MALZEME</p>	<p>YÖNLENDİRMELER</p> <p>Çalışma dahilinde ala alınan kurumun kimliği de göz önünde bulundurularak bir tasarım geliştirilmiştir.</p> <p>Ulaştırma ve Alt Yapı Bakanlığının kurumsal kimliği ve logo tasarımı üzerine belirttiği kriterler göz önünde bulundurulduğunda; bakanlık logo renklerinde mavi (Pantone 2935 U), kırmızı (Pantone 1797 U) renginin, yazı fontu olarak da siyah renginin kullanılmasını istemektedir.</p>  <p>MALZEMELER</p> <p>BAKANLIK ÖRNEĞİ</p> <p>BEYAZ YÜZEY</p> <p>CAM</p> <p>TASIYICI</p> <p>KONUM</p>

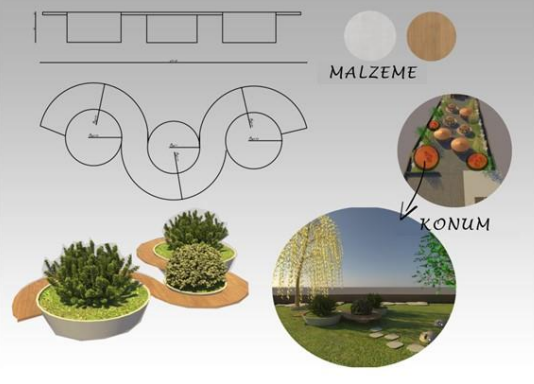

Şekil 10. Tarihi Gar Kompleksi Ek Gar Binası Model Önerisi (Gişeler-Yönlendirme)



Şekil 11. Ek Gar Binası Donatı Elemanları



Şekil 12. Tarihi Gar Kompleksi Rekreasyon Alanı Model Önerisi

REKREASYON ALANI	
OTURMA BİRİMİ	ÇOCUK OYUN ALANI
<p>Yeşil alan üzerinde adım taşları ile ulaşılan, dairesel formda oturma üniteleri tasarlanmıştır. İklim koşullarına dayanıklı ve doğal malzeme olan ahşaptan tasarlanan oturma yüzeylerini ortalarında bulunan beton saksılar taşımaktadır.</p>  <p>MALZEME</p> <p>KONUM</p>	<p>Kuzeyden gelen kış rüzgarını kesmesi için bu alana yüksek ağaçların ekilmesi önerilmiştir. Yeşil alanın kuzeyinde bulunan çocuk oyun alanı 5-15 yaş çocukların kullanımı için uygun tasarlanmıştır. Ahşap konstrüksüyon kullanılan oyun parkında kırmızı ve mavi renk plastik, tırmanma yüzeylerinde ise ip kullanılmıştır. Oyun alanının bulunduğu zemin yumuşak fakat darbelere dayanıklı kauçuk esaslı malzeme ile kaplanmıştır.</p>  <p>MALZEMELER</p> <p>KONUM</p>

Şekil 13. Tarihi Gar Kompleksi Rekreasyon Alanı Model Önerisi (Oturma Birimleri- Çocuk Oyun Alanı)

REKREASYON ALANI	
GÜRÜLTÜ BARIYERİ	
<p>Tren gürültüsünü kontrol altına almak adına alanda gerekli önlemlerin alınması önerilmiştir. Gürültü kontrolü herhangi bir ses kaynağından yayılan rahatsız edici sesleri maskeleyen veya makul seviyeye indirme işlemidir. Yeşil alan potansiyelini arttırmak sureti ile alana özel tasarlanacak gürültü bariyerleri ile çözümler üretilmiştir. panellerde kullanılan bitkisel yüzeyleri desteklemek için ahşap veya taş malzemelerin kullanımı uygun görülmüştür.</p>  <p>MALZEMELER</p> <p>KONUM</p> <p>ÖRNEK GÖRSELLER</p> <p>https://tr.pinterest.com/</p>	

Şekil 14. Tarihi Gar Kompleksi Rekreasyon alanı Model Önerisi

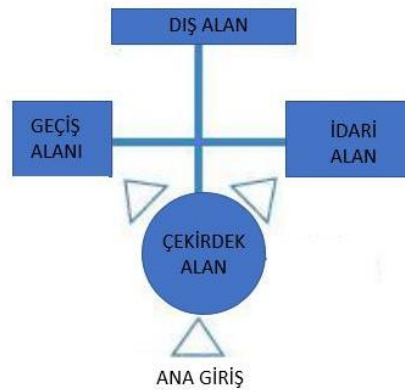
GENEL		OTURMA BİRİMİ	
<p>Peronların tasarımına yönelik çalışmada peron örtülerinin değiştirilmesi öneri getirilmiştir. Peron örtülerinin açık kısımlarında 1974 yılında yapılan gar binasının çatı parapetlerinde kullanılan kare boşluklu oluşumlara öykünen bir tasarım kullanılmıştır. Aynı zamanda tasarlanan üst örtünün solar enerji ile kendi elektriğini üretebilmesi öngörülmüştür. Peronda bulunan yönlendirmeler kolonlar üzerinde değil bir pano üzerinde tasarlanmıştır. Panolarda dijital tanıtım ekranları bölge hakkında bilgi vermektedir.</p>		<p>Peron için tasarlanan oturma birimlerinde nispeten hafif olabilmesi için taşıyıcı olarak alüminyum profillerin üzerine kaplama ve oturma yüzeyinde ise ahşap kullanılmıştır. Aynı formda elektrik ünitesinin ve led aydınlatmanın bulunduğu, bitkilendirmenin ve oturma yüzeyinin olduğu üç çeşit birimden oluşan üniteler ile farklı kombinler ile oturma alanları oluşturulabilmektedir</p>	
PERON TASARIMI			

Şekil 15. Tarihi Gar Kompleksi Peron Model Önerisi

VI. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Raylı sistemlerin varlığı M.Ö. e kadar dayanmasına rağmen demir ray üzerinde hareket eden demir tekerleklerin varlığından endüstri devrimi ve sonrasında söz edilebilir. Bugün gelinen noktada demiryolu ulaşımı manyetik alan aracılığı ile yapılsa da bu sisteme henüz geçmeyen çok sayıda ülke bulunmaktadır. Ulaşımında yaşanan teknolojik gelişmeler ulaşım yapılarına da yansımaktadır. İnşa edildikleri dönemde dönem ihtiyacı olan gişeler, wc'ler, bekleme salonu, bagaj teslim noktaları ile yeterli hizmet veren istasyon binaları zamanla yetersiz kalmaya başlamışlardır. 21.yüzyılda çok fonksiyonlu ulaşım yapılarının gündeme gelmesi ile Avrupa'da bulunan çok sayıda İstasyon binaları hızlı bir dönüşüm yaşamaya başlamışlardır.

21. yüzyılda ön görülen istasyon binaları dört çekirdekte oluşmaktadır; bekleme salonlarının, gişelerin, bagaj teslim noktasının ve danışmanın bulunduğu alan çekirdek alanı, yeme-içme mekânlarının, alışveriş mekânlarının olduğu hacim geçiş alanını, biniş, yükleme ve boşaltma ile bakım alanlarının bulunduğu bölge dış alanı ve yönetimin, ofislerin bulunduğu yer ise idari alanı oluşturmaktadır.



Şekil 16. 21. yüzyıl İstasyonların Fonksiyon Bubble Diyagramı [11]

Çalışmaya TCDD arşivlerinin yetersizliği göz önüne alınarak başlanmıştır, yapılan araştırmalar ve literatür çalışmaları neticesinde son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler sonucunda TCDD bünyesinde bulunan yapıların arşivlenmesine hız verildiği görülmüştür. Ulaşım teknolojisinde yaşanan gelişim sonucunda yeni gar

binalarının inşası ve var olan yapıların restorasyonu yapılmaya başlanmıştır. Elde edilen bulgular ışığında kullanıcı memnuniyetinin ne derece dikkate alındığı tartışılmış ve yapılan anket ile tarihi gar binalarının yetersiz olmasına rağmen daha çok tercih edildiği sonucuna varılmıştır. Yapıların mimari özellikleri ve çevrelerine yönelik SWOT analizleri de yapılmış ve 21.yüzyıl ulaşım yapılarının gereklerine yönelik bir model önerisinde bulunulmuştur

Çalışılan model önerisi neticesinde ulusal demiryolu mirasının bir parçası olan, Almanlar tarafından yapılmış ve her dönem toplum hafızasında yer eden tarihi gar binası tekrar kamusal alan olarak işlevlendirilmiştir. Asıl işlevinin yanı sıra halkın birebir temas halinde olduğu mekânlar ile içe içe geçirilerek sadece bir istasyon binası değil 21. yüzyılın istasyon oluşumuna uygun olarak çok fonksiyonlu yapı olması sağlanmıştır. Ülkemizde bulunan demiryolu yapılarının çoğunluğu küçük hacimlerdir bu sebeple bahsi geçen çok fonksiyonlu ulaşım yapıları için tek başlarına yetersiz kalmaktadırlar. Bu nedenle yapı kompleksi olarak ele alınıp değerlendirilmeleri gerekmektedir. Çalışma dahilinde geliştirilen model önerisinin kent merkezlerinde kullanımı azalan veya sona eren diğer gar kompleksleri için bir öneri oluşturması hedeflenmiştir.

Sonuç olarak büyük ya da küçük ölçekteki yapılarda ulusal demiryolu mirasımızın korunmasına yönelik yapılan müdahaleler; mevcut yapıların kullanıldıkları dönemde 7°den 70°e kadın, erkek, çocuk çok sayıda kişinin temas ettiği kamu alanları oldukları göz önüne alınarak yeniden halkın hizmetine sunulacak şekilde olmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] URL-1. (2021). ICOMOS. ICOMOS Hakkında: <http://www.icomos.org.tr/> , 15/01/2021
- [2] Durak, S. (2003). *Bir Modernleşme Projesi Olarak Anadolu'da Demiryolları ve Bursa-Mudanya Hattı*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa
- [3] Erkan, Y. K. (2007). *Anadolu Demiryolu Çevresinde Gelişen Mimari ve Korunması*. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [4] TCDD. (2018). 2003-2018 Demiryollarının Altın Dönemi. Osmanlı'dan Bugüne: Kara Trenden Yüksek Hızlı Trenlere. TCDD, Ankara,69.
- [5] Kösteroğlu, E. (2006). Demiryolu Mirası-Korunması. Dosya, Bülten 43,19-23.
- [6] Kösebay Erken, Y., & Ahunbay, Z. (2008). Anadolu Demiryolu Mirası ve Korunması. *İtü Dergisi/A*,14-25
- [7] ICOMOS. (2021). Railways as a World Heritage Sites. Icomos Türkiye: <http://www.icomos.org.tr/>, 15/01/2021.
- [8] Föhl, A. (1995). *Bauten Der Industrie und Technik*. Bonn, Broschiert, 165.
- [9] Erdoğan, H. A. (2005). *Konya Tren İstasyonu ve Çevresinin Gelişimi*. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- [10] URL-2. (2021). thidilmimarlık. thidilmimarlık: <http://www.thidilmimarlık.com>, 05/12/2021.
- [11] Kande, S. (2004). Intermodal Concept İn Railway Station Design. Bangkok University Academic Review.

Araştırma Makalesi – Research Article

İkili Tank Akışkan Seviye Sisteminin Kontrolü İçin Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı ve İleri Besleme + PI Kontrolcü Karşılaştırılması

Sliding Mode Controller Design and Comparison with Feed Forward +PI Controller for Fluid Level System Control of Couple Tank

Sadrettin Gölcügezli^{1*}, Ahmet Dumlu²

Geliş / Received: 07/04/2022

Revize / Revised: 08/06/2022

Kabul / Accepted: 15/08/2022

ÖZET

Bu makalede endüstri tesislerinde kullanılan akışkan seviye tank sisteminin tipik uygulaması olan İkili-Tank sistemine kayan kipli kontrol (SMC) uygulanarak kontrolü incelenmiştir. Doğrusal olmayan İkili-Tank sisteminin matematiksel modeli her iki tank sistemi için çıkarılmıştır. İkili-Tank sisteminin dinamik Denklemleri, kayan kipli kontrol ile birleştirilerek sistem tasarlanmıştır. SMC'nin önemli yönü, sistem durumlarının kayma yüzeyinde kalmasını sağlayan bir anahtarlama işlevi kullanarak dış bozuluculara veya belirsizliklere maruz kalan doğrusal olmayan bir dinamik sistemi kontrol etmektir. Yazar tarafından kayan kipli kontrol (SMC), parametre değişimlerine ve bozulmalara karşı sağlamlığı nedeniyle tercih edilmiştir. Bu makalede istenmeyen çadırda etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC tekniği kullanılmıştır. Kayan kipli kontrol için kontrol işareti, anahtarlama kontrol işareti ile eşdeğer kontrol işaretinin toplamı olacak şekilde hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan İkili-Tank sisteminin transfer fonksiyonu, Taylor serisi doğrusallaştırma yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu makalede Tank 2 transfer fonksiyonu, sistemin giriş geriliminin akışkan seviyesine oranıyla belirlenmiştir. Transfer fonksiyonu için İkili-Tank sistemine uygulanan kayan kipli kontrol ile başka bir kontrol şekli olan ileri beslemeli PI denetleyicisi (FF-PI) karşılaştırılmıştır. Kayan kipli kontrol (SMC) uygulanarak tasarlanan İkili-Tank sisteminin MATLAB-Simulink simülasyon ortamında ölçülen akışkan seviyenin, referans akışkan seviyesine takibi ve ölçülen akışkan seviyesi ile istenilen akışkan seviyesi arasındaki hata tespiti incelenmiştir. Kayan kipli kontrol (SMC) ile tasarlanan sistem oldukça başarılı bir şekilde istenilen akışkan seviyesini takip edebildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Kayan Kipli Kontrol, İleri Beslemeli PI, Akışkan Seviye Sistemleri, Doğrusal Olmayan Kontrol*

ABSTRACT

In this article, sliding mode control (SMC) is applied to the Couple-Tank system, which is the typical application of the fluid level tank system used in industrial facilities and its control is examined. The mathematical model of the nonlinear Couple-Tank system was found out for both tank systems. The system was designed by combining

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: sadrettin.golcugezli37@erzurum.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6889-3947>)

Project Support Office, Atatürk University, 25240, Erzurum, Turkey

²İletişim: ahmetdumlu@erzurum.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2181-5386>)

Department of Electrical and Electronics Engineering, Erzurum Technical University, 25700, Erzurum, Turkey

the dynamic equations of the Couple-Tank system with the sliding mode control. The important aspect of SMC is to control a nonlinear dynamic system that is exposure to external disturbances or uncertainties using a switching function that ensures that the system states remain on the slip surface. The sliding mode control (SMC) was chosen by the author because of its robustness against parameter changes and distortions. In this article, the second order SMC technique is used to avoid the unwanted chattering effect. The control signal for the sliding mode control was calculated as the sum of the switching control signal and the equivalent control signal. The transfer function of the nonlinear Couple-Tank system was calculated by the Taylor series linearization method. In this article, the Tank 2 transfer function was determined by the ratio of the input voltage of the system to the fluid level. The sliding mode control applied to the Couple-Tank system and the feed forward PI controller (FF-PI), which is another type of control, are compared. The monitoring of the measured fluid level to the reference fluid level and error detection between the measured liquid level and the desired fluid level were examined in the simulation environment of the Couple-Tank system designed by applying the sliding mode control (SMC). It has been observed that the system designed with sliding mode control (SMC) can follow the desired fluid level quite successfully.

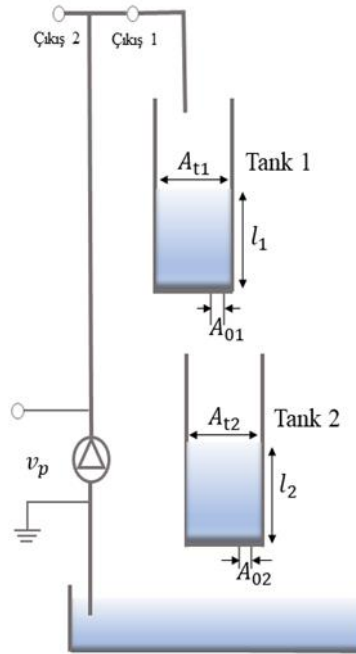
Keywords- *Sliding Mode Control, Feedforward PI, Fluid Level Systems, Nonlinear Control*

I. GİRİŞ

Endüstri tesislerinde kullanılan proses işlemlerinden biri de akışkan seviye tank sistemleridir. Tipik bir proses kontrol temsilcisi, İkili-Tank (CT) akışkan seviye kontrol problemidir [1]. Akışkan seviye kontrolün; gıda işleme, içecek, süt ürünleri, filtrasyon, atık arıtma, nükleer enerji üretim tesisleri, ilaç endüstrileri, su arıtma sistemleri, endüstriyel kimyasal işleme, sprey kaplama, otomatik akışkan dağıtım ve iklim cihazları gibi endüstriyel uygulamaları vardır [2]. Akışkan seviyesinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi proses endüstrilerinde önemli bir görev olmuştur. Genellikle akışkanlar tanklara pompalanır, daha sonraki proses işlemleri için tanklarda depolanır ve birleştirilmiş tanklardan akar [3]. Literatürde birçok çalışmada rapor edilen ikili tank sistemlerine çok sayıda doğrusal olmayan kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Bozulma ve parametre değişimleri altında akışkan seviye sisteminin yüksek doğrulukta kontrolünü uygulamak için uyarlanabilir tabanlı ve dayanıklı kesirli dereceli denetleyici göz önünde bulundurulmuştur [4,5]. Deneysel çalışma ile bir akışkan seviye mekanizması için uyarlanabilir bir geri adımlı denetleyicide önerilmiştir [6]. Ek olarak, ikinci dereceden doğrusal olmayan akışkan seviye sistemi için küresel olarak asimptotik olarak kararlılık sağlamak için yüksek kazançlı bir gözlemci ile birleştirilmiş model tabanlı bir geri adımlı denetleyici önerilmiştir [7]. Model tabanlı kontrol yöntemlerinin dışında, bulanık mantık ve sensör hata toleranslı kontrolörlerin sistem doğrusalsızlıklarında, parametre değişimlerinde ve bozulmalarda yüksek hassasiyetli kontrol gibi gereksinimleri karşılaması önerilmiştir [8]. Fakat, büyük gecikme gibi belirli başka bir durum meydana geldiğinde, bulanık tabanlı denetleyici performansı bozulur. Bu kontrol teknikleri arasında doğrusal olmayan kayma kipli kontrol tekniği (SMC), belirsizlikler, bozulmalar ve modellenmemiş dinamikler ile doğrusal olmayan sistem için sağlam bir kontrol yöntemidir [9, 10]. SMC'nin önemli yönü, sistem durumlarının kayma yüzeyinde kalmasını sağlayan bir anahtarlama işlevi kullanarak dış bozuculara veya belirsizliklere maruz kalan doğrusal olmayan bir dinamik sistemi kontrol etmektir [11]. Uygulamada, SMC tekniğinin tipinin ve SMC'nin parametrelerinin seçimi çok önemlidir. Bunun nedeni, yüksek anahtarlama kazancı seçiminin, yüksek frekanslı salınım olarak bilinen istenmeyen bir çaturdama etkisine neden olabilmesidir [12]. Bu nedenle, çaturdama etkisinden kaçınmak için literatürde farklı tipte SMC teknikleri geliştirilmiştir. Örneğin, çaturdama etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC önerilmiştir [13]. Ayrıca, yüksek dereceli SMC (HOSMC) tekniği önerilmiştir [14]. Literatürde, akışkan seviye kontrol sistemine uygulanan birçok farklı SMC şeması kullanılır. Bu makalede akışkan seviye tank sisteminden istenilen prosesi sağlaması için gereken kontrol, ikinci dereceden kayan kipli kontrolcüyle sağlanmıştır. Kayan kipli kontrol (SMC) basitliği, parametre varyasyonlarına ve bozulmalara karşı sağlamlığı nedeniyle birçok bilimsel ve endüstriyel uygulamada kapsamlı bir şekilde çalışılmış ve yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Ayrıca, kayan kipli kontrol (SMC) modelleme ve performans arasındaki ödünleşimlerin basit bir şekilde ölçülmesine izin vererek, tüm tasarım sürecini aydınlatılabilir. Kayan kipli kontrol, makine mühendisliği, robotik, elektrik mühendisliği, kontrol sistemleri, ağ mühendisliği vb. gibi mühendisliğin çeşitli dallarında uygulamalara sahiptir [15].

II. SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Endüstri tesislerindeki akışkan seviye tank prosesinin tipik bir uygulaması olan İkili-Tank sistemi Şekil 1'deki gibidir. İkili-Tank sistemi bir pompa, iki tank ve bir depodan oluşur. İkili-Tank kontrol sisteminde amaç, akışkanın sistemden talep edilen seviyede sabit tutulmasıdır. İkili-Tank sisteminden l_1 ve l_2 olmak üzere iki adet akışkan seviyesi mevcut olmasından dolayı iki ayrı denetleyiciye ihtiyaç duyulmuştur. Tank 1'in kontrolü, pompa vasıtasıyla Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması, Tank 2'nin kontrolü ise Tank 1 tarafından Tank 2'nin içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması ile sağlanmıştır. Sistemlerin kontrol aşamalarından biri transfer fonksiyonunun belirlenmesidir. İkili tank sistemi için Tank 1'in kontrolünde giriş pompa gerilimi, çıkış ise tutulması gereken akışkan seviyesi olacak şekilde alınmıştır. Tank 2'nin kontrolü için giriş Tank 1'den Tank 2'ye aktarılan akışkan, çıkış ise Tank 2'de tutulması gereken akışkanın seviyesi olacak şekilde belirlenmiştir. Bu makalede Tank 2'nin transfer fonksiyonu giriş gerilimi ile akışkan seviyesinin oranıyla belirlenmiştir. İkili tank sistemi için gerekli parametreler ve değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan İkili-Tank sistemin kontrolü için Tank 1 ve Tank 2 dinamik denklemleri çıkarılmıştır.



Şekil 1. İkili-Tank Sistemi

Tablo 1. Sistem değişkenleri ve sabitleri

	Tanım	Değer	Birim
v_p	Pompa Gerilimi		V
k_p	Pompa Sabiti	3,3	$\frac{cm^3}{s \cdot V}$
g	Yer Çekimi	981	cm/s^2
l_{cs1}	Tank 1 Çalışma Seviyesi	15	cm
l_{cs2}	Tank 2 Çalışma Seviyesi	15	cm
l_1	Tank 1 Akışkan Seviyesi	Değişken	cm
l_2	Tank 2 Akışkan Seviyesi	Değişken	cm
A_{t1}	Tank 1 Kesit Alanı	15,5179	cm^2
A_{t2}	Tank 2 Kesit Alanı	15,5179	cm^2
A_{01}	Tank 1 Çıkış Kesit Alanı	0,1781	cm^2
A_{02}	Tank 2 Çıkış Kesit Alanı	0,1781	cm^2
q_{in1}	Tank 1 Giriş Debi	Değişken	cm^3/s
q_{in2}	Tank 2 Giriş Debi	Değişken	cm^3/s
q_{01}	Tank 1 Çıkış Debi	Değişken	cm^3/s
q_{02}	Tank 2 Çıkış Debi	Değişken	cm^3/s
v_{01}	Tank 1 Çıkış Hızı	Değişken	cm/s
v_{02}	Tank 2 Çıkış Hızı	Değişken	cm/s

Tank sisteminde kullanılacak olan Tablo 1.'de verilen l_{cs1} ve l_{cs2} için sistemden istenilen çalışma seviyesi olarak tanımlanmıştır. Hacimsel akış hızı olarak q harfi kullanılmıştır. Sistemin transfer fonksiyonu elde edebilmek için doğrusal olmayan tank sisteminin hareket denklemleri, durgun bir çalışma noktası etrafında karakterize (l_{cs}) edilmiştir.

Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın debisi Denklem (1)'de verilmiştir.

$$q_{in1} = k_p v_p(t) \quad (1)$$

Tank 1 ve Tank 2'den çıkan akışkanın hız denkleminin elde edilmesi için Bernoulli Denklemi kullanılmıştır. Tank 1 ve Tank 2'nin sırasıyla denklemleri Denklem (2) ve Denklem (3)'de verilmiştir.

$$v_{01} = \sqrt{2gl_1(t)} \quad (2)$$

$$v_{02} = \sqrt{2gl_2(t)} \quad (3)$$

Denklem (2) ve Denklem (3)'de verilen Bernoulli Denklemleri yardımıyla Tank 1 ve Tank 2'den çıkış yapan akışkanın debi denklemleri Denklem (4) ve Denklem (5)'deki gibi elde edilmiştir.

$$q_{01} = A_{01} \sqrt{2gl_1(t)} \quad (4)$$

$$q_{02} = A_{02} \sqrt{2gl_2(t)} \quad (5)$$

Tank 1 ve Tank 2'deki akışkan seviyesinin değişimini veren denklemi elde etmek için süreklilik yasasından faydalanılmıştır. Burada akışkan sıkıştırılmaz (sabit yoğunluk) kabul edilmiştir. Tank 1 ve Tank 2 akışkan seviyesinin değişimi sırasıyla Denklem (6) ve Denklem (8)'de elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = \frac{q_{in1}(t) - q_{01}(t)}{A_{t1}} = \frac{k_p v_p(t)}{A_{t1}} - \frac{A_{01} \sqrt{2gl_1(t)}}{A_{t1}} \quad (6)$$

Tank 1'den çıkan akışkan ile Tank 2'ye akan akışkan aynı olduğundan dolayı Tank 1'den çıkan akışkanın debisi ile Tank 2'ye akan akışkanın debisi birbirine eşittir.

$$q_{01} = q_{in2} \quad (7)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = \frac{q_{in2}(t) - q_{02}(t)}{A_{t2}} = \frac{A_{01}\sqrt{2gl_1(t)}}{A_{t1}} - \frac{A_{02}\sqrt{2gl_2(t)}}{A_{t2}} \quad (8)$$

Doğrusal olmayan İkili-Tank sistemi, Taylor serisi yaklaşımıyla doğrusallaştırılabilir [16]. Doğrusallaştırma ile elde edilen Tank 1 ve Tank 2 sistemlerinin denklemleri elde edilmiştir ve her iki tank için transfer fonksiyonu hesaplanmıştır.

Doğrusallaştırma Denklem (9)'da verilen Taylor serisi yardımıyla elde edilmiştir.

$$f(l) = f(l_0) + (l - l_0)f'(l_0) + \dots + \frac{(l-l_0)^n}{n!} \cdot f^n(l_0) \quad (9)$$

Denklem 9 verilen l_0 kararlı durum çalışma noktası olarak alınmıştır.

Denklem (6)'da ve Denklem (8)'de elde edilen matematiksel hesabı kolaylaştırmak için sırasıyla sabitler Denklem (10) ve Denklem (11)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$x_1 = \frac{-A_{01}}{A_{t1}}\sqrt{2g}, y_1 = \frac{k_p}{A_{t1}} \quad (10)$$

$$x_2 = \frac{-A_{02}}{A_{t2}}\sqrt{2g}, y_2 = \frac{A_{01}}{A_{t2}}\sqrt{2g} \quad (11)$$

Denklem (10) ve Denklem (11), sırasıyla Denklem (6) ile Denklem (8)'de yerine yazıldığında Denklem (12) ve Denklem (13) elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = x_1\sqrt{l_1(t)} + y_1v_p(t) \quad (12)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2\sqrt{l_1(t)} \quad (13)$$

Denklem (9)'da verilen Taylor Denklemi Tank 1 ve Tank 2 için hesaplandığında sırasıyla Denklem (14) ve Denklem (15) elde edilmiştir.

$$\sqrt{l_1} \approx \sqrt{l_{cs1}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1 - l_{cs1}) \quad (14)$$

$$\sqrt{l_2} \approx \sqrt{l_{cs2}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs2}}}(l_2 - l_{cs2}) \quad (15)$$

Tank 1 ve Tank 2 akışkan seviyelerinin değişimleri, Denklem (14) ve Denklem (15)'de elde edilen Denklemler sırasıyla Denklem (12) ve Denklem (13)'de yerine yazıldığında Denklem (16) ve Denklem (17) elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = x_1\left(\sqrt{l_{cs1}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1(t) - l_{cs1})\right) + y_1v_p(t) \quad (16)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = x_2\left(\sqrt{l_{cs2}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs2}}}(l_2(t) - l_{cs2})\right) + y_2\sqrt{l_{cs1}} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1(t) - l_{cs1}) \quad (17)$$

Kararlı durum şartları altında $l_{c1} = l_1$, $l_{c2} = l_2$, $v_{csp} = v_p$ alınmıştır. Kararlı durumda Denklem (16) ve Denklem (17)'de $l_{c1} = l_1$, $l_{c2} = l_2$, $v_{csp} = v_p$ yazıldığında Denklem (18) ve Denklem (19) elde edilmiştir.

$$0 = x_1\sqrt{l_{cs1}} + y_1v_{csp} \quad (18)$$

$$0 = x_2\sqrt{l_{cs2}} + y_2\sqrt{l_{cs1}} \quad (19)$$

Denklem (16)'dan Denklem (18) ve Denklem (17)'den Denklem (19) matematiksel olarak çıkarma işlemi yapılmıştır. Yapılan çıkarma işlemi neticesinde Denklem (20) ve Denklem (21) elde edilmiştir. Denklem (20) ve Denklem (21)'de l'_1 , l'_2 ve v'_p ifadeleri $l'_1 = (l_1 - l_{cs1})$, $l'_2 = (l_2 - l_{cs2})$, $v'_p = (v_p - v_{csp})$ olarak alınmıştır.

$$\frac{dl'_1}{dt} = \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} l'_1(t) + y_1 v'_p(t) \quad (20)$$

$$\frac{dl'_2}{dt} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} l'_2(t) + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}} l'_1(t) \quad (21)$$

Tank 1 için transfer fonksiyonu Denklem (20) kullanılarak Laplace dönüşümüyle hesaplanmıştır.

$$L'_1(s)s = \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} L'_1(s) + y_1 V'_p(s) \quad (22)$$

$$G_1(s) = \frac{L'_1(s)}{V'_p(s)} = \frac{3,24}{15,237s+1} \quad (23)$$

Tank 2 için transfer fonksiyonu Denklem (21) kullanılarak Laplace dönüşümüyle hesaplanmıştır.

$$\frac{d^2 l'_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} \frac{dl'_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}} \frac{dl'_1}{dt} \quad (24)$$

$$L'_2(s) \left(s^2 - \left(\frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} + \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs2}}} \right) s + \frac{x_1 x_2}{4l_{cs2}} \right) = \frac{y_1 y_2 V'_p(s)}{2\sqrt{l_{cs2}}} \quad (25)$$

$$G_2(s) = \frac{L'_2(s)}{V'_p(s)} = \frac{13,9 \cdot 10^{-3}}{s^2 + 0,1313s + 4,31 \cdot 10^{-3}} \quad (26)$$

III. DENETLEYİCİ TASARIMI

Bu makalede İkili-Tank akışkan seviye sisteminin kontrolü için kayan kipli kontrol uygulanmıştır. Kayan kipli kontrolde kayma yüzeyi fonksiyonu seçimi yapılmıştır. Ayrıca sistemin kontrolü için anahtarlama kontrol işareti ile eşdeğer kontrol işaretinin denklemi hesaplanmıştır. Sistemin kontrol işareti U, eşdeğer kontrol ile anahtarlama kontrol işaretinin toplamıdır [17].

$$U(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (27)$$

Bu makalede kontrol tasarımında kayma yüzeyi ve hata fonksiyonu olmak üzere iki fonksiyon üzerinden gidilmiştir. Kayma yüzeyi sistemin derecesine göre hesaplanmıştır. Tank 1 için hata fonksiyonu, referans akışkan seviyesi ile ölçülen akışkan seviyesi arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır.

$$e = l_r(t) - l_1(t) \quad (28)$$

$$\dot{e} = \dot{l}_r(t) - \dot{l}_1(t) \quad (29)$$

Kayan kipli kontrol için kayma yüzeyi fonksiyonu Denklem (30)' da belirlenmiştir.

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_c \right)^{n-1} \cdot e(t) \quad (30)$$

Sistemin hatasını sıfıra yaklaştırmak için kayma yüzeyi sıfıra götürülmüştür.

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (31)$$

$$s(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - \dot{l}_1(t) \quad (32)$$

Denklem (12)'de verilen Tank 1 akışkan seviyesi değişimi Denklem(32)'de yerine yazılmıştır.

$$s(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - (x_1 \sqrt{l_1(t)} + y_1 v_p(t)) \quad (33)$$

$$y_1 v_p(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - x_1 \sqrt{l_1(t)} \quad (34)$$

Tank 1 için eşdeğer kontrol işareti Denklem (35)'deki gibi hesaplanmıştır. Tank 1 için eşdeğer kontrol işareti (u_{eq1}) sistemin girişi yani pompa gerilimine eşit olacak şekilde alınmıştır.

$$u_{eq1} = \frac{(\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - x_1 \sqrt{l_1(t)}}{y_1} \quad (35)$$

Tank 2 için sistem ikinci dereceden olacak şekilde tasarlanmıştır. Denklem (13)'de verilen Tank 2 akışkan seviyesinin, ikinci mertebeden türev olacak şekilde Denklem (38)'de hesaplanmıştır.

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_2(t)}} \cdot \frac{dl_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot \frac{dl_1}{dt} \quad (36)$$

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_2}} \cdot (x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2\sqrt{l_1(t)}) + \frac{y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot (x_1\sqrt{l_1(t)} + y_1 v_p(t)) \quad (37)$$

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} + \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot v_p(t) \quad (38)$$

İkinci dereceden Tank 2 sisteminin hatasını sıfır yapmak için kayma yüzeyinin türevi de sıfıra götürülmüştür.

$$e(t) = l_r(t) - l_2(t) \quad (39)$$

$$e\ddot{(t)} = l_r\ddot{(t)} - l_2\ddot{(t)} \quad (40)$$

$$s(t) = e\dot{(t)} + \lambda_c \cdot e(t) \quad (41)$$

$$s\dot{(t)} = e\ddot{(t)} + \lambda_c \cdot e\dot{(t)} \quad (42)$$

$$s\dot{(t)} = \lambda_c \cdot e\dot{(t)} + l_r\ddot{(t)} - l_2\ddot{(t)} \quad (43)$$

$$s\dot{(t)} = \lambda_c \cdot e\dot{(t)} + l_r\ddot{(t)} - \left(\frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} + \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot v_p(t) \right) \quad (44)$$

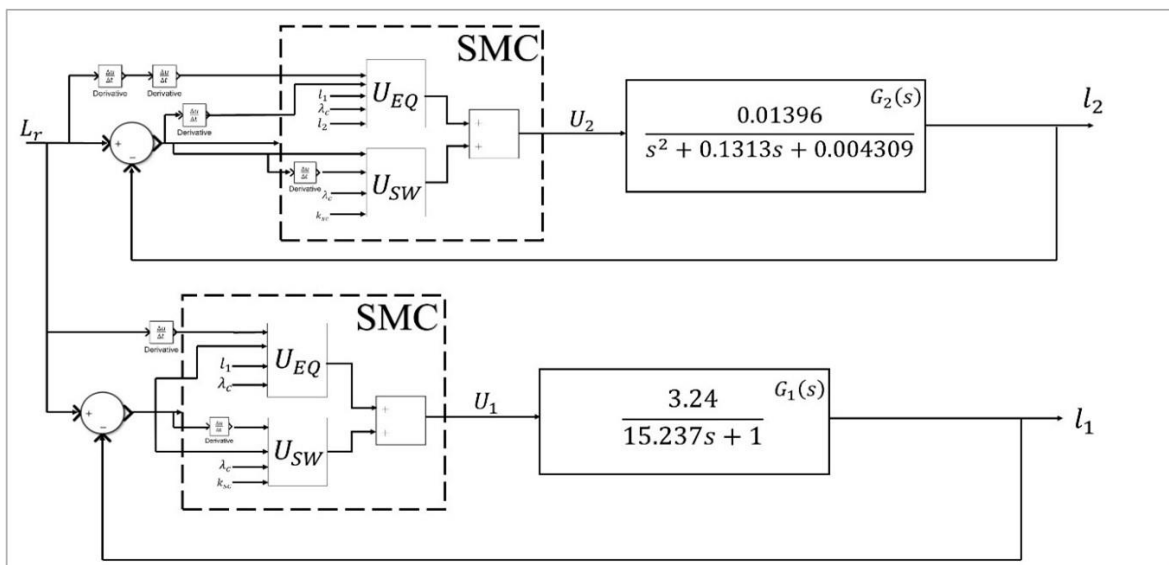
$$v_p(t) \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} = \lambda_c \cdot e\dot{(t)} + l_r\ddot{(t)} - \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} \quad (45)$$

Tank 2 için eşdeğer kontrol işareti Denklem (46)'daki gibi hesaplanmıştır.

$$u_{eq2} = \left(l_r\ddot{(t)} + (\lambda_c \cdot e\dot{(t)}) - \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} \right) \cdot \left(\frac{2\sqrt{l_1(t)}}{y_1 y_2} \right) \quad (46)$$

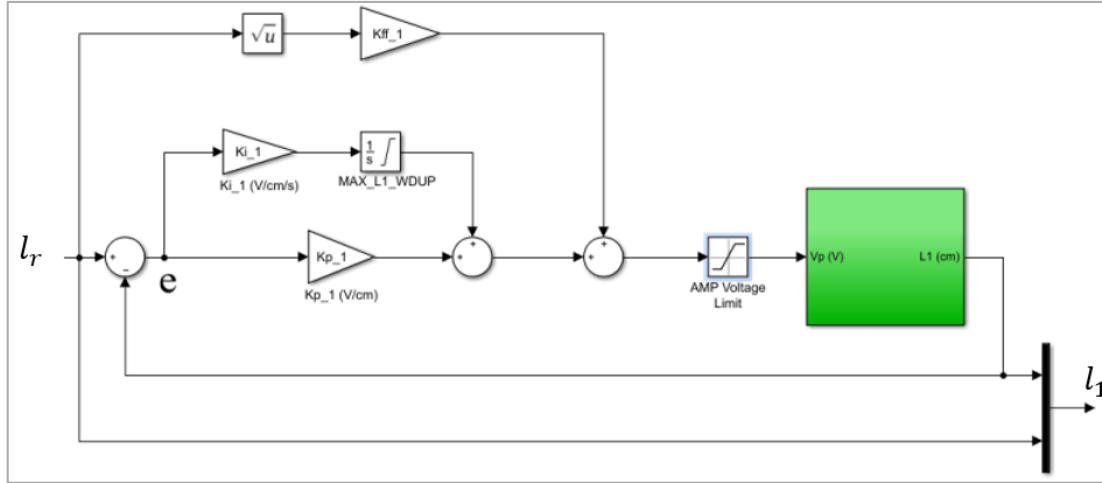
$$u_{sw} = k_{sc} * sign(s(t)) \quad (47)$$

İkili-Tank sistemi elde edilen dinamik Denklemler, matematiksel model, anahtarlamalı kontrol işareti, eşdeğer kontrol işareti ve transfer fonksiyon kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 2).

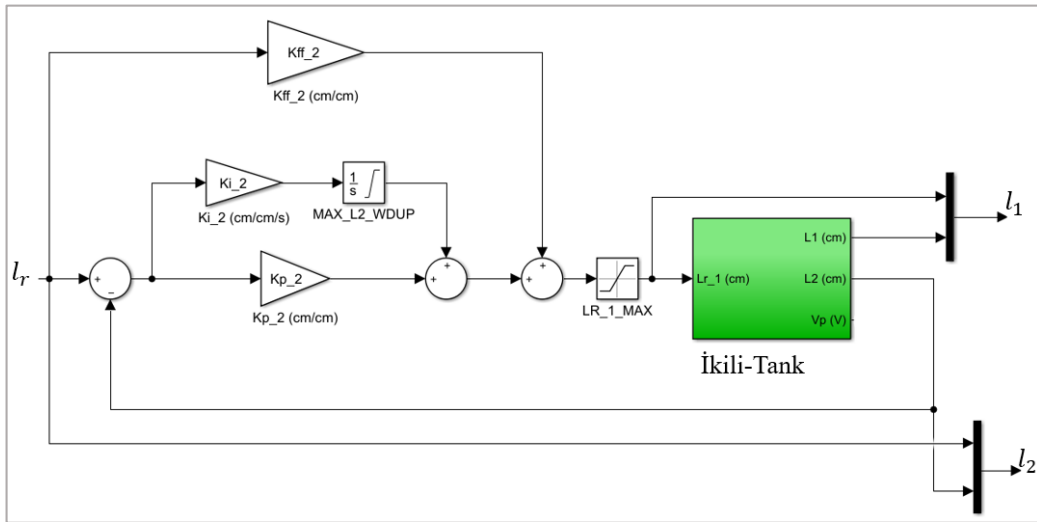


Şekil 2. SMC kontrol şeması

İkili tank sisteminin SMC kontrol yöntemi ile karşılaştırılması için FF-PI yöntemi kullanılmıştır. İleri beslemeli PI kontrol yönteminin Matlab/Simulink programında modellenen Tank 1 sisteminin tasarımı Şekil 3'te, Tank 2 sisteminin tasarımı Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. FF-PI Tank 1 kontrol şeması



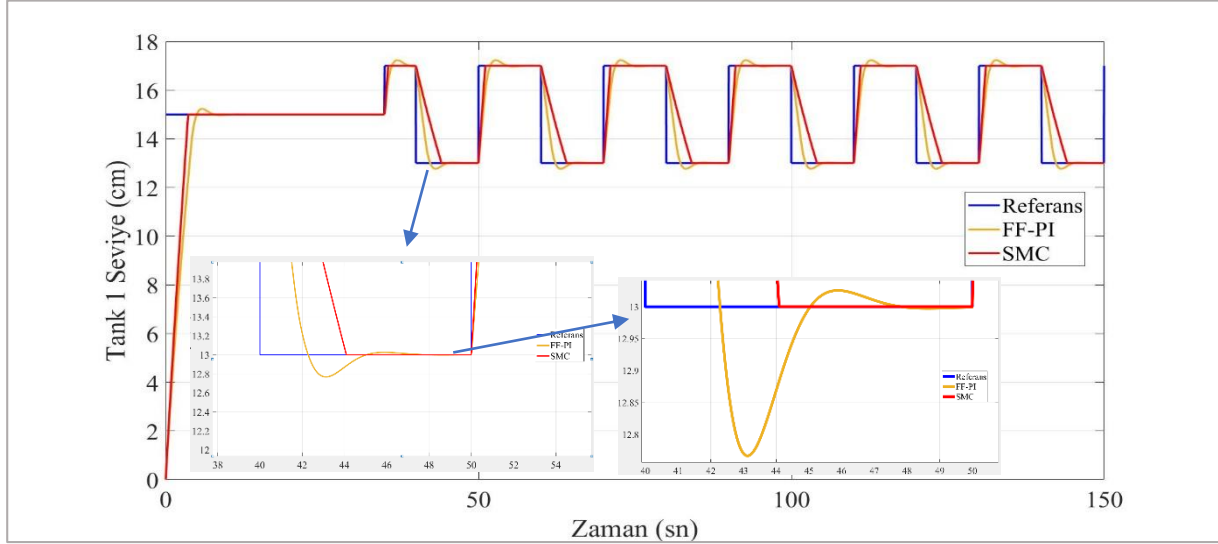
Şekil 4. FF-PI Tank 2 kontrol şeması

IV. BENZETİM SONUÇLARI

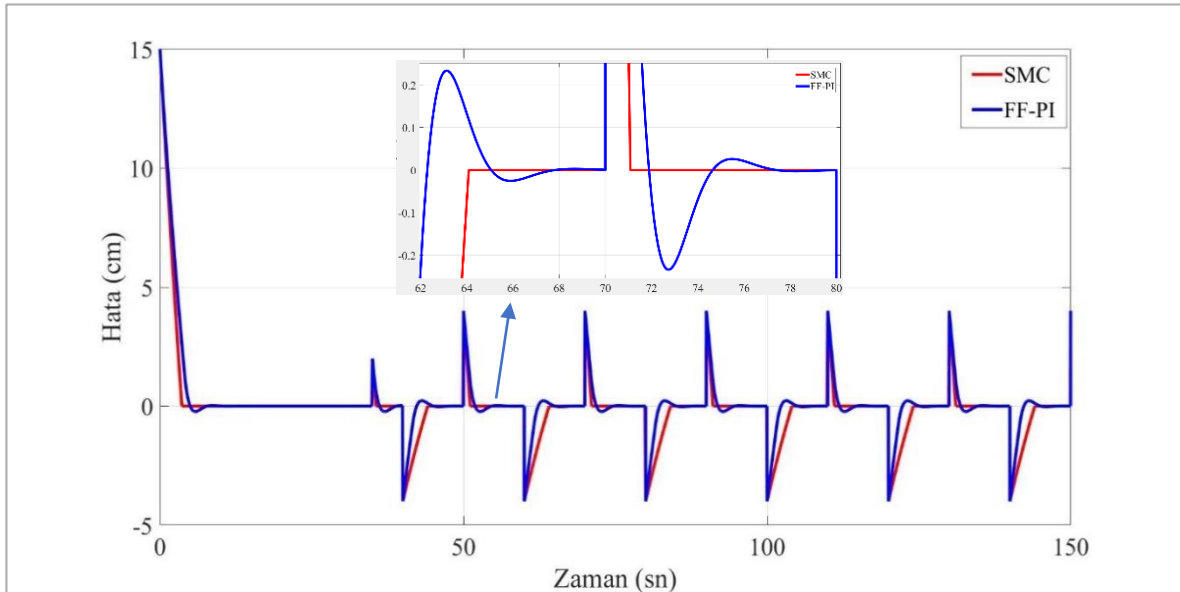
İkili-Tank sistemine uygulanan kayan kipli kontrol, Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçları ileri beslemeli PI kontrolcü ile karşılaştırılmıştır. İkili-Tank sistemi için tasarlanan kayan kipli kontrol Tank 1 ve Tank 2 sistemleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu makalede kayan kipli kontrolün k_{sc} ve λ_c sabitleri yazar tarafından benzetim sonuçlarından elde edilen verilere göre belirlenmiştir. Belirlenmiş olan değerler neticesinde akışkan seviyesinin, referans sinyal takibi oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

A. Tank 1 Seviye Kontrol

Kayan kipli kontrolcü ile tasarlanan Tank 1 sisteminin referans kare dalga sinyalini takibi, ileri beslemeli PI kontrolcüyle tasarlanan sisteme kıyasla daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5).

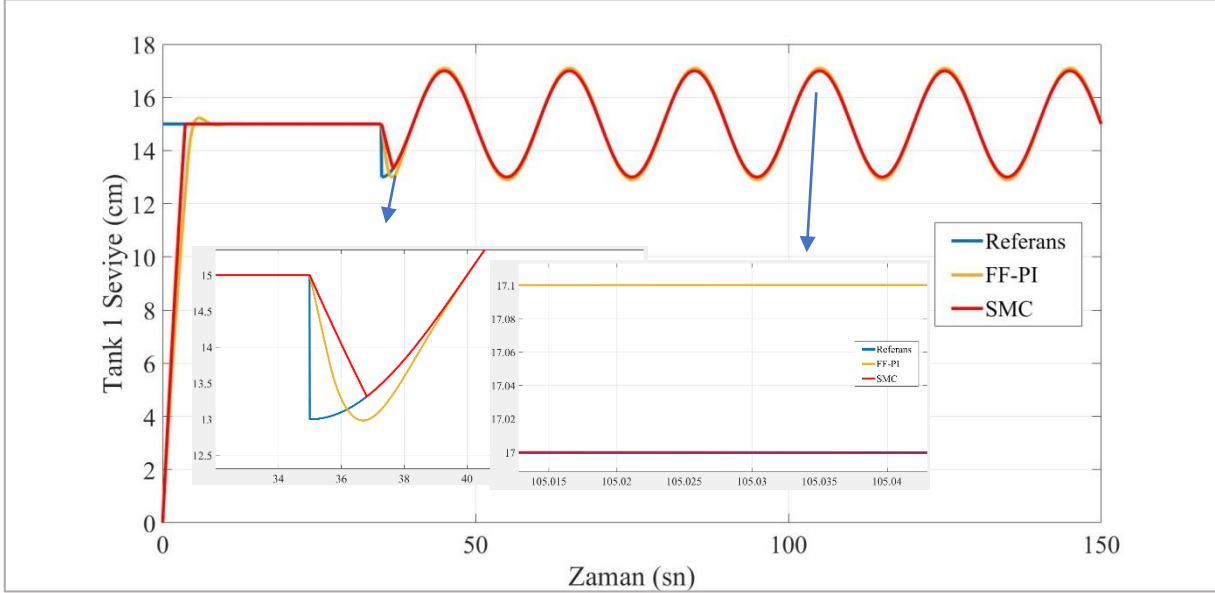


Şekil 5. Tank 1 akışkan seviye kare dalga formu

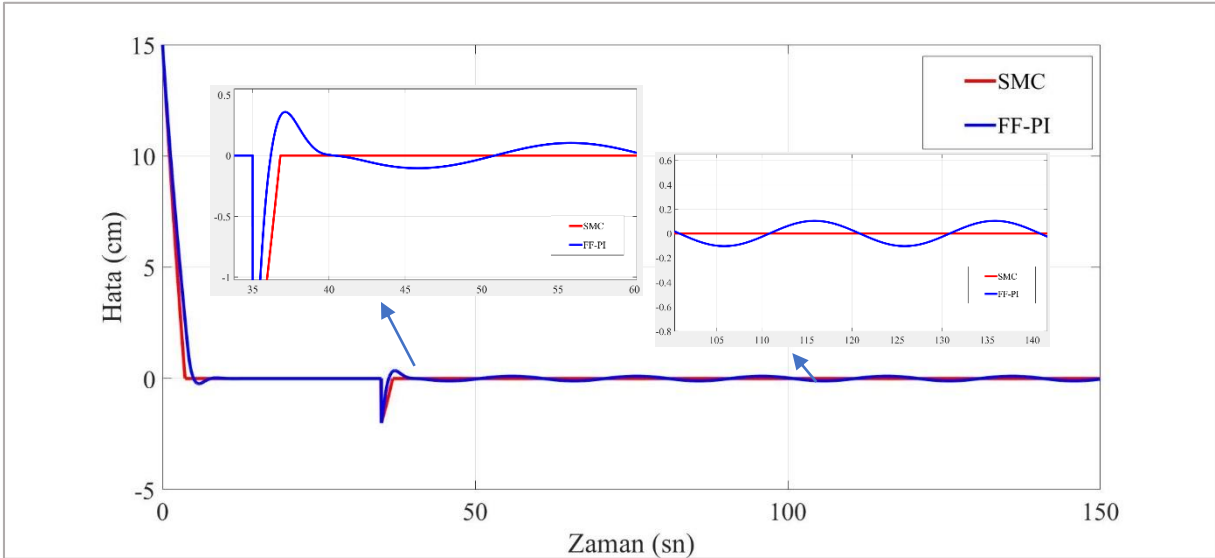


Şekil 6. Tank 1 kare dalga formuna göre hata

Tank 1 sisteminin sinüzoidal dalga şekline göre yanıtı Şekil 7’de elde edilmiştir. Kayan kipli kontrolün, ileri beslemeli PI kontrolcüye göre daha başarılı bir şekilde referans sinyalinin takip ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 8’de Tank 1 sisteminin hatası grafiksel olarak incelenmiştir.



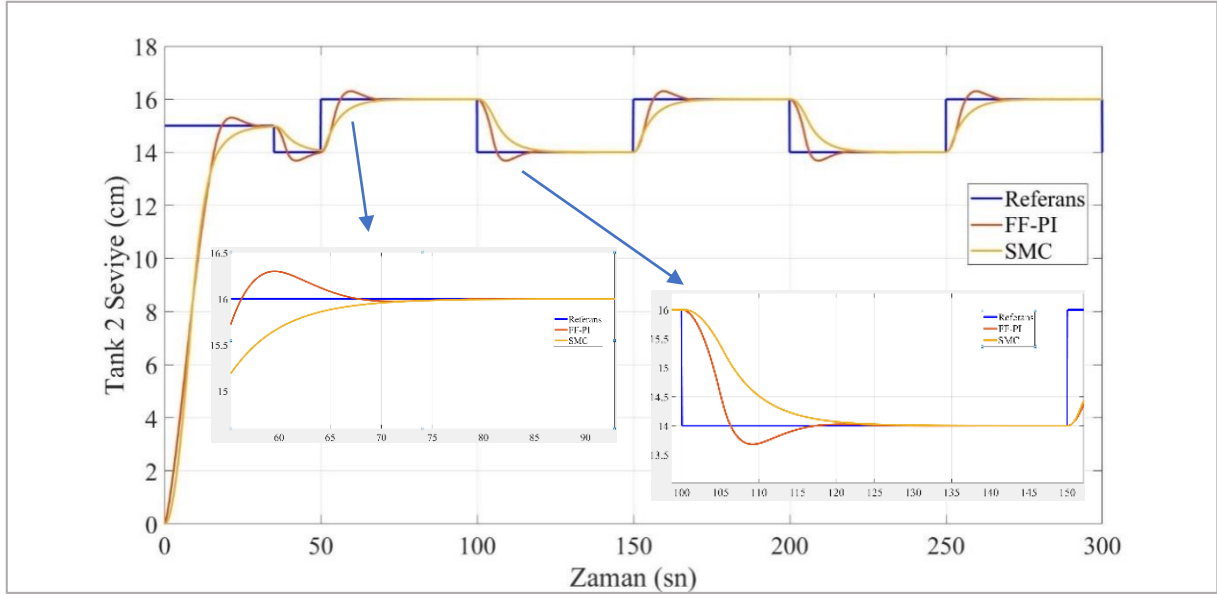
Şekil 7. Tank 1 akışkan seviye sinüzoidal dalga formu



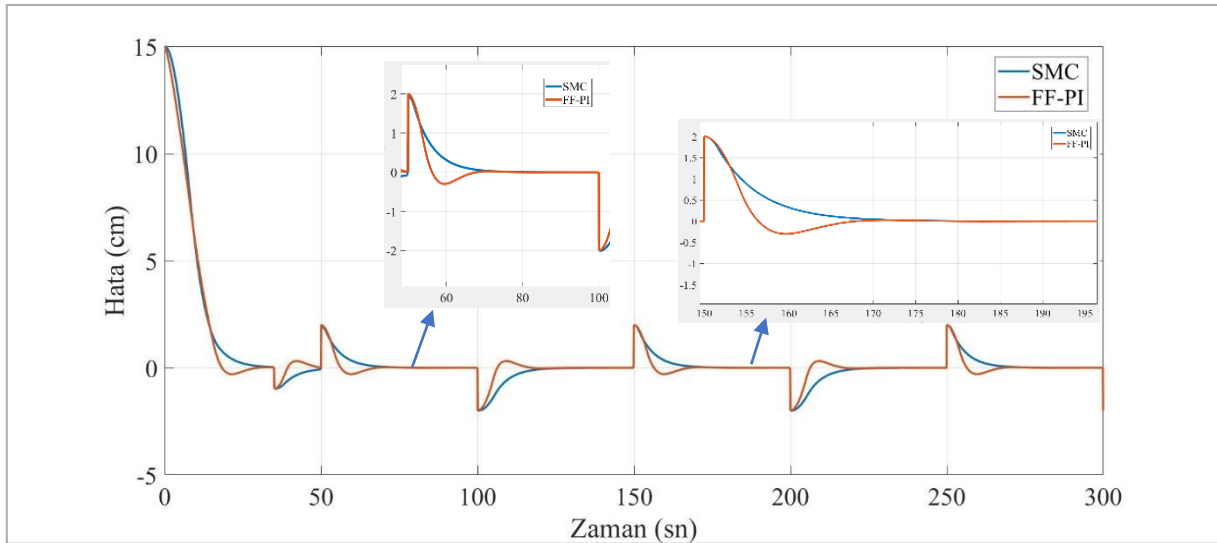
Şekil 8. Tank 1 sinüzoidal dalga formuna göre hata

B. Tank 2 Seviye Kontrol

Tank 2 sistemi, ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü olacak şekilde tasarlanmıştır. Simülasyon ortamında tasarlanan sistemin, referans kare dalga sinyal takibi Şekil 9’da verilmiştir. Tasarlanan sistemin hatası Şekil 10’da gösterilmiştir. İleri beslemeli PI kontrolüne göre kayan kipli kontrolün referans sinyalinin takip ettiği gözlemlenmiştir.

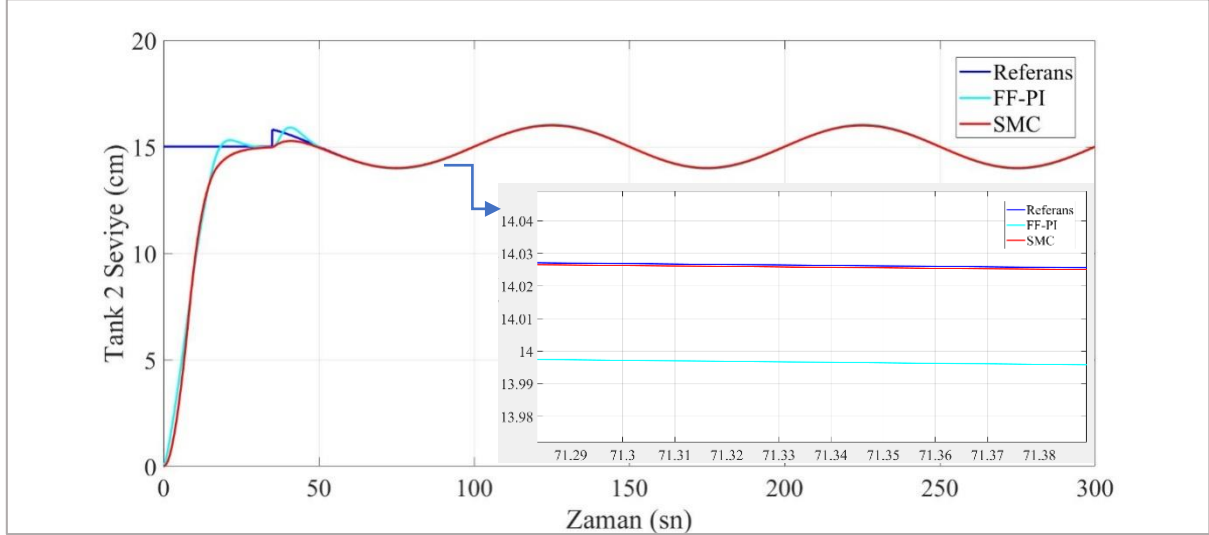


Şekil 9. Tank 2 akışkan seviye kare dalga formu



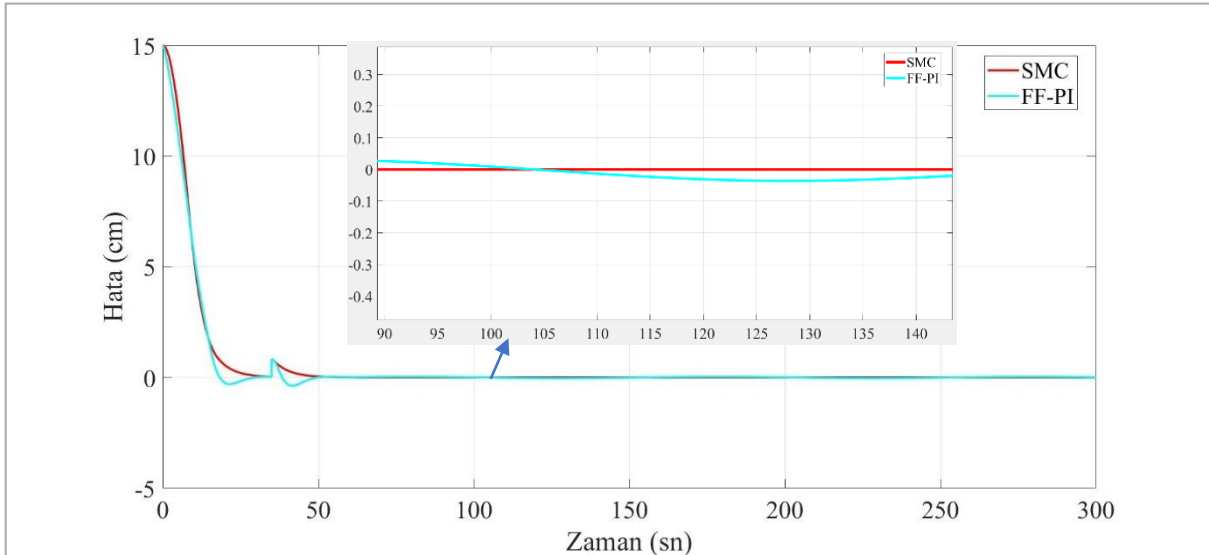
Şekil 10. Tank 2 kare dalga formuna göre hata

Bu makalede eşdeğer kontrol işaretini etkileyen λ_c değeri ve anahtarlama kontrol işaretini etkileyen k_{sc} değeri benzetim sonuçlarından elde edilen veriler neticesinde belirlenerek sistem kontrolü iyileştirilmiştir.

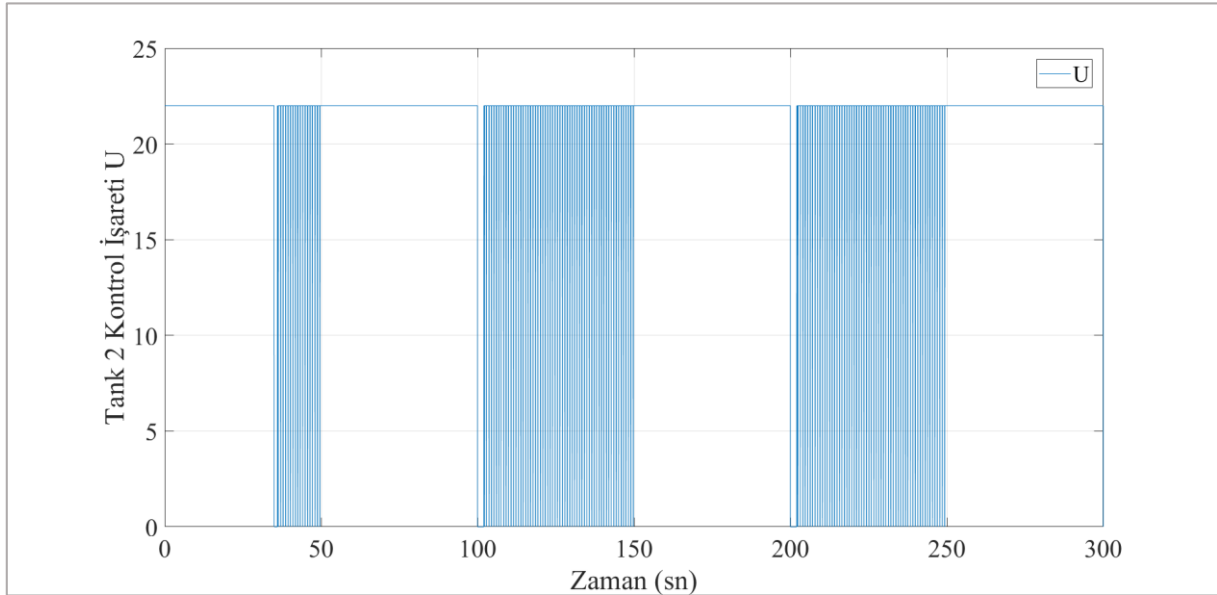


Şekil 11. Tank 2 sinüzoidal dalga formu

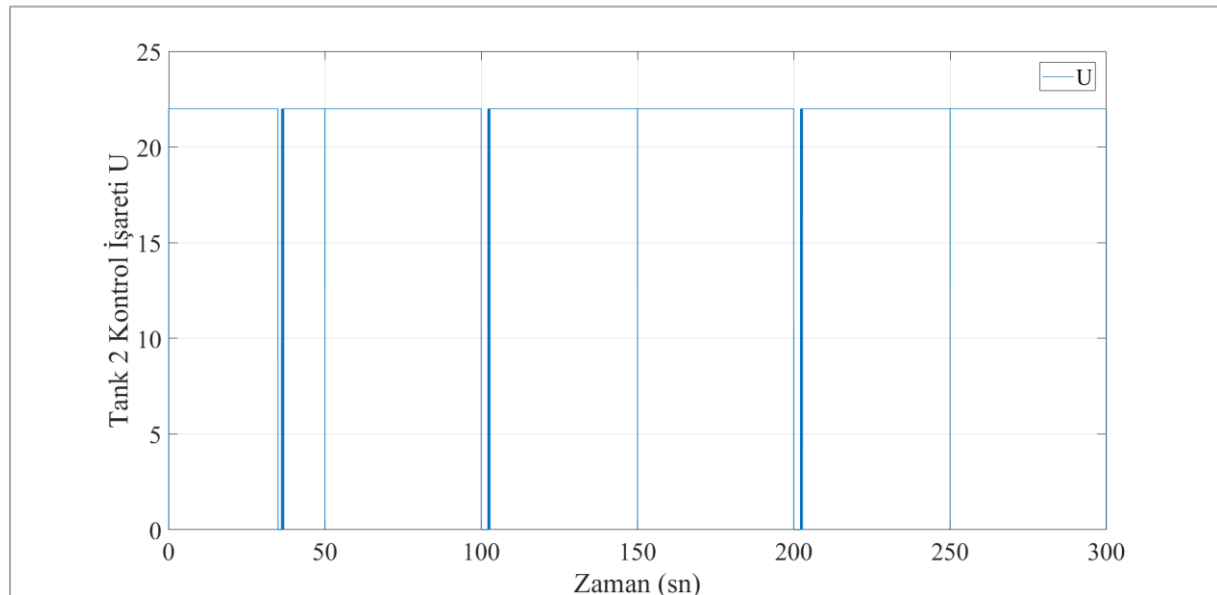
Tank 2 sisteminin sinüzoidal dalga formuna göre talep edilen akışkan seviyesinin referans sinyaline yaklaşımı Şekil 11’de, elde edilen hata Şekil 12’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde sistemin hatasının SMC’de daha az olduğu neticesine varılmıştır.



Şekil 12. Tank 2 sinüzoidal dalga formuna göre hata



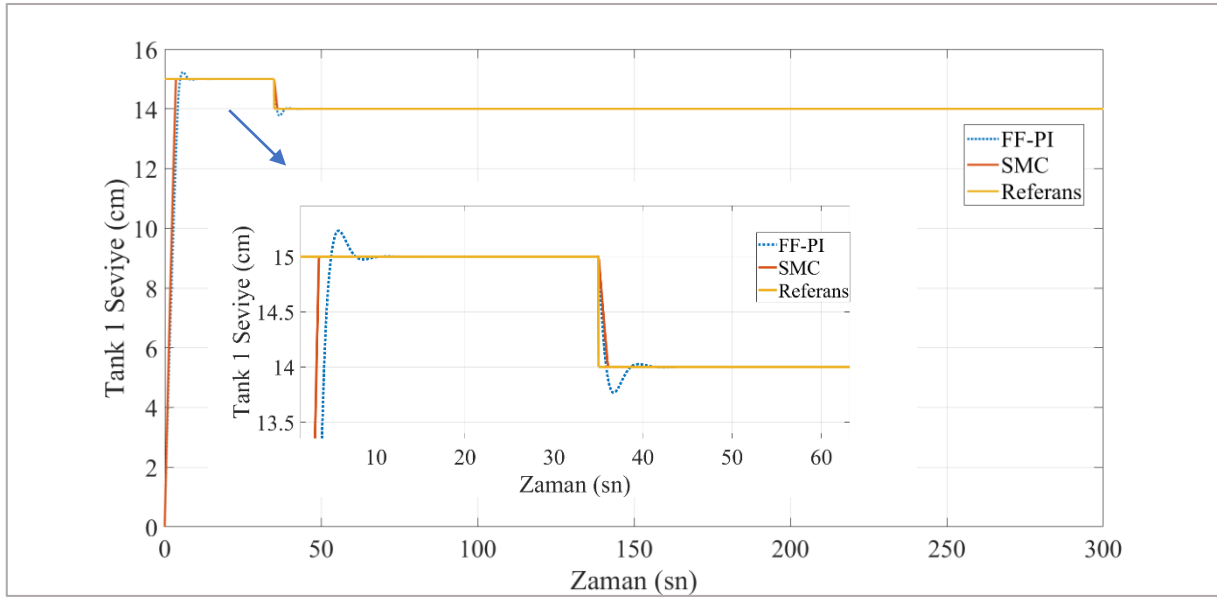
Şekil 14. İkinci dereceden SMC kontrol tekniğinin kullanılmadığı Tank 2 kontrol işareti



Şekil 15. İkinci dereceden SMC kontrol tekniğinin kullanıldığı Tank 2 kontrol işareti

Tablo 2. Tank 1 benzetim sonuçları

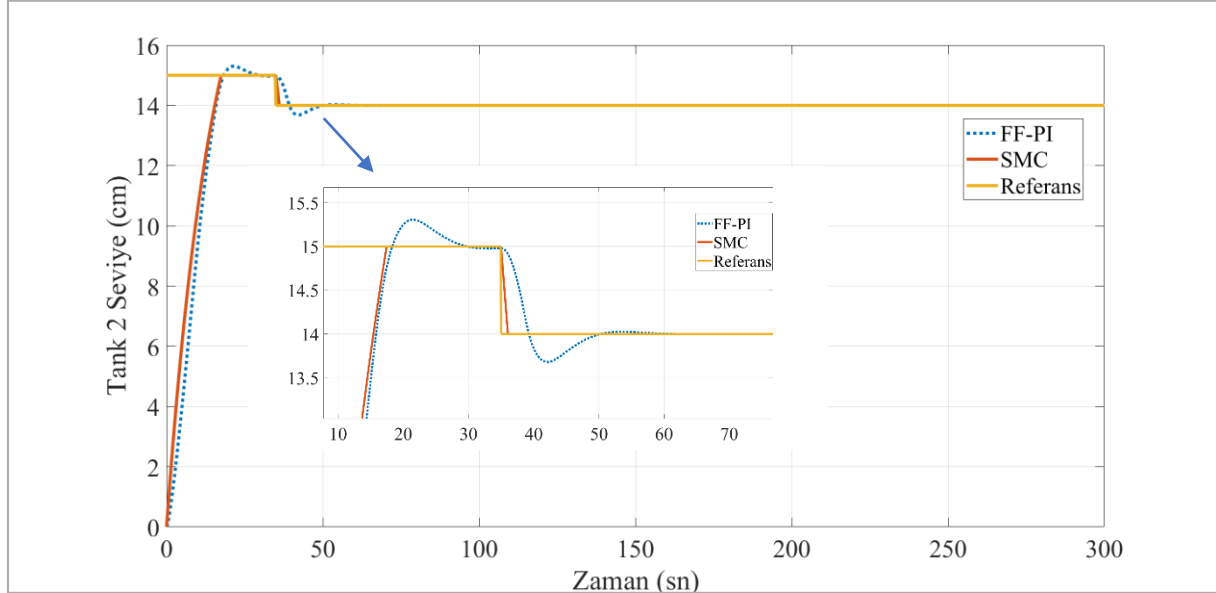
Denetleyici	t_s	M_p	ITAE	IAE	ISE	ITSE
FF-PI	13.145	1.55866	77.54	32.8	301.6	331.7
SMC	3.607	0.00066	53.14	26.49	254.7	232.9



Şekil 16. Tank 1 basamak yanıtı

Tablo 3. Tank 2 benzetim sonuçları

Denetleyici	t_s	M_p	ITAE	IAE	ISE	ITSE
FF-PI	62.45	2.03	930	133.5	1309	5355
SMC	17.63	0.0026	594.1	107.1	969.6	3505



Şekil 17. Tank 2 basamak yanıtı

V.SONUÇLAR

Bu çalışmada, doğrusal olmayan İkili-Tank sistemini kontrol etmek için kayan kipli kontrol (SMC) önerilmiştir. Yüksek frekanslı salınım olarak adlandırılan istenmeyen çadırma etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC tekniği kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarından elde edilen Şekil 15 ile Şekil 16'da verilen Tank 2 sisteminin kontrol işareti incelendiğinde ikinci dereceden kayan kipli yönteminin kullanıldığı sistemde çadırma etkisinin giderildiği gözlemlenmiştir. Kayan kipli kontrolcü ile tasarlanan İkili-Tank sistemi, referans akışkan seviye sinyalini başarılı bir şekilde takip ettiği simülasyon ortamında elde edilen grafikler neticesinde gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçlarından elde edilen Tablo 2 ve Tablo 3'teki yerleşim süresi (t_s), maksimum tepe aşım değeri (M_p) ve mutlak hataların toplamı (IAE), hataların karelerinin toplamı (ISE), ağırlıklı mutlak hataların toplamı (ITAE), ağırlıklı hataların karelerinin toplamı (ITSE) kriterlerine göre kayan kipli kontrolün ileri beslemeli PI denetleyicisine kıyasla sistemi daha iyi kontrol edebildiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Liang, L. (2011, September). The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system. In *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)* (pp. 2894-2897). IEEE.
- [2] Pan, H., Wong, H., Kapila, V., & de Queiroz, M. S. (2005). Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. *Control Engineering Practice*, *13*(1), 27-40.
- [3] Ramli, M. S., Ahmad, M. A., & Ismail, R. M. T. R. (2009, November). Comparison of swarm adaptive neural network control of a coupled tank liquid level system. In *2009 International Conference on Computer Technology and Development* (Vol. 1, pp. 130-135). IEEE.
- [4] Bhuvaneshwari, N. S., Uma, G., & Rangaswamy, T. R. (2009). Adaptive and optimal control of a non-linear process using intelligent controllers. *Applied soft computing*, *9*(1), 182-190.
- [5] Delavari, H., Ranjbar, A. N., Ghaderi, R., & Momani, S. (2010). Fractional order control of a coupled tank. *Nonlinear Dynamics*, *61*(3), 383-397.
- [6] Pan, H., Wong, H., Kapila, V., & de Queiroz, M. S. (2005). Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. *Control Engineering Practice*, *13*(1), 27-40.

- [7] Gouta, H., Said, S. H., Barhoumi, N., & M'Sahli, F. (2015). Observer-based backstepping controller for a state-coupled two-tank system. *IETE Journal of Research*, 61(3), 259-268.
- [8] Abdullah, A., & Zribi, M. (2012). Sensor-fault-tolerant control for a class of linear parameter varying systems with practical examples. *IEEE transactions on industrial Electronics*, 60(11), 5239-5251.
- [9] Mobayen, S. (2016). A novel global sliding mode control based on exponential reaching law for a class of underactuated systems with external disturbances. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 11(2).
- [10] Mobayen, S. (2015). An adaptive fast terminal sliding mode control combined with global sliding mode scheme for tracking control of uncertain nonlinear third-order systems. *Nonlinear Dynamics*, 82(1), 599-610.
- [11] Edwards, C., & Spurgeon, S. K. (1995). Sliding mode stabilization of uncertain systems using only output information. *International Journal of Control*, 62(5), 1129-1144.
- [12] Boiko, I., & Fridman, L. (2005). Analysis of chattering in continuous sliding-mode controllers. *IEEE transactions on automatic control*, 50(9), 1442-1446.
- [13] Bartolini, G., Ferrara, A., & Usai, E. (1998). Chattering avoidance by second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on automatic control*, 43(2), 241-246.
- [14] Fridman, L., & Levant, A. (2002). Higher order sliding modes. *Sliding mode control in engineering*, 11, 53-102.
- [15] Azar, A. T., & Zhu, Q. (Eds.). (2015). *Advances and applications in sliding mode control systems*. Cham: Springer International Publishing, 6-9.
- [16] Tijjani, A. S., Shehu, M. A., Alsabari, A. M., Sambo, Y. A., & Tanko, N. L. (2017). Performance analysis for coupled-tank system liquid level control using MPC, PI and PI-plus-Feedforward Control Scheme. *Journal of Robotics and Automation*, 1(1), 42-53.
- [17] Eker, I. (2010). Second-order sliding mode control with experimental application. *ISA transactions*, 49(3), 394-405.

Araştırma Makalesi -Research Article

Tuğla, Kiremit ve Mermer Atığı Tozları ile Üretilen Jeopolimer Harçların Özellikleri

Properties of Geopolymer Mortars Produced with Brick, Tile and Marble Waste Powders

Mehmet Uğur Toprak¹, Ahmet Ferdi Şenol^{2*}, Nazım Çağatay Demiral³, Cenk Karakurt⁴

Geliş / Received: 07/04/2022

Revize / Revised: 23/06/2022

Kabul / Accepted: 18/08/2022

ÖZ

Bu çalışmada çevre kirliliğini azaltmak amacı ile pişmiş kil (tuğla, kiremit) ve mermer atığı tozları jeopolimer harç üretiminde hammadde olarak kullanılmıştır. Bu amaçla, jeopolimer harçların taze ve sertleşmiş özelliklerine hammadde kullanım oranının ve kür sıcaklığının (60 ve 80 °C) etkileri incelenmiştir. Pişmiş kil tozu (%50) ve mermer tozu (%50) beraber kullanılarak hazırlanan jeopolimer harç, %100 kil tozu ile üretilene göre %40 fazla yayılma göstermiştir. Jeopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları, 28 günlük dayanımlarının yaklaşık %90'ına ulaşmıştır. En yüksek basınç dayanımı (28,50 MPa), %100 pişmiş kil tozu kullanılarak üretilen ve 80 °C de kür uygulanan 28 günlük jeopolimer harçlarda görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Jeopolimer Harç, Tuğla Tozu, Mermer Tozu, Fiziksel Özellik, Mekanik Özellik

ABSTRACT

In this study, baked clay (brick, tile) and marble waste powders were used as raw materials in the production of geopolymer mortar in order to reduce environmental pollution. The effect of the amount of baked clay and marble powder used and the curing temperature (60 and 80 °C) on the work ability, physical, and mechanical properties of geopolymer mortars were investigated. Geopolymer mortar prepared by using baked clay powder (50%) and marble powder (50%) showed 40% more flow than that produced with 100% clay powder. The 7-day compressive strength of geopolymer mortars has reached approximately 90% of their 28-day strength. The highest compressive strength (28.50 MPa) was observed for 28-day geopolymer mortars produced with 100% baked clay powder and cured at 80°C.

Keywords – Geopolymer Mortar, Brick Powder, Marble Powder, Physical Property, Mechanical Property

¹İletişim: mugur.toprak@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5483-2871>)

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6663-3340>)

³İletişim: cağatay.demiral@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5927-7299>)

⁴İletişim: : cenk.karakurt@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4204-5341>)

⁵İletişim: : ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6663-3340>)

⁶İletişim: : mugur.toprak@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5483-2871>)

⁷İletişim: : cağatay.demiral@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5927-7299>)

I. GİRİŞ

Çimento üretiminden kaynaklı CO₂ emisyonu, toplam CO₂ emisyonunun %5-7'si oranındadır [1]. CO₂ emisyonlarını azaltabilmek için harç ve beton üretiminde çimento yerine jeopolimerlerin bağlayıcı olarak kullanılması alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [2]. Jeopolimerler, alkali çözeltiler ile alümina-silikat içeren malzemeler kullanılarak üretilen inorganik polimerlerdir [3]. Jeopolimer üretiminde hammadde olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Yapılan çalışmalara göre, jeopolimer karışımlarına ilave su eklenmesi, işlenebilirliği artırırken basınç dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle, işlenebilirliği artırmak için su eklemek yerine silikat modülünü artırmak önerilmektedir [5]. Düşük sıcaklıklarda kür, jeopolimerin dayanımlarını artırmaktadır [6-8]. Jeopolimerlerin yangına dayanıklılık ve korozyon dirençleri çimento bağlayıcılı malzemelerden daha yüksektir [9]. Reig vd. [10] yaptıkları bir çalışmada, tuğla atıkları ile aktivatör olarak NaOH çözeltisi ve Na₂SiO₃ kullanarak jeopolimer harç numuneleri üretmişlerdir. Daha sonra numunelerin, 65 °C'de 7 gün süre ile kür edilmesi ile 30 MPa basınç dayanımına ulaştığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, çalışmalarındaki SiO₂/Na₂O oranlarını optimize ederek jeopolimerlerin mekanik özelliklerini 50 MPa'ya kadar artırmışlardır. Hwang vd. [11], sırasıyla bileşen ve ince agrega olarak, atık tuğla tozu ve atık seramik kumunu kullanarak jeopolimer harç serileri üretmişlerdir. Karışımlarda, atık tuğla tozlarının yerine hacimce %0-50 aralığında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Çalışma sonunda, hazırladıkları numuneleri ortam sıcaklığında 3, 7, 28 ve 56 gün bekleterek 24-93 MPa aralığında ölçülen basınç dayanımları elde etmişlerdir.

Türkiye'nin maden endüstrisindeki en yüksek ihracat oranına sahip doğal kaynaklarından biri de mermerdir. Mermerlerin, madencilik ve işleme aşamalarında iken yaklaşık %70'i atık olarak ortaya çıkmaktadır [12]. Söz konusu atıklar, genellikle mermer çamuru ile kırık mermer parçalarından oluşarak çevresel sorunlara neden olabilmektedirler. Bu sorunları gidermek amacıyla, araştırmacılar tarafından atık mermer tozlarının beton ve harç üretimlerinde kullanılabilirliği üzerine birçok çalışma [13-15] yapılmıştır. Ancak, atık mermer tozlarının jeopolimer harçların üretiminde bileşen olarak kullanıldığı çalışma sayısı çok azdır. Tekin [16], mermer, traverten ve volkanik tüf atıklarının 200 µm'nin altındaki boyutlarda öğütülerek NaOH çözeltileri ile aktive ederek jeopolimer harç üretmiştir. Jeopolimer harçlarda 1 gün 45°C'de etüv kürünün en uygun olduğunu, 75°C'lik ısı kür sonucunda jeopolimer harçların çatladığını tespit etmiştir. Ayrıca, ıslak kürede jeopolimer harçların basınç dayanımları zamanla azalırken, kuru kürede zamanla arttığı sonucuna ulaşmıştır. Coppola vd. [17] atık mermer çamurunun farklı kürlenme koşulları (kuru, nemli ve ıslak atmosferler) ve karışım çeşitleri (%2,5 ve 5,0 atık cam tozu ilaveli) etkisinde alkali aktivasyona uğrama potansiyelini araştırmışlardır. Üretilen numuneler, 60°C'de 24 saat kür edildikten sonra oda sıcaklığında hava, nem ve suda küre tabii tutulmuşlardır. Kür sonunda, havayla kürlenmenin en uygun kürlenme koşulu olduğunu ve 38 ile 45 MPa arasında basınç dayanımlarına ulaştıklarını bildirmişlerdir. Ayrıca, cam tozu ilavesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği, Ca(OH)₂ ile reaksiyona girebilen ilave silikalar oluşturduğu ve numunelerin suya daldırıldıktan sonra çatlama problemlerini iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Tekin vd. [18] zeolitik tüf ve mermer atığı ile üretilen 5 M (mol) ve 10 M NaOH çözeltili jeopolimer kompozitlere, doğal lif (pamuk ve viskon) takviyesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonunda, 10 M NaOH ile hazırlanan jeopolimerlerin daha yüksek basınç dayanımına (28 günde %53-371), elastisite modülüne, kuru yoğunluğa ve termal iletkenliğe sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Ayrıca, viskon lif takviyeli jeopolimerlerin, pamuk lif takviyeli jeopolimerlerden daha yüksek bir basınç dayanımına, elastisite modülüne ve termal iletkenliğe ulaştığını bildirmişlerdir.

Mermer, yapısında yüksek oranda CaCO₃ içerirken, pişmiş kil ise daha çok alümina, silika ve alkali oksit (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O) içermektedir [19]. Atık mermer tozu ne puzolanik ne de tamamen inert bir malzemedir [20]. Bilecik ilinde bol miktarda bulunan pişmiş kil ve mermer atıkları tozlarının değişen oranlarda karıştırılarak jeopolimer harç üretiminde kullanılması hakkında literatürde kısıtlı çalışma olduğu görülmüştür. Hem çimento kullanımından hem de bu atıklardan kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması amacı ile bu çalışmada çimento bağlayıcılı harçlara alternatif olarak, pişmiş kil ve mermer atıkları kullanılarak üretilen jeopolimer bağlayıcılı harçların işlenebilirlik, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

II.MALZEME VE YÖNTEM

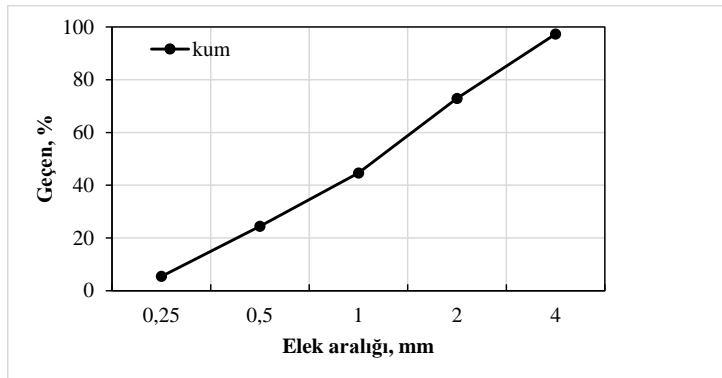
A. Malzeme

Jeopolimer harç üretimlerinde Şekil 1’de verilen harman tuğlası (HT), delikli tuğla (DT), çatı kiremiti (ÇK) ve mermer atığı (M) öğütülüp kullanılmıştır. Bu amaçla malzemeler önce çeneli kırıcıda 4 mm elek altından geçecek şekilde kırılmıştır. Daha sonra bilyalı değirmende yüzey alanını artırmak için 120 dakika boyunca öğütülerek, %95’i 90 µm’lik elekten geçebilecek şekilde toz haline getirilmiştir.



Şekil 1. a) Çatı kiremiti (ÇK), b) Delikli tuğla (DT), c) Harman tuğlası (HT) d) Mermer atığı (M).

Karışımlarda agrega olarak 0-4 mm boyutlarında Osmaneli nehir kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun özgül ağırlığı 2,61 gr/cm³ ve ağırlıkça su emmesi %1,28’dir. Agrega üzerinde yapılan elek analizi sonrası oluşturulan granülometri eğrisi Şekil 2’de sunulmuştur. Çalışmada kullanılan atıklar (ÇK, DT, HT ve M) üzerinde yapılan analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Jeopolimer harç üretimlerinde Detsan Tic.Ltd.Şti.’den temin edilen NaOH (yoğunluğu 2,1 gr/cm³, pH değeri 14 ve %98 saflıktadır) ve cam suyu olarak da bilinen Na₂SiO₃ (yoğunluğu 1,38 gr/cm³, %8,9 Na₂O, %28,7 SiO₂ ve %64,8 H₂O) beraber kullanılmıştır.



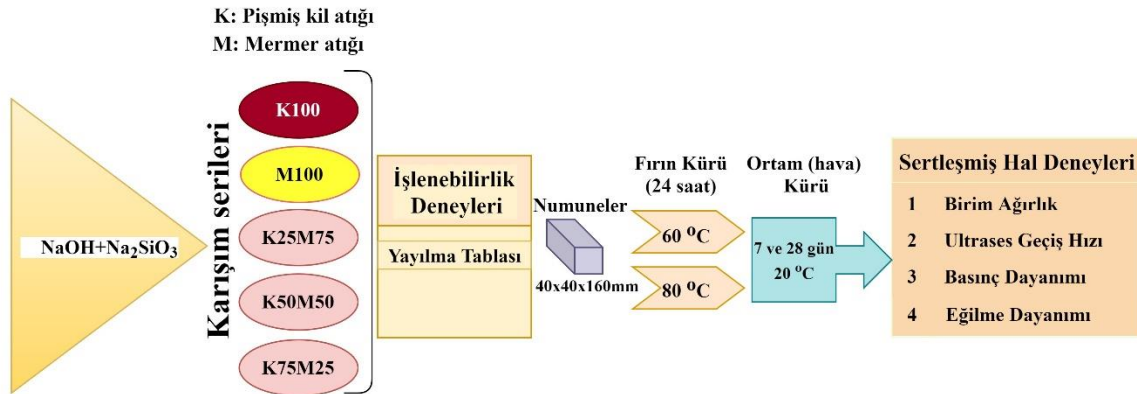
Şekil 2. Agrega granülometri eğrisi.

Tablo 1. ÇK, DT, HT ve M'nin kimyasal kompozisyonu.

Oksitler, %	ÇK	DT	HT	M
SiO ₂	44,7	48,9	44,6	1,2
Al ₂ O ₃	14,7	17,2	17,2	-
Fe ₂ O ₃	12,2	7,1	9,8	1,2
CaO	8,8	4,7	7,5	72,1
MgO	5,2	6,5	6,8	0,4
SO ₃	0,3	3,5	0,3	-
K ₂ O	1,6	3,2	3,2	-
TiO ₂	1,9	0,8	0,8	-
P ₂ O ₅	1,3	1,2	1,1	-
MnO	0,2	0,1	0,1	-
Kızdırma Kaybı	9,1	6,8	8,6	25,1
Özgül Ağırlık	2,9	2,9	2,8	2,3

B. Yöntem

Şekil 3'te verilen akış şemasına göre değişen oranlarda pişmiş kil ve atık mermer tozları, agrega ve hazırlanan alkali çözelti karıştırılarak jeopolimer harçlar üretilmiştir ve özellikleri belirlenmiştir. Bütün serilerde ağırlıkça agrega/atık oranı 1,5, Na₂SiO₃/10 M NaOH oranı 2,0 olmak üzere sabittir. 10 M NaOH çözeltisi oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiş ve kullanılmadan önce manyetik karıştırıcıda 5 dk karıştırılmıştır. Karıştırma işleminde ilk aşamada atık tozlar ve kum, harç mikserinde 1,5 dk süre ile düşük hızda (62,5 devir/dakika) karıştırılmış, arkasından miksera 10 M NaOH ilave edilmiş, aynı hızda 1,5 dk daha karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada, Na₂SiO₃ karışıma eklenip 1,5 dk daha düşük hızda karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son olarak mikser yüksek hızda (125 devir/dakika) 1,5dk daha çalıştırılmıştır. Seri kodlarındaki K indisi; ÇK, DT ve HT atıkları karışımını (pişmiş kil atıkları karışımını), sayılar ise malzemenin toplam atık içerisinde kütlece yüzdesini ifade etmektedir. Örnek olarak, K25M75: %25 pişmiş kil atığı (K) ve %75 atık mermer tozu (M) içeren jeopolimer harç karışımını belirtmektedir. Jeopolimer harçların karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Çalışmanın akış şeması.

Tablo 2. Jeopolimer harçların karışım oranları.

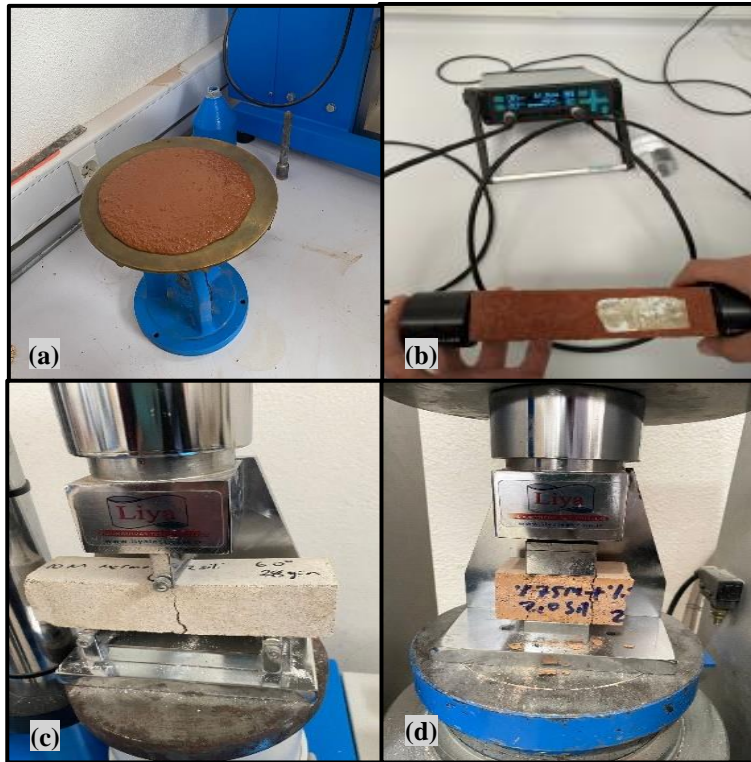
Seriler	NaOH (mol)	Na ₂ SiO ₃ (g)	ÇK (g)	DT (g)	HT (g)	M (g)	Kum (g)	S/B
K100	10	320	333,3	333,3	333,3	0	1500	0,4
K75M25	10	320	250	250	250	250	1500	0,4
K50M50	10	320	166,7	166,7	166,7	500	1500	0,4
K25M75	10	320	83,3	83,3	83,3	750	1500	0,4
M100	10	320	0	0	0	1000	1500	0,4

Hazırlanan karışımlar, TS EN 12390-1 [21]'e göre 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Üretilen jeopolimer harçlara, 60 ve 80 °C'lik etüvde 1 gün süre ile kür işlemi uygulanmıştır (Şekil 4). Bir günün sonunda kalıplarından çıkartılan jeopolimer harçlara deney gününe (7 veya 28 gün) kadar ortam koşullarında (20±2 °C sıcaklık) hava kürü uygulanmıştır.



Şekil 4. Üretilen jeopolimer harçlar ve etüvde kür işlemleri.

Jeopolimer harç serilerine, TS EN 12350-5 [22] standartlarında yayılma tablası, sertleşmiş jeopolimer harç numunelerine TS EN 772-4 [23]'e göre birim hacim ağırlık, TS EN 12504-4 [24]'e göre ultrases geçiş hızı ve TS EN 196-1 [25]'e göre mekanik özellik deneyleri uygulanmıştır (Şekil 5). Birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve eğilme dayanımı testlerinde her bir karışım serisi için üç adet numunenin ortalama değerleri alınırken, basınç dayanım testinde altı adet numunenin değerlerinin ortalaması alınmıştır.

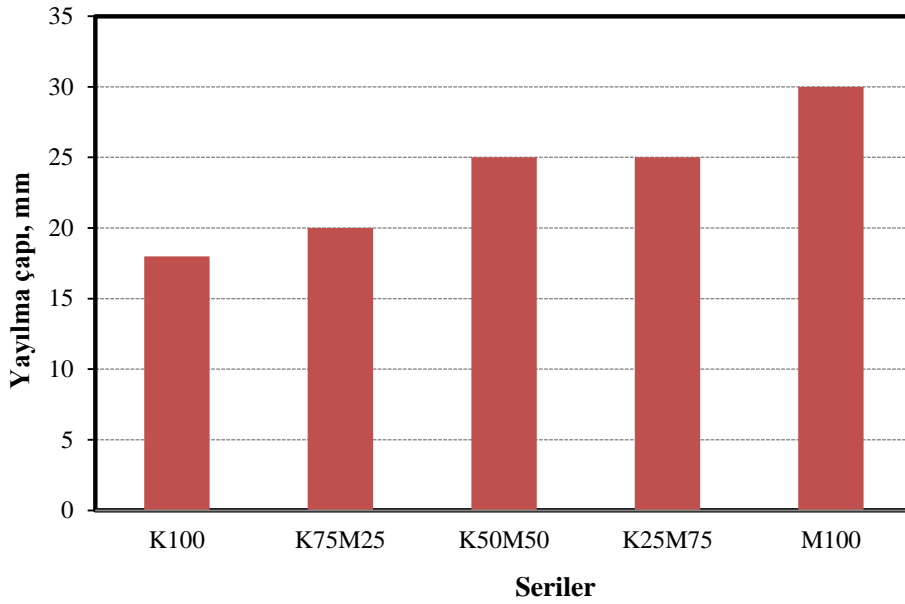


Şekil 5. Deneyler: a) Yayılma tablası, b) Ultrases geçiş hızı ölçümü, c) Eğilme dayanımı, d) Basınç dayanımı.

III. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

A. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Yayılma tablası deneyi ile jeopolimer harç karışımlarının işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen jeopolimer harç serilerinin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 6'da verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, karışımda "M" ikamesi arttıkça yayılma değerleri artmış, yani işlenebilirlik özellikleri iyileşmiştir. Bu sonuç, iki malzemenin incelikleri arasındaki farka bağlanabilir. Özellikle %100 mermer atığı tozu ile üretilen M100 serisi, en büyük yayılma çapı olan 30 cm'ye ulaşmıştır. M100 serisi K100 serisine göre yaklaşık %67 daha fazla yayılma özelliği göstermiştir. Mermer atığı tozunun özgül ağırlığı ($2,3 \text{ g/cm}^3$), pişmiş kil atıklarından ($2,8-2,9 \text{ g/cm}^3$ arası) daha düşüktür. Yamanel vd. [26]'nin de benzer bir çalışmada değerlendirdikleri gibi, karışımdaki malzemelerin ağırlıkça yer değiştirmesi ile aynı ağırlıkta pişmiş kil atığı yerine kullanılan mermer atığı tozu, karışımlarda daha fazla hacim kaplamakta ve toplam hamur hacminin artması ile daha yüksek işlenebilirlik sağlayabilmektedir.

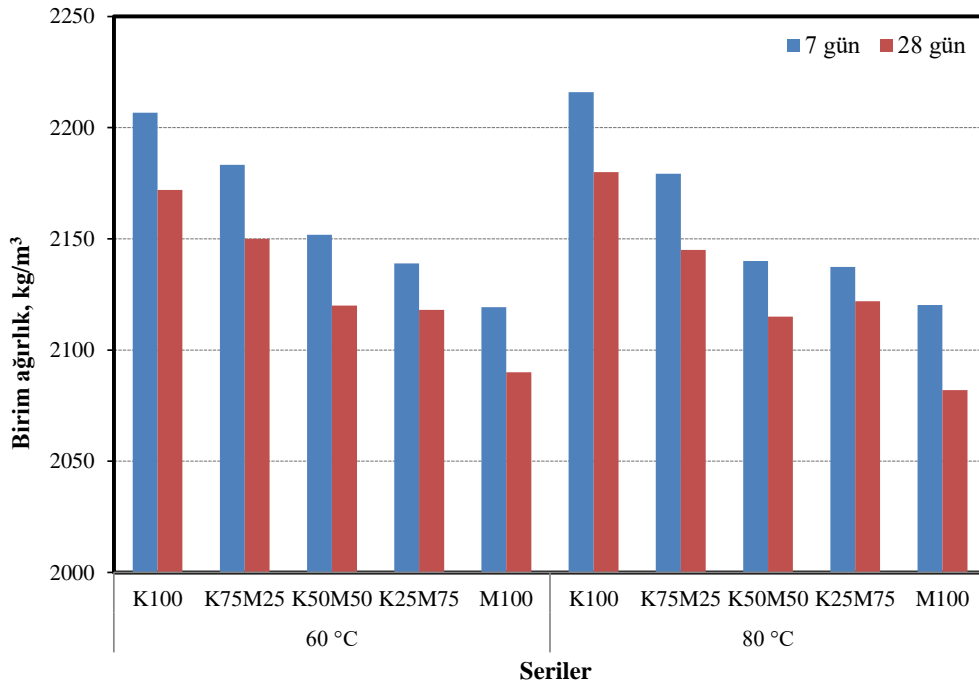


Şekil 6. Yayıma çaplarının jeopolimer harç serilerine göre değişimi.

Jeopolimerizasyon sırasında, su reaksiyona katılmadığından, jeopolimer harç karışım hesaplarında su/bağlayıcı oranının düşmesi dayanım açısından avantajlı bir durumdur. Bu durum, işlenebilirlik özelliğini yükselten atık mermer tozlu serilerin, karışımdaki su/bağlayıcı oranının belirli bir orana kadar azaltılabilmesini sağlayabilir.

B. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

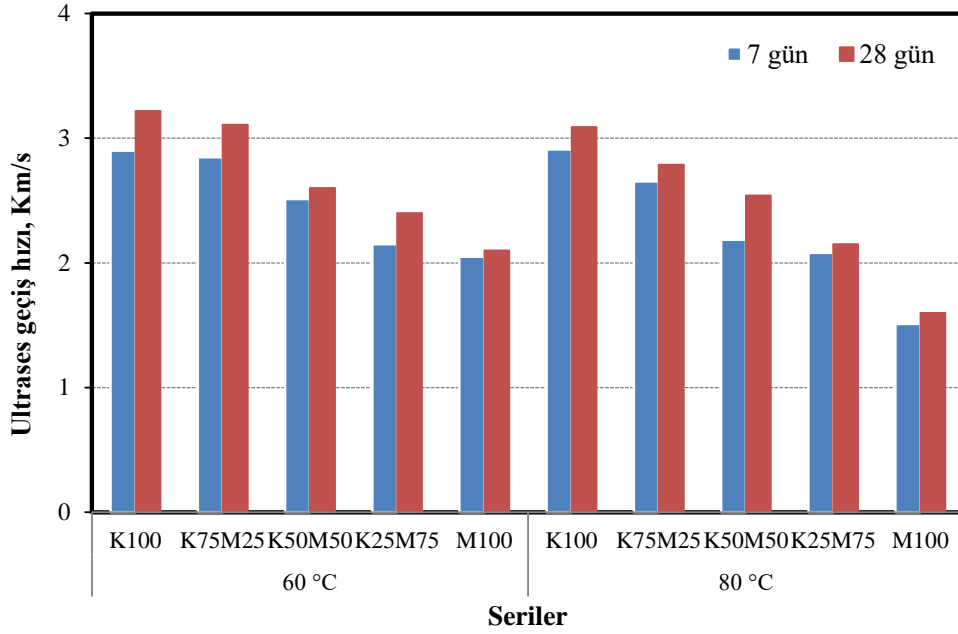
Üretilen jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük birim ağırlık sonuçlarının kür sıcaklıklarına ve serilere göre değişimi Şekil 7’de görülmektedir. ÇK, DT, HT ile M’nin özgül ağırlıkları arasındaki fark nedeniyle, karışımlarda M ikamesi arttıkça birim hacim ağırlıkları; 60°C’lik kür sonrasındaki numunelerin 7’nci gününde %3,98, 28’inci günde ise %3,77 oranına kadar azalmıştır. Yine aynı şekilde karışımlardaki M ikamesi arttıkça 80 °C’lik kür uygulanan numunelerin birim ağırlıkları, 7’nci gününde %4,33 ve 28’inci günde ise %4,49 oranına kadar azalmıştır. Kür sıcaklığı arttıkça karışım serilerinde birim ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Bu durum hem yüksek kür sıcaklığı (80 °C) sonrasındaki termal çatlak oluşumuna hem de gözle görülebilen gözeneklilik artışına bağlanabilir.



Şekil 7. Jeopolimer harçların birim ağırlıklarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

C. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

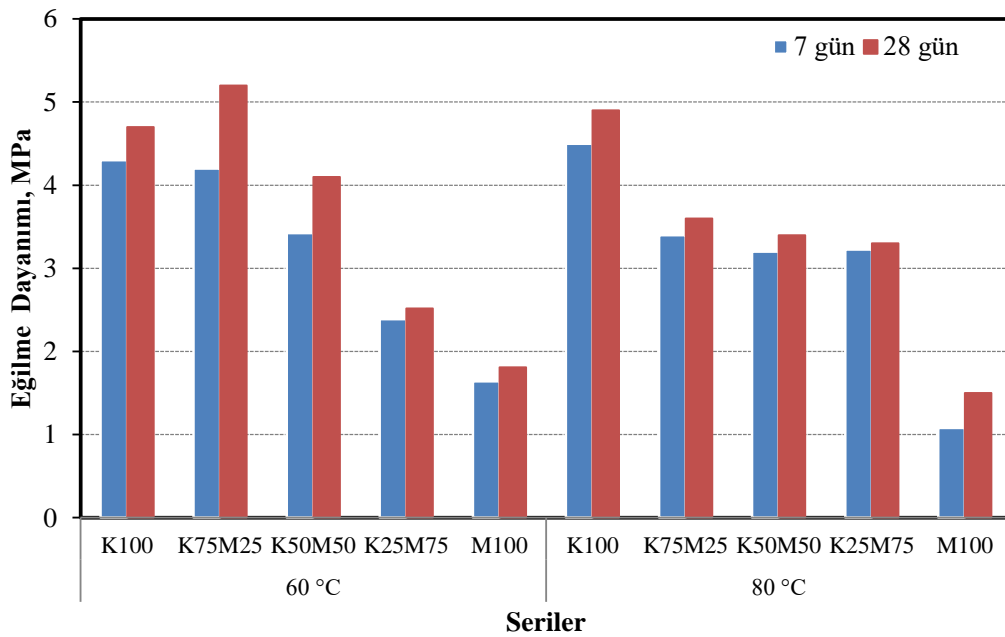
Ultrases geçiş hızı ölçümleri ile jeopolimer numunelerinin sürekliliği, homojenliği, muhtemel çatlak ve hasarları gibi birçok değişken değerlendirilebilir. Jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı ölçüm değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, karışım serilerinde M ikamesi arttıkça ultrases geçiş hızları da genel olarak düşmektedir. Fakat 60 °C sıcaklıkta kürlenmiş serilerden, K100 serisi ile K75M25 serisinin ultrases geçiş hızı değerleri arasında önemli bir fark oluşmadığı (7 günde %1,7 ve 28 günde %3,4) tespit edilmiştir. Bu durum, %25 M ikamesinin filler malzeme olarak görev yapıp boşlukları daha iyi doldurmasına, matriste daha sürekli ve homojen bir yapı oluşturmasına bağlanabilir. Araştırmacılar [27, 28], filler malzemelerin harçlarda boşlukları doldurduğu ve bu sebeple ultrases geçiş hızı değerlerini artırdığını belirlemişlerdir. Jeopolimer karışımlarda, %25’ten daha yüksek M ikamesinin kullanıldığı serilerde, ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Önce 60 °C sıcaklıkta, daha sonra 7 ve 28 gün boyunca ortam şartlarında (havada) kürlenmiş M100 serisinin ultrases geçiş hızı değerleri, K100 serisine göre sırasıyla; %29 ve %35 oranında azalmıştır. Yine aynı şekilde, önce 80 °C sıcaklıkta daha sonra 7 ve 28 gün boyunca ortam şartlarında (havada) kürlenmiş M100 serisinin ultrases geçiş hızı değerleri ise K100 serisine göre her iki kür süresinde %48 oranında azalmıştır. Bunun sebebi, matriste alümina-silikat kaynağı sağlayan ve Si-O-Al bağlarını oluşturan pişmiş kil miktarının azalmasına bağlanabilir [29]. Sistemde yeterli miktarda alümina-silikat olmaması jeopolimerizasyon gelişimini azaltarak süreksizlik oluşturmaktadır. Bunun da ultrases geçiş hızı değerlerini düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Jeopolimer harçların kür süresi arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinde artış görülmektedir. Ultrases geçiş hızı değerlerine genel olarak bakıldığında, 60 °C sıcaklıkta kürlenmiş 28 günlük K100 karışımının ultrases geçiş hızı, en yüksek değere sahiptir. Kür sıcaklığının ultrases geçiş hızı değerlerine etkisi incelendiğinde, 60 °C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin geçiş hızı değerleri, tüm karışımlarda ve kür sürelerinde daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, priz sırasında daha yüksek kür sıcaklığına maruz kalan karışımların su kaybına bağlı olarak matriste çatlakların artmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 8. Jeopolimer harçların ultra ses geçiş hızlarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

D. Eğilme Dayanımı Denei Sonuçları

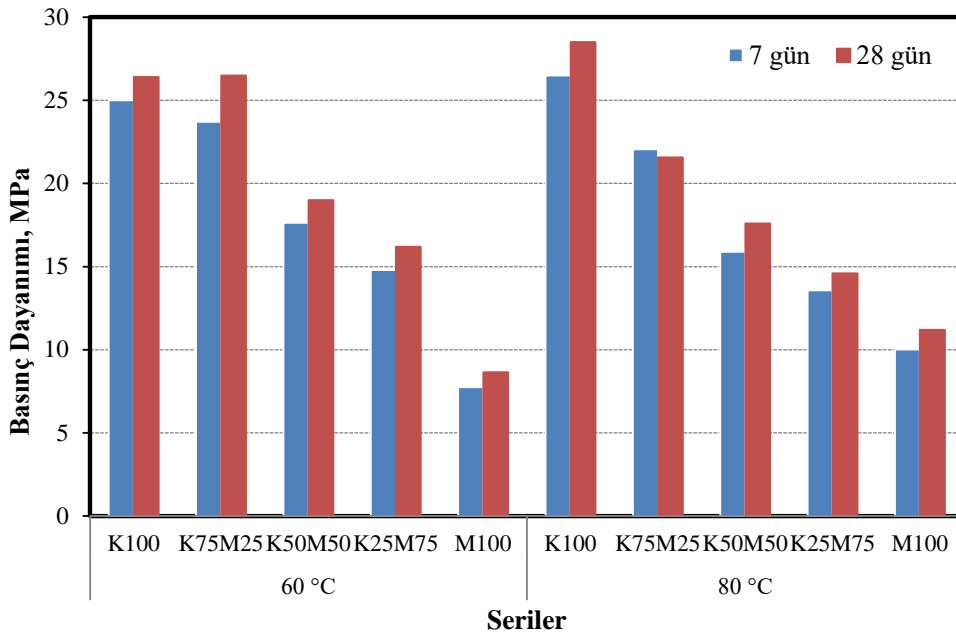
Laboratuvar ortamında 7 ve 28'inci günlere kadar ortam (hava) kürüne tabi tutulan numunelere, deney gününde üç noktalı eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Jeopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 9'da sunulmuştur. Eğilme dayanımları, karışımlardaki M ikamesi arttıkça genel olarak düşüş göstermiştir. En yüksek eğilme dayanımları; 60 °C'de kürlenene 28 günlük K75M25 serisi ve 80 °C'de kürlenene 28 günlük K100 serileridir. Karışımda M ikamesi arttıkça, eğilme dayanımları da 60 °C'lik kür yapılan serilerde ilk 7 günde %62 (M100), 28'inci günde %61 (M100) oranına kadar azalmıştır. Aynı şekilde 80 °C'lik kür sonrasındaki serilerin eğilme dayanımlarında da ilk 7 günde %76 (M100), 28'inci günde ise %69 (M100) oranına kadar kayıp tespit edilmiştir.



Şekil 9. Jeopolimer harçların eğilme dayanımlarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

E. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 10'da görülmektedir. Şekil 10 incelendiğinde, 28 günlük kür sonrasında en yüksek basınç dayanımı (28,50 MPa) 80 °C'de kürlenen K100 serisinden, en düşük basınç dayanımı (8,65 MPa) ise 60 °C'de kürlenen M100 serisinden elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, her iki kür sıcaklığında da karışımlarda M'nin %25'ten daha fazla ikame edilmesi ile basınç dayanımları düşmüştür. Kür sıcaklığı 60 °C uygulanan serilerde; K yerine M'nin %100 oranına kadar ikame edilmesi ile 28'inci gündeki basınç dayanımları %67,2 oranında, 80 °C kür uygulanan serilerde ise %60,7 oranına kadar azalmıştır. Düşük sıcaklıkta (60 °C) kürlenen K100 ve K75M25 serilerinin basınç dayanımları arasında ihmal edilebilir bir fark (28 gün kür süresinde %0,3) oluşmuştur. Bu durum, literatürdeki çalışmalara [18, 30] benzer şekilde, karışımdaki M'nin %25 oranında ikamesi ile jeopolimerizasyonu sağlayacak K miktarının yeterli miktarda jel yapısının oluşması sağlanmıştır. Karışımda %25 oranında kullanılan M'nin, matrisin boşluklu yapısını doldurarak basınç dayanımına katkıda bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 10. Jeopolimer harçların basınç dayanımlarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

M ikamesi işlenebilirliği artırdığından, karışımın daha düşük su/bağlayıcı oranlarında üretilebilmesi mümkündür. Ancak, %25'ten daha yüksek ikamelerde üretilen K50M50, K25M75 ve M100 karışımlarında her iki kür sıcaklığında da basınç dayanımlarında azalma belirlenmiştir. Bunun sebebi ortamda jeopolimerizasyonu sağlayacak yeterli alümina-silikatların bulunmamasına bağlanabilir. Buna ilave olarak, inert yapıdaki M'nin matrisin homojenliğini bozduğu ve basınç dayanımlarında düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Isıl kürün basınç dayanımlarına etkisi incelendiğinde ise K100 ve M100 karışımları dışındaki bütün karışımlarda kür sıcaklığının yükselmesi basınç dayanımlarını düşürmüştür. Sıcaklık arttıkça basınç dayanımları 7'nci günde %10 (K50M50), 28'inci günde %19 (K75M25) oranında azalmıştır. Yüksek kür sıcaklığı etkisinde kalan K100 serisinin basınç dayanımının artması, polikondansasyon ve sert yapı oluşumunu sağlayan pişmiş kil atığındaki amorf fazlarının başlangıçta çözünme hızının artmasına bağlıdır [31,32]. Diğer serilerde kür sıcaklığı yükseldikçe basınç dayanımlarının düşmesi rötre ve dehidrasyondan kaynaklanan mikro ölçekteki çatlama ve jeopolimerik jel rötresi ile ilişkilidir [33].

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

DeneySEL çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlara göre yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

- Yayılma tablası deneyi sonuçlarından, karışımlardaki M ikamesinin artması ile jeopolimer serilerinin işlenebilirlik özelliklerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Birim hacim ağırlık deneyi sonuçlarına göre karışımlardaki M ikamesi ve kür sıcaklığı arttıkça, jeopolimer serilerinin birim hacim ağırlıklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum; M'nin özgül ağırlığının pişmiş kil atığına göre daha düşük olmasına ve 24 saatlik sıcak kürleme ile numuneler üzerinde oluşan termal çatlak artışından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Karışım serilerinde M ikamesi arttıkça, ultrases geçiş hızları da basınç dayanımlarına benzer şekilde azalmıştır. Kür sıcaklığının ultrases geçiş hızı değerlerine etkisi incelendiğinde ise 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri, 80 °C'de kürlenmiş serilerden daha yüksek olmuştur. Bu durum, yüksek kür sıcaklığı etkisinde kalan karışımların su kaybı ile birlikte matriste çatlak oluşumunun artmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, tüm serilerde kür süresi (28 günde) arttıkça ultrases geçiş hızı değerleri de artmış, böylece jeopolimer harç numunelerinin daha boşluksuz hale geldiği tespit edilmiştir.
- Eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde, M'nin düşük Si ve Al içeriği nedeniyle yetersiz jeopolimerizasyon oluşturduğu, bu sebeple karışımlarda %25'ten daha yüksek oranda M ikame edilmesi ile eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Isıl kürün basınç dayanımlarına etkisi incelendiğinde ise; genel olarak kür sıcaklığının yükselmesi, basınç dayanımlarını düşürmüştür. Karışımlarda %100 oranında K kullanımı ile belirli dayanımlarda (25,0-28,50 MPa) jeopolimer harçların üretilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte, K'ye %25 oranında M ikame edilmesi, karışımın işlenebilirliğini iyileştirmiş ve 60 °C kür sonrasındaki mekanik özelliklerinde ihmal edilebilir bir fark oluşturduğu görülmüştür.
- Genel olarak, jeopolimer harç üretiminde %25 oranına kadar M ilavesi, %100 K ile üretilen harçların özelliklerini önemli ölçüde değiştirmemektedir. Ancak M'nin karışımdaki miktarı %25 üzeri oranlarda kullanıldığında, K ile üretilen jeopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmektedir.
- Sonuç olarak, K ile üretilen jeopolimer harçlara, optimum ağırlıkça %25'e varan oranlarda M ikamesinin yapılabileceği değerlendirilmektedir. Bu miktarlardan daha yüksek M ikame edilmesi, harçların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Jeopolimer harç üretimlerinde K ve M'nin kullanılması ile hem atık malzemeler değerlendirilebilecek hem de çimento esaslı kompozitlere alternatif, sürdürülebilir ve ekonomik harç üretimi gerçekleştirilebilecektir.

Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda, jeopolimer harçlarda oluşan çatlak gelişimini azaltıcı araştırmalar ile farklı kür sıcaklık ve süreleri üzerine üretim süreçlerini iyileştirici çalışmalar yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Yapılan bu çalışma, 2021-02.BŞEÜ.03-02 numaralı proje kapsamında yapılmış olup yazarlar desteğinden ötürü Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien, A. (2010) Environmental impact of cement production: Detail of the processes and cement plant variability evaluation. *J. Clean. Prod.*, 18, 478-485.
- [2] Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., Chen, F., & Gao, L. (2017). Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020. *Renewable and sustainable energy reviews*, 74, 522-537.
- [3] Zawrah, M. F., Sadek, H. E. H., Ngida, R. E., Sawan, S. A., & El-Kheshen, A. A. (2022). Effect of low-rate firing on physico-mechanical properties of unfoamed and foamed geopolymers prepared from waste clays. *Ceramics International*, 48(8), 11330-11337.
- [4] Podolsky, Z., Liu, J., Dinh, H., Doh, J. H., Guerrieri, M., & Fragomeni, S. (2021). State of the art on the application of waste materials in geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00637.
- [5] Khalil, M. G., Elgabbas, F., El-Feky, M. S., & El-Shafie, H. (2020). Performance of geopolymer mortar cured under ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 242, 118090.
- [6] Poloju, K. K., & Srinivasu, K. (2021). Impact of GGBS and strength ratio on mechanical properties of geopolymer concrete under ambient curing and oven curing. *Materials Today: Proceedings*, 42, 962-968.
- [7] Hardjito, D. (2005). Studies of fly ash-based geopolymer concrete (Doctoral dissertation, Curtin University).
- [8] Hu, W., Nie, Q., Huang, B., Shu, X., & He, Q. (2018). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers derived from red mud and fly ashes. *Journal of Cleaner Production*, 186, 799-806.
- [9] Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283-314.
- [10] Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R., & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106.
- [11] Hwang, C. L., Yehualaw, M. D., Vo, D. H., Huynh, T. P., & Largo, A. (2019). Performance evaluation of alkali activated mortar containing high volume of waste brick powder blended with ground granulated blast furnace slag cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 223, 657-667.
- [12] Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171.
- [13] Li, L. G., Huang, Z. H., Tan, Y. P., Kwan, A. K. H., & Chen, H. Y. (2019). Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar. *Journal of Cleaner Production*, 210, 55-65.
- [14] Gencil, O., Özel, C., Köksal, F., Erdoğan, E., Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2012). Atık mermer ile yapılan beton parke taşlarının özellikleri. *Temiz üretim dergisi*, 21 (1), 62-70.
- [15] Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and building materials*, 50, 28-41.
- [16] Tekin, I. (2016). Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*, 127, 607-617.
- [17] Coppola, B., Palmero, P., Montanaro, L., & Tulliani, J. M. (2020). Alkali-activation of marble sludge: Influence of curing conditions and waste glass addition. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(11), 3776-3787.
- [18] Tekin, İ., Gençel, O., Gholampour, A., Oren, O. H., Köksal, F., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Recycling zeolitic tuff and marble waste in the production of eco-friendly geopolymer concretes. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122298.
- [19] Ahmad, M., & Rashid, K. (2022). Novel approach to synthesize clay-based geopolymer brick: Optimizing molding pressure and precursors' proportioning. *Construction and Building Materials*, 322, 126472.
- [20] Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., & Wu, Y. F. (2017). Efficiency of waste marble powder in controlling alkali-silica reaction of concrete: A sustainable approach. *Construction and Building Materials*, 154, 590-599.
- [21] TS EN 12390-1. (2021). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [22] TS EN 12350-5. (2019). Beton – Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [23] TS EN 772-4. (2000). Kâğır Birimler, deney metotları- Bölüm 4: Tabii taş kâğır birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- [24] TS EN 12504-4. (2021). Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [25] TS EN 196-1.(2016). Çimento test yöntemleri-Bölüm 1: Dayanımın belirlenmesi,TürkStandartlarıEnstitüsü, Ankara.
- [26] Yamanel, K., Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İ. İ., Karahan, O., & Duran, C. (2019). Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 18(2), 290-300.
- [27] Binici, H. & O. Aksogan (2018). Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. *Journal of Building Engineering*. 19, 109-121.
- [28] Tammam, Y., Uysal, M., & Canpolat, O. (2022). Effects of alternative ecological fillers on the mechanical, durability, and microstructure of fly ash-based geopolymer mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(12), 5877-5900.
- [29] Thakur, A. K., Pappu, A., & Thakur, V. K. (2019). Synthesis and characterization of new class of geopolymer hybrid composite materials from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 230, 11-20.
- [30] Kabirova, A., Uysal, M., Hüsem, M., Aygörmez, Y., Dehghanpour, H., Pul, S., & Canpolat, O. (2022). Physical and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer mortars containing various waste powders. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-20.
- [31] Rovnanik, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and building materials*. 24(7), 1176-1183.
- [32] Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., & Ashour, A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124358.
- [33] Mo, B. H., Zhu, H., Cui, X. M., He, Y., & Gong, S. Y. (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied clay science*, 99, 144-148.

Araştırma Makalesi- Research Article

Traveling Wave Solutions of the Oskolkov Equation Arising in Incompressible Viscoelastic Kelvin–Voigt Fluid Sıkıştırılmaz Visko Elastik Kelvin-Voigt Sıvısında Ortaya Çıkan Oskolkov Denkleminin Gezici Dalga Çözümleri

Hülya Durur^{1*}

Geliş / Received: 22/05/2022

Revize / Revised: 18/10/2022

Kabul / Accepted: 18/10/2022

ABSTRACT

In this manuscript, exact solutions of the Oskolkov equation, which describes the dynamics of incompressible viscoelastic Kelvin-Voigt fluid, are presented. The $(1 / G')$ -expansion method is used to search for these solutions. The dynamics of the obtained exact solutions are analyzed with the help of appropriate parameters and presented with graphics. The applied method is efficient and reliable to search for fundamental nonlinear waves that enrich the various dynamical models seen in engineering fields. It is concluded that the analytical method used in the study of the Oskolkov equation is reliable, valid and useful tool for created traveling wave solutions.

Keywords- $(1 / G')$ -Expansion Method, Oskolkov Equation, Traveling Wave Solution, Exact Solution

ÖZ

Bu çalışmada, sıkıştırılmaz visko-elastik Kelvin-Voigt akışkanının dinamiklerini tanımlayan Oskolkov denkleminin tam çözümleri sunulmuştur. Bu çözümleri aramak için $(1 / G')$ -açılım yöntemi kullanılmaktadır. Elde edilen tam çözümlerinin dinamikleri uygun parametreler yardımıyla analiz edilmiş ve grafiklerle sunulmuştur. Uygulanan yöntem, mühendislik alanlarında görülen çeşitli dinamik modelleri zenginleştiren temel doğrusal olmayan dalgaları aramak için etkili ve güvenilirdir. Oskolkov denkleminin çalışmasında kullanılan analitik metodun gezici dalga çözümlerini ortaya koymakta güvenilir, geçerli ve faydalı bir araç olduğu sonucu elde edilir.

Anahtar Kelimeler- $(1 / G')$ -Açılım Yöntemi, Oskolkov Denklemi, Gezici Dalga Çözümü, Tam Çözüm

^{1*} Corresponding Author: hulyadurur@ardahan.edu.tr (<http://orcid.org/0000-0002-9297-6873>)
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Ardahan University, Ardahan, Turkey.

I. INTRODUCTION

Nonlinear partial differential equations (NPEs) are mathematical models of many physical phenomena we encounter in the universe. The physical phenomena discussed are modeled in mathematical terms. These mathematical models describing a physical event were in a simple form when they first appeared. Therefore, the mathematical solutions of these problems and the interpretation of the obtained solutions are easy. It is known that the closer a mathematical model is to reality, the more meaningful it is in the academic universe. To bring the simple form of a model closer to reality, many new terms and variables need to be added to the model. Then, over time, the problem becomes difficult to solve due to the reasons arising from the non-linear terms of this problem.

Recently, there has been much concentration on NPEs in fields as diverse as fluid mechanics, signal processing, mathematical physics, chemical physics, plasma physics, optics, solid state physics, and geochemistry [1, 2]. There are many methods for generating analytical solutions of NPEs have been employed successfully, such as tanh method [3], first integral method [4], new Kudryashov method [5], modified Kudryashov method [6], improved tanh method [7], sub-equation method [8], modified $(1/G')$ -expansion method [9], auxiliary equation method [10], ansatz method [11], ϕ^6 -model expansion method [12], Hirota bilinear method [13] and so on [14-21].

Consider the (1+1)-Dimensional Oskolkov equation of the form [2],

$$u_t - \beta u_{xxt} - \alpha u_{xx} + uu_x = 0, \quad (1)$$

here β, α are constants and u is a function of x and t .

The Oskolkov equation appears in various studies such as different types of traveling wave solutions of the Oskolkov equation have been investigated using the modified (G'/G) -expansion method [1], Ghanbari has been presented exact solutions for two Oskolkov-type equations [22], exact solutions have been attained for the Oskolkov equation [23], Thabet et al. have been presented exact solutions for Oskolkov equations with exponential rational function method [24], Gozukızıl and Akcagıl have been created the exact solutions for the Oskolkov equation via tanh-coth method [25].

There is no solution of this model with this method in the literature. The purpose of this study to generate traveling wave solutions for the Oskolkov equation of by using $(1/G')$ -expansion method. This method produces a hyperbolic type solution of the equation.

The outline of this article is as follows; in section 2, material and method for NPEs is introduced. In section 3, we attain traveling wave solutions for the Oskolkov equation using the expansion method. In section 4, we present the conclusions and discussions. In section 5, the differences of the traveling wave solutions generated in this study are explained after reviewing the earlier works in the literature. We also provide some significant conclusions about our work.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Description of the Method

For NPEs, consider $(1/G')$ -expansion method [26]

$$P\left(u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \dots\right) = 0. \quad (2)$$

Let $u = u(\xi) = u(x, t)$, $\xi = x - ct$, $c \neq 0$, here c is constant and the velocity of the wave. Following nonlinear ordinary differential equation (nODE) for $u(\xi)$, we can transform it

$$W(u, u', u'', \dots) = 0. \quad (3)$$

The solution of equation (3) is assumed that with the form

$$u(\xi) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \left(\frac{1}{G'} \right)^i, \quad (4)$$

in here a_i , $i = (1, \dots, n)$ are scalars and $G = G(\xi)$ enables following second-order linear ordinary differential equation (IODE)

$$G'' + \lambda G' + \mu = 0, \quad \lambda \text{ and } \mu \in \mathbb{R}. \quad (5)$$

Solution defined as expansion method is as follows

$$\frac{1}{G'(\xi)} = \frac{1}{-\frac{\mu}{\lambda} + A \cosh[\xi\lambda] - A \sinh[\xi\lambda]} = \frac{\lambda}{Ae^{-\xi\lambda} \lambda - \mu}. \quad (6)$$

The desired derivatives of equation (4) are calculated and inserted into equation (3), attaining a polynomial with $(1/G')$. By setting coefficients of the polynomial equal to zero, a system of algebraic equations is produced. Package program is used to solve the equation. After, the default equation (3) is replaced in the solution function. Solutions to equation (2) are eventually discovered.

III. SOLUTIONS OF THE OSKOLKOV EQUATION

Consider equation (1) and using $u = u(x, t) = u(\xi)$, $\xi = x - ct$, equation (1) is transformed to an ODE

$$-cU' + \beta cU''' - \alpha U'' + UU' = 0. \quad (7)$$

The balancing term is a constant obtained between the highest order linear term and the highest order nonlinear term in any nODE [27]. So, balancing between highest order linear term U''' with highest nonlinear term UU' in equation (7), we obtain $n = 2$ and considering in equation (4), following situation is attain

$$u(\xi) = a_0 + a_1 \left(\frac{1}{G'} \right) + a_2 \left(\frac{1}{G'} \right)^2, \quad a_1 \neq 0 \text{ or } a_2 \neq 0. \quad (8)$$

By writing equation (8) into equation (7) and equating coefficients of equation (1) to zero, systems of equations may be found in the form

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^1 &: -c\lambda a_1 - \alpha\lambda^2 a_1 + c\beta\lambda^3 a_1 + \lambda a_0 a_1 = 0, \\ \left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^2 &: -c\mu a_1 - 3\alpha\lambda\mu a_1 + 7c\beta\lambda^2\mu a_1 + \mu a_0 a_1 + \lambda a_1^2 - 2c\lambda a_2 - 4\alpha\lambda^2 a_2 + 8c\beta\lambda^3 a_2 + 2\lambda a_0 a_2 = 0, \\ \left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^3 &: -2\alpha\mu^2 a_1 + 12c\beta\lambda\mu^2 a_1 + \mu a_1^2 - 2c\mu a_2 - 10\alpha\lambda\mu a_2 + 38c\beta\lambda^2\mu a_2 + 2\mu a_0 a_2 + 3\lambda a_1 a_2 = 0, \\ \left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^4 &: 6c\beta\mu^3 a_1 - 6\alpha\mu^2 a_2 + 54c\beta\lambda\mu^2 a_2 + 3\mu a_1 a_2 + 2\lambda a_2^2 = 0, \\ \left(\frac{1}{G'[\xi]} \right)^5 &: 24c\beta\mu^3 a_2 + 2\mu a_2^2 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Using the system of equation (9) we can provide the following solutions with the help of computer technology.

Case1. If

$$\beta = -\frac{6\alpha^2}{25c(c-a_0)}, \quad a_1 = 0, \quad \lambda = -\frac{5(c-a_0)}{6\alpha}, \quad \mu = -\frac{5\sqrt{ca_2-a_0a_2}}{6\sqrt{2}\alpha}, \quad (10)$$

replacing the values equation (10) into equation (8) and we found hyperbolic solution for equation (1):

$$u_1(x,t) = a_0 + \frac{a_2}{\left(A \cosh[\theta] + A \sinh[\theta] - \frac{\sqrt{ca_2-a_0a_2}}{\sqrt{2}(c-a_0)} \right)^2}, \quad \theta = \frac{5(-ct+x)(c-a_0)}{6\alpha}. \quad (11)$$

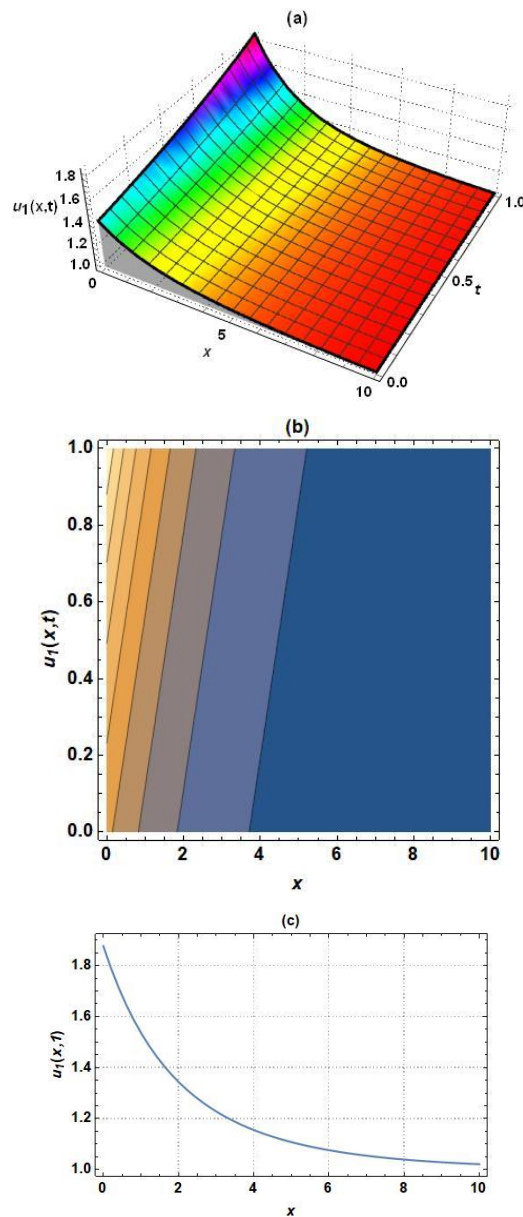


Figure 1. Graphs for $A = 4$, $a_0 = 1$, $a_2 = 2.5$, $c = 1.5$, $\alpha = 3.1$ values of equation (11).

Case2.

$$\beta = \frac{6\alpha^2}{25c(c-a_0)}, \quad a_1 = -2\sqrt{2}\sqrt{-(c-a_0)a_2}, \quad \lambda = -\frac{5(c-a_0)}{6\alpha}, \quad \mu = -\frac{5\sqrt{-ca_2+a_0a_2}}{6\sqrt{2}\alpha}, \quad (12)$$

by writing the values in equation (12) in equation (8), and found hyperbolic solution for equation (1)

$$u_2(x,t) = a_0 + \frac{a_2}{\left(A \cosh[\theta] + A \sinh[\theta] - \frac{\sqrt{-ca_2+a_0a_2}}{\sqrt{2}(c-a_0)} \right)^2} - \frac{2\sqrt{2}\sqrt{-(c+a_0)a_2}}{A \cosh[\theta] + A \sinh[\theta] - \frac{\sqrt{-ca_2+a_0a_2}}{\sqrt{2}(c-a_0)}}, \quad (13)$$

where $\theta = \frac{5(-ct+x)(c-a_0)}{6\alpha}$.

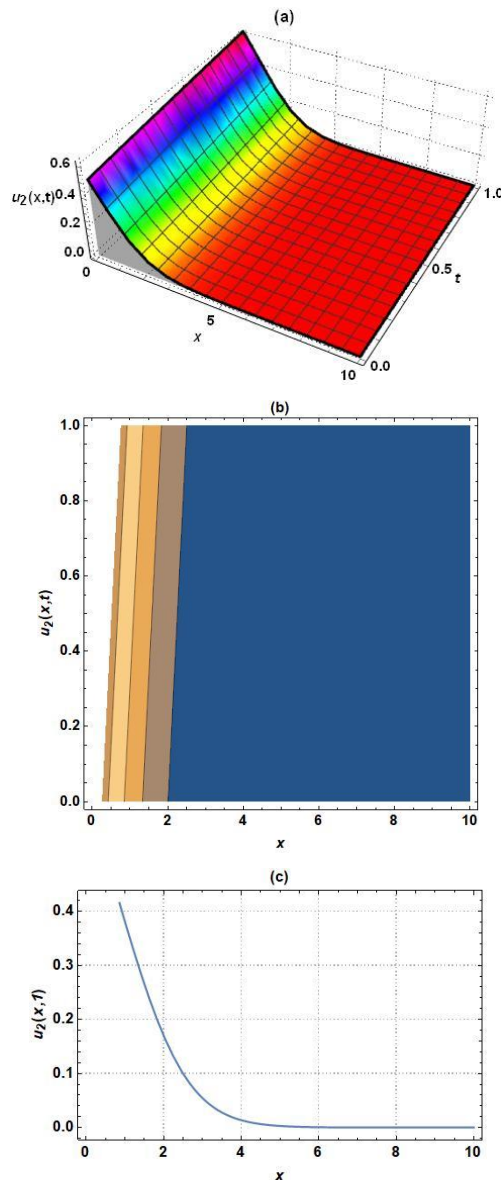


Figure 2. Graphs for $a_0 = 1, a_2 = 1.5, A = 3, c = 0.5, \alpha = 0.5$ values of equation (13).

Case3.

$$a_0 = \frac{72\alpha^2\mu^2 + 25ca_2}{25a_2}, \quad \beta = -\frac{a_2}{12c\mu^2}, \quad a_1 = \frac{24\alpha\mu}{5}, \quad \lambda = \frac{12\alpha\mu^2}{5a_2}, \quad (14)$$

modifying the values in (14) in (8), and we get hyperbolic type solution of equation (1)

$$u_3(x,t) = \frac{72\alpha^2\mu^2 + 25ca_2}{25a_2} + \frac{a_2}{\left(A \cosh[\psi] - A \sinh[\psi] - \frac{5a_2}{12\alpha\mu}\right)^2} + \frac{24\alpha\mu}{5 \left(A \cosh[\psi] - A \sinh[\psi] - \frac{5a_2}{12\alpha\mu}\right)}, \quad (15)$$

where $\psi = \frac{12(-ct + x)\alpha\mu^2}{5a_2}$.

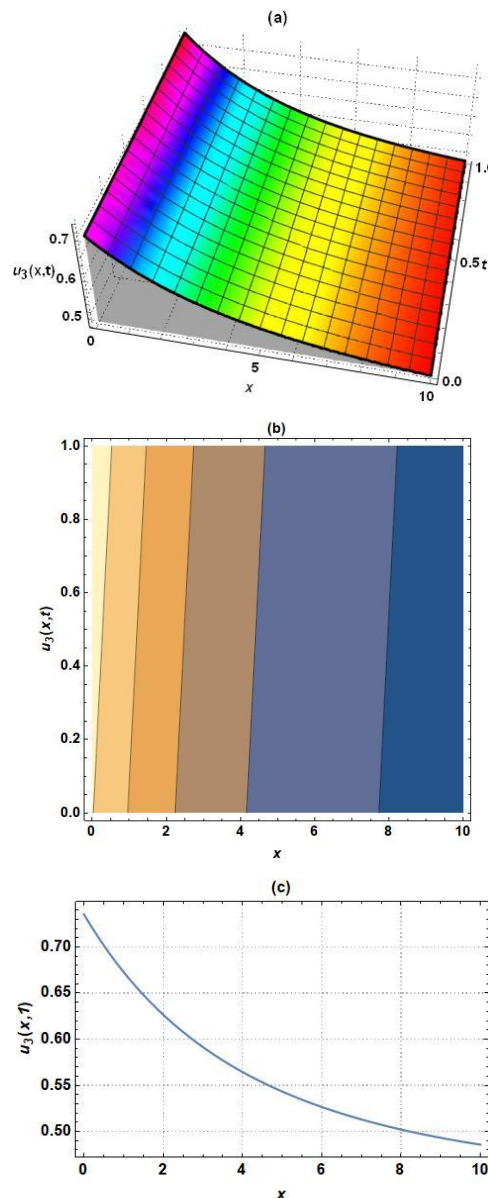


Figure 3. Graphs for $a_2 = 2$, $A = 2.5$, $c = 0.5$, $\alpha = 1$, $\mu = 0.2$ values of equation (15).

IV. RESULTS AND DISCUSSION

There are different methods to reach the exact solution of NPEs. The $(1/G')$ -expansion technique is one of these techniques. In this manuscript, we attained the traveling wave solutions of the Oskolkov equation by using this expansion method. The solutions attained in this work are hyperbolic type wave solutions. The graphs shown represent the standing wave. While these graphics are attained, special values are given to the constants. The advantage of this method is that an easier algebraic equation system is attained compared to other methods. The only disadvantage of the method is that it produces a uniform solution function. In the work, it has been shown that expansion method is easier than other analytical methods in terms of process complexity. Thus, this method is easy and an effective method to find the solution. This expansion method can be easily used to NPEs.

Each method generates a unique set of solutions because of how it is structured, as is well known. This approach results in solutions for hyperbolic type propagating waves. This approach is intended to present many forms of solutions to the literature and has not been used for this equation. This approach has the benefit of being highly reliable and simple to use. The drawback is that it only generates one kind of solution. These solutions do, however, play an important role in the examination of the shock wave structure. Additionally, asymptotic behavior reviewers find the single point feature appealing.

V. CONCLUSIONS

Traveling wave solutions of Oskolkov equation have been presented using $(1/G')$ -expansion method in this article. This method produces hyperbolic type oscillating wave solution.

Different types of solutions of the Oskolkov equation have been obtained using different methods in the literature. For example; Alam et al. have been presented periodic respiratory waves, kink wave, cusp wave and periodic wave solutions in their studies [1]. Roshid and Bashar have been presented kinky periodic wave and breather wave solutions using simple equation method [2]. Ghanbari has been obtained the exponential and hyperbolic type solutions of the Oskolkov equation [22].

In this study, solutions of Oskolkov equation in hyperbolic form are produced. This expansion method generates solutions in Eq. (6) format. In the solutions obtained, the 3-D, contour and 2-D graphs are presented by giving special values to the parameters. In addition, the advantage and disadvantage of applied method is given in the section 4.

The Mathematica ready package program was used to present these solutions. The obtained results demonstrate the algorithm's reliability and its applicability to nonlinear domains.

REFERENCES

- [1] Alam, M. N., Islam, S., İlhan, O. A., & Bulut, H. (2022). Some new results of nonlinear model arising in incompressible visco-elastic Kelvin–Voigt fluid. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. DOI: 10.1002/mma.8372
- [2] Roshid, M., & Bashar, H. (2019). Breather wave and kinky periodic wave solutions of one-dimensional Oskolkov equation. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 6(3), 460-466.
- [3] Wazwaz, A. M. (2004). The tanh method for traveling wave solutions of nonlinear equations. *Applied Mathematics and Computation*, 154(3), 713-723.
- [4] Darvishi, M., Arbabi, S., Najafi, M. & Wazwaz, A. (2016). Traveling Wave Solutions of a $(2+ 1)$ -Dimensional Zakharov-Like Equation by the First Integral Method and the Tanh Method. *Optik*, 127(16), 6312-6321.
- [5] Tripathy, A., Sahoo, S., Rezazadeh, H., & Izgi, Z. P. (2022). New optical analytical solutions to the full nonlinearity form of the space–time Fokas–Lenells model of fractional-order. *International Journal of Modern Physics B*, 2250058.
- [6] Karakoc, S. B. G., & Ali, K. K. (2021). Theoretical and computational structures on solitary wave solutions of Benjamin Bona Mahony-Burgers equation. *Tbilisi Mathematical Journal*, 14(2), 33-50.
- [7] Yokuş, A., Durur, H., Duran, S., & Islam, M. (2022). Ample felicitous wave structures for fractional foam drainage equation modeling for fluid-flow mechanism. *Computational and Applied Mathematics*, 41(4), 1-13.
- [8] Duran, S., & Karabulut, B. (2022). Nematicons in liquid crystals with Kerr Law by sub-equation method. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1695-1700.

- [9] Yokuş, A., Duran, S., & Durur, H. (2022). Analysis of wave structures for the coupled Higgs equation modelling in the nuclear structure of an atom. *The European Physical Journal Plus*, 137(9), 1-17.
- [10] Durur, H., Tasbozan, O., & Kurt, A. (2020). New analytical solutions of conformable time fractional bad and good modified Boussinesq equations. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 5(1), 447-454.
- [11] Karakoc, S. B. G., & Ali, K. K. (2021). New exact solutions and numerical approximations of the generalized kdv equation. *Computational Methods for Differential Equations*, 9(3), 670-691.
- [12] Isah, M. A., & Yokuş, A. (2022). The investigation of several soliton solutions to the complex Ginzburg-Landau model with Kerr law nonlinearity. *Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications*, 2(3), 147-163.
- [13] Yokus, A., & Isah, M. A. (2022). Stability analysis and solutions of $(2+1)$ -Kadomtsev-Petviashvili equation by homoclinic technique based on Hirota bilinear form. *Nonlinear Dynamics*, 1-12.
- [14] Özkan, Y. S., Seadawy, A. R., & Yaşar, E. (2021). On the optical solitons and local conservation laws of Chen-Lee-Liu dynamical wave equation. *Optik*, 227, 165392.
- [15] Yavuz, M., & Yokus, A. (2020). Analytical and numerical approaches to nerve impulse model of fractional-order. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 36(6), 1348-1368.
- [16] Ali, K. K., Karakoc, S. B. G., & Rezazadeh, H. (2020). Optical soliton solutions of the fractional perturbed nonlinear schrodinger equation. *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, 10(4), 930-939.
- [17] Baskonus, H. M. (2021). Dark and trigonometric soliton solutions in asymmetrical Nizhnik-Novikov-Veselov equation with $(2+1)$ -dimensional. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 11(1), 92-99.
- [18] Veerasha, P., Yavuz, M., & Baishya, C. (2021). A computational approach for shallow water forced Korteweg-De Vries equation on critical flow over a hole with three fractional operators. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 11(3), 52-67.
- [19] Yavuz, M., & Abdeljawad, T. (2020). Nonlinear regularized long-wave models with a new integral transformation applied to the fractional derivative with power and Mittag-Leffler kernel. *Advances in Difference Equations*, 2020(1), 1-18.
- [20] Karakoc, S. B. G., Bhowmik, S. K., & Sucu, D. Y. (2021). A Novel Scheme Based on Collocation Finite Element Method to Generalised Oskolkov Equation. *Journal of Science and Arts*, 21(4), 895-908.
- [21] Yokuş, A., Durur, H., & Duran, S. (2021). Simulation and refraction event of complex hyperbolic type solitary wave in plasma and optical fiber for the perturbed Chen-Lee-Liu equation. *Optical and Quantum Electronics*, 53(7), 1-17.
- [22] Ghanbari, B. (2021). New analytical solutions for the oskolkov-type equations in fluid dynamics via a modified methodology. *Results in Physics*, 28, 104610.
- [23] Roshid, M. M., & Roshid, H. O. (2018). Exact and explicit traveling wave solutions to two nonlinear evolution equations which describe incompressible viscoelastic Kelvin-Voigt fluid. *Heliyon*, 4(8), e00756.
- [24] Thabet, H., Kendre, S., & Peters, J. (2022). Advances in solving conformable nonlinear partial differential equations and new exact wave solutions for Oskolkov-type equations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 45(5), 2658-2673.
- [25] Gözükızıllı, Ö. F., & Akçağıllı, Ş. (2013). The tanh-coth method for some nonlinear pseudoparabolic equations with exact solutions. *Advances in Difference Equations*, 1, 1-18.
- [26] Duran, S. (2021). Travelling wave solutions and simulation of the Lonngren wave equation for tunnel diode. *Optical and Quantum Electronics*, 53(8), 1-9.
- [27] Yokus, A. (2011). *Solutions of some nonlinear partial differential equations and comparison of their solutions*, Ph.Diss., Firat University.

Araştırma Makalesi–Research Article

%3,5 NaCl Ortamında C95200 ve C95300 Alüminyum Bronzlarının Korozyon Davranışları

Corrosion Behaviors of C95200 and C95300 Aluminium Bronzes in 3,5% NaCl Environment

Meriç Metin¹, Mehmet Ünal², Halil Ahmet Gören^{3*}

Geliş / Received: 23/06/2022

Revize / Revised: 02/12/2022

Kabul / Accepted: 05/12/2022

ÖZ

Bu çalışmada C95200 ve C95300 alüminyum bronzlarının mikroyapı ve korozyon özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. C95200 ve C95300 alaşımları alüminyum bronz normlarında döküm olarak üretilmiştir. Üretilen alüminyum bronz ingotlarından mikroyapı ve korozyon numuneleri oluşturulmuştur. Optik mikroskop, SEM ve EDS araştırmaları yapıldı. Alaşımlara 72 saat %3,5 NaCl ortamında daldırma korozyon testi ve potansiyodinamik polarizasyon korozyon testi yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde siyah bölgeler birincil α yapısını, tane sınırlarındaki beyaz bölgeler ikincil fazı (β) temsil etmektedir. Potansiyodinamik polarizasyon korozyon testinde C95200 alaşımının korozyon direncinin C95300 göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum daldırma korozyon testinde de gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- C95200, C95300, Korozyon, Alüminyum Bronzları

ABSTRACT

In this study, it was aimed to investigate the microstructure and corrosion properties of C95200 and C95300 aluminium bronzes. C95200 and C95300 alloys are produced as cast in aluminium bronze norms. Microstructure and corrosion samples were formed from the produced aluminium bronze ingots. Optical microscope, SEM and EDS investigations were done. Corrosion test was performed on the alloys in 3,5% NaCl environment for 72 hours. In addition, potentiodynamic polarization corrosion test was performed. In microstructural studies, black areas represent primary α structure, white areas at grain boundaries represent secondary phase (β). In the potentiodynamic polarization corrosion test, it was determined that the corrosion resistance of the C95200 alloy was higher than the C95300. This was also observed in the immersion corrosion test.

Keywords- C95200, C95300, Corrosion, Aluminium Bronzes

¹İletişim: mericc.metin@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-9200-2633>)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

²İletişim: munal@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3836-4566>)

İmalat Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

^{3*}Sorumlu yazar iletişimi: agoren@sinop.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4455-4024>)

Mekatronik Programı, Sinop Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Sinop, Türkiye

I. GİRİŞ

Bakır alaşımları termal, elektriksel ve iyi mekanik özelliklerinden dolayı endüstriyel alanda tercih edilmektedir. Bu alaşımlar konnektörler, ısı eşanjörleri, borular, radyatörler gibi parçalarda kullanılmaktadır. Bakır alaşımlarının özelliklerini geliştirmek amacıyla Al, Zn, Cr, Ni, Sn, Pb, Nb, Be gibi farklı alaşım elementleri eklenmektedir. Alüminyum bronzları en önemli bakır bazlı (Cu-Al) alaşımlardan biridir. Alüminyum bronzları genellikle %5-%14 aralığında ana alaşım elementi olarak farklı alüminyum yüzdesine sahiptir, fakat alüminyum bronzlarına nikel, manganez, silikon ve kalay gibi alaşım elementlerinde eklenebildiği rapor edilmiştir [1]. Bronzlar, farklı tribolojik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [2]. Literatürde fiziksel, mekanik, tribolojik ve diğer özellikleri düzenlemek için istenen bir iç yapının elde edilmesinin önemli olduğu bildirilmiştir [3].

Yaklaşık %8'den fazla alüminyum içeren ticari alaşımlara demir ilavesi yapılabilir. Demir hem katılaşma hem de yavaş soğutma sırasında taneleri inceltir ve mekanik özellikleri iyileştirir [4-5]. Yaşar ve arkadaşları C95300 alaşımında α fazı ile birlikte tane sınırları boyunca ikincil β fazı varlığını bildirmişlerdir [6].

Literatürde polarizasyon deneyleri sonucunda, Al-Cu-Fe alaşımlarında bulunan diğer fazlara göre Cu ve Fe içeren yarı kristalli fazın en iyi korozyon performansı gösterdiği rapor edilmiştir [7].

Literatürde elektrokimyasal potansiyodinamik polarizasyon testi ile, klorür ortamında üç farklı Cu-Al intermetalik bileşiğin korozyon performansı karşılaştırılmıştır. Üç Cu-Al intermetalikleri arasındaki korozyon hızı büyükten küçüğe doğru $\text{Cu}_9\text{Al}_4 > \text{CuAl}_2 > \text{CuAl}$ olarak tespit edilmiştir. Metaller için korozyon hızı büyükten küçüğe doğru $\text{Cu} > \text{Al}$ olarak bildirilmiştir. Az miktarda Pd ilavesi korozyon direncini bir miktar artırmıştır [8].

Literatürde yapılan bir çalışmada, NaOH ve H_2SO_4 ortamındaki alüminyum bronz numunelerinin, sırasıyla döküm sarı altın renginden kahverengiye ve koyu renge kademeli olarak renk bozulması gösterdiği rapor edilmiştir. NaCl ortamında, NaOH ve H_2SO_4 ortamına kıyasla korozyona karşı daha yüksek direnç gösterdiği ve artan konsantrasyonda bile hafif renk açma etkisi meydana geldiği rapor edilmiştir [9].

Galvanik olarak bağlanmış Nikel-Alüminyum Bronz ve paslanmaz çeliğin (UNS S31603) üç haftalık doğal deniz suyunda korozyon davranışı incelenmiş ve sonuç olarak paslanmaz çeliğin Nikel-Alüminyum bronz tarafından katodik polarizasyonunun, paslanmaz çeliğin katot verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir [10].

Literatürde (Cu-7Al) bronzunun korozyon davranışı incelenmiş ve alaşım%3,4 NaCl çözeltisinde uzun süreler boyunca bekletilmiştir. Bu durum numuneler üzerinde erken sürede aşındırıcı saldırı meydana getirmiş genel, çukur korozyonlarının birleşmesi ve büyümesi ile birden fazla oluk benzeri boşluk oluşmuş ve komşu çukurların bir araya gelmesiyle sonuçlandırılmıştır [11].

Cenoz yaptığı çalışmada, alüminyum bronz kalıcı kalıp içine döküm yapılmış ve yapıda α ile γ_2 ve yarı kararlı faz β' ve γ' meydana geldiğini tespit etmiştir. İlaveten ($\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, Fe_3Al ve Al_5Fe_2) intermetaliklerinin oluştuğunu bildirmişlerdir. Ayrıca küresel demir parçacıkları oluştuğunu ve bu küresel parçacıkların alüminyum ile etkileşime girmediğini belirtmişlerdir [12].

Bu çalışmada döküm olarak elde edilen C95200 ve C95300 alüminyum bronzlarının mikroyapısal özellikleri, ayrıca daldırma korozyon testi ve potansiyodinamik polarizasyon testi kullanılarak korozyon özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Alaşımları üretmek için indüksiyon ocağında C95200 ve C95300 alüminyum bronzlarının ergitimi yapılmış ve kokil kalıp içerisine dökülmüştür. Ergitme işlemi iki dereceli olarak yapılmıştır. Öncelikle hazırlanan karışım ergitilmiş ve bu ergitilmiş alaşımlar, mikroyapısının homojen olması ve segregasyonun giderilmesi için tekrar ergitilmiş ve dökülmüştür. 1135 °C sıcaklığa kadar ergitilen alaşımlar 200 °C'ye ısıtılmış metal bir kalıba dökülmüştür. Böylece C95300 alaşımı ve sonra C95200 alaşımı Fe ilavesi ile üretilmiştir [6].

A. Alaşımların Kompozisyonu

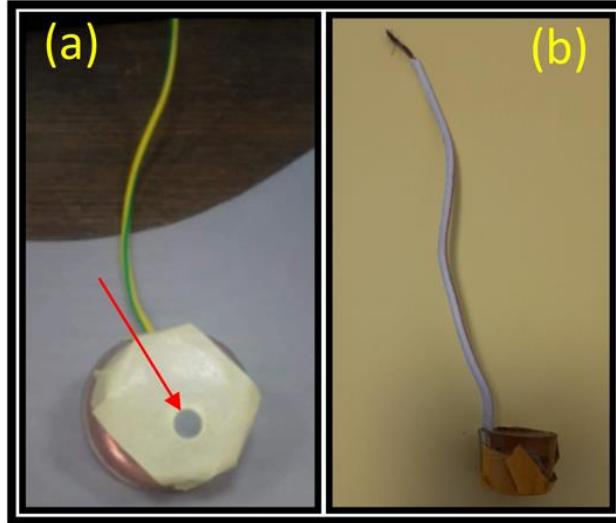
Alaşımlar döküm yöntemiyle üretilmiş ve sonrasında alınan numuneler üzerinde kimyasal element analizlerinin yapılmasında (X-Işınları Floresans) olarak bilinen XRF yöntemi kullanılarak Rigaku ZSX Primus II model cihaz vasıtasıyla test edilmiştir. XRF yöntemi ile elementlere özel farklı tipteki dalga boylarında floresans adı verilen ikincil tip ışımalarından yararlanılarak alaşımdaki elementlerinin % ağırlıkları tespit edilmiştir.

B. Mikroyapı Deney Metodu

Mikroyapı araştırmaları için döküm alaşımların numuneleri sırasıyla 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000, zımparalar ile zımparalanmış ve ardından saf su ile temizlenmiştir. Ardından 1µm alümina ile parlatılan yüzeyler saf su ve alkol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Sonrasında numuneler dağlanmış ve ardından tekrar saf su ve alkolle numunelerin yüzeyi durulanmış kurutulmuştur. Optik mikroskop incelemeleri Nikon markalı optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Ardından Carl Zeiss Ultra Plus Gemini markalı aygıt ile SEM, EDS incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

C. Potansiyodinamik Polarizasyon Deney Metodu

Potansiyodinamik polarizasyon deneyinde kullanılmak üzere döküm alaşımlardan Şekil 1 (a) ve (b)'de görülen numune hazırlanırken, numunelerin yan kısımları aşındırılmış ve aşınan bu bölgeden bakır tel ile sarılan numune üzerine, telin diğer tarafı 10 cm dışarıda kalacak şekilde epoksi reçine dökülmüştür. Telin bir kısmı numune ile beraber reçine içinde kalmakta, diğer uzun tarafı zımpara yapılmayan kısmından dışarı çıkmış şekilde reçine dışında kalmaktadır. Zımpara yapılan test yüzeyleri tamamen reçine ile kaplıdır ve tel bulunmamaktadır. Test edilecek yüzeyler 1200'e kadar SiC zımpara ile zımparalanmış numunelerin yüzeyine orta noktasında 0,25 cm yarı çapında daire şeklinde boş alana sahip güçlü yapışan bir bant yapıştırılmış ve numunelerin korozyon testlerinin eşit alanda yapılması hedeflenmiştir.



Şekil 1. Potansiyodinamik polarizasyon deney numunesi (a) Korozyona maruz kalan daire bölge (b) Numunenin yan görünüşü

Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri %3,5 NaCl ortamında, bilgisayarlı DC105 korozyon analizine sahip Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvanostat sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Deneyde karşıt elektrotun yerine grafit çubuk, referans elektrotun yerine doymuş kalomel elektrot (SCE), çalışma elektrotunun yerine numune yüzeyi kullanılmıştır. Klasik olarak üç elektrot bulunan hücre ile yapılmıştır. 1 mVs⁻¹ tarama hızı ile, -0,25 V (açık devre potansiyeli, E_{oc}) +0,25 V (E_{oc}) aralık bölgesinde tarama gerçekleştirilmiştir. Her numune için 3 test yapılmış ve ortalamalar kullanılmıştır.

D. Daldırma Korozyon Deney Metodu

Dökümü yapılmış alaşımlardan daldırma korozyon testi için 2x10x10 mm ebatlarındaki dikdörtgen prizma şeklinde numuneler hazırlanmış ve yüzeyleri zımparalanmıştır. Ultrasonik cihazda saf su dolu beher içinde temizlenmiştir. Ardından yüzey alanları hesaplanmış ve daldırma öncesinde ilk ağırlıkları 0,0001 gr hassasiyet gösteren terazi ile ölçülmüştür. Numuneler içerisinde %3,5 NaCl ile elde edilen saf su çözeltisi bulunan cam kavanozların içine file yardımı ile asılı halde daldırılmıştır. Daldırılan numuneler 3, 6, 9, 12, 24, 48 ve 72 saat ara ile çözülden çıkarılarak, yüzeyleri temizlenmiş ardından ağırlıkları ölçülüp kaydedilmiştir. Bu saat aralıklarında çözülden çıkarılan numunelerin temizlenme işlem sırası, önce 180 gr/L olarak sulu kromikasit çözeltisi içerisinde ultrasonik temizleme cihazında 5dk bekletilmiştir. Sonrasında saf su içerisinde ultrasonik temizleme cihazında 5 dakika bekletilmiştir. Son olarak yine ultrasonik temizleme cihazında 5 dakika alkol ile temizlenmiştir. Ölçümleri yapılan numuneler tekrar %3,5 NaCl içerisine daldırılmıştır.

III. DENEYSSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. Alaşımların Kompozisyon Sonuçları

C95200 ve C95300 alüminyum bronz alaşımları ergitilmiş ve kokil kalıp içerisine dökülmüştür. Numuneler incelendiğinde ana alaşım elementleri olan Cu, Al ve Fe elementlerinin bileşiminde küçük farklılıklar olsa da alaşımlardaki bileşimler (ASTM B148-78a) ASTM standartlarında belirlenmiş aralıklara uygundur [13-14]. Alaşımların kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

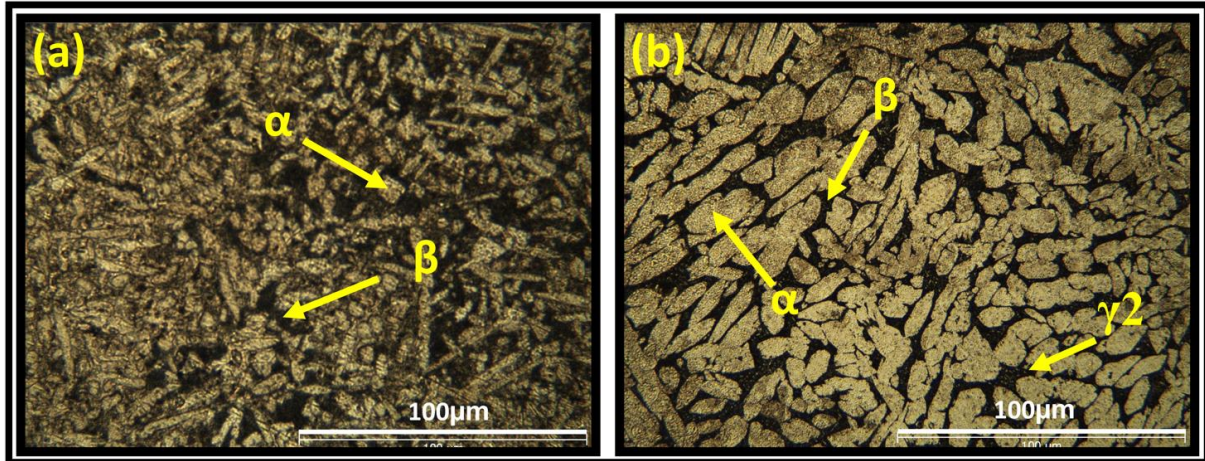
Tablo 1. Alaşımların kompozisyonu

Alaşım	% Al	% Fe	% Sn	% Ni	% Si	% Pb	% Zn	% Cu
C95200	8.678	2.510	0.043	0.006	0.062	0.016	0.116	Kalan
C95300	10.105	0.983	0.038	0.003	0.073	0.018	0.115	Kalan

B. Mikroyapı Deney Sonuçları

İncelenen Cu-Al-Fe alaşımlarının döküm olarak optik mikroskop görüntüleri Şekil 2(a) ve (b)’de gösterilmiştir. Fe içeriği daha yüksek ve alüminyum içeriği daha az olan C95200 alaşımının tane yapısı daha incedir. C95300 alaşımında ise alüminyum miktarı daha yüksek ve demir miktarı daha az tane yapısı daha büyüktür. Literatür incelendiğinde alüminyum bronzlarının mikroyapılarında çeşitli fazlar bulunabildiği rapor edilmiştir. Ayrıca ısıl işlem ve soğuma ile birlikte matris yapısı daha karmaşık bir hal aldığı bildirilmiştir. Bununla beraber alüminyum bronzlarında temelde üç fazın (α , β ve γ_2) sıklıkla görüldüğü ve mekanik özelliklerin bu fazlar tarafından belirlendiği açıklanmıştır. İlgili fazlar, mikroyapıda birbirinden ayrı yer alabileceği gibi bir arada kompleks bir dağılımda da yer alabilir. Alüminyum miktarının artmasıyla yapı tek fazdan çok çift faz olarak görülmeye başlar ve bronzun yoğunluğu azalır. Alüminyum bronzları ağırlıkça %8 alüminyum içeriğine kadar α fazına sahiptir. Diğer faz olan β ise ağırlıkça %8,0-11,0 alüminyum matris içerisinde gözlemlenebilir.

Matriste bulunan α fazı yumuşak bir karakteristiğe sahiptir ve sünekliği ile beraber korozyon direncini geliştirmektedir. Mikroyapıda bulunabilen β fazı sertlik olarak α fazının sertliğinden daha yüksektir ve matrisin sünekliğine ve korozyon direncine katkı sunmaktadır. Fakat γ_2 fazı oldukça sert ve gevrek bir yapıya sahip olarak korozyon direncinde bir miktar azalmaya sebep olabilir. Alüminyum bronzları yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahiptir. Bundan dolayı işlenmeleri zordur. Bu bronz türünde alüminyum miktarı alaşımın işlenme kabiliyetini belirler [13, 14].



Şekil 2. Alaşımların mikroyapı görüntüleri: (a) C95200 ve (b) C95300

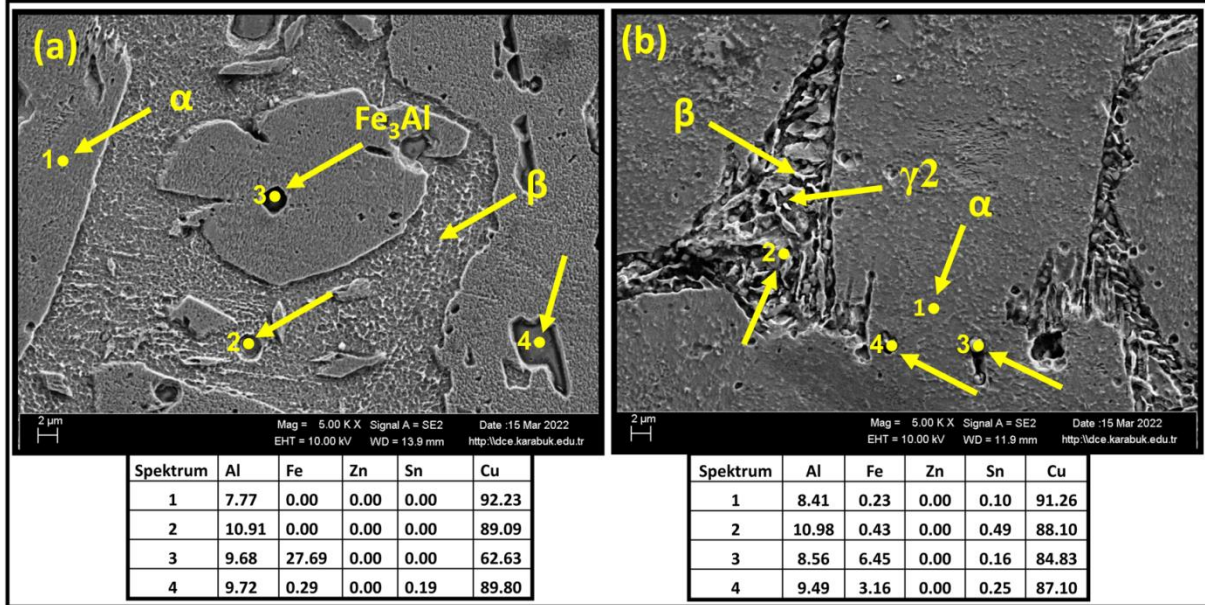
Şekil 3’de C95200 ve C95300 alaşımlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 3 (a)’daki C95200 alaşımının SEM görüntülerinde 1 ile gösterilen nokta birincil α fazını temsil eder. Tane sınırlarındaki bölgelerde ikincil β fazı gösterilmiştir. Şekil 3 (b)’de 1 ile gösterilen noktada birincil α fazı, tane sınırlarında β fazı ayrıca γ_2 fazı gösterilmiştir.

Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde Yaşar ve arkadaşları C95300 alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada, α fazı ile birlikte tane sınırlarında ikincil β fazını rapor etmişlerdir. Buna alüminyum bronz perlit ($\alpha +$

γ_2) de denir. Perlitik yapı çeliklerde olduğu gibi lamellidir. Oda sıcaklığında β yapısına sahiptir ve iki fazlıdır. C95300, C95200'den daha fazla ve daha büyük β fazı alanına sahiptir [4-6].

Cenoz çalışmasında alüminyum bronzunu kalıcı kalıp içine döküm yapmıştır. α ile γ_2 ve yarı kararlı faz β' ve γ' meydana geldiğini tespit etmiştir. Ayrıca γ_2 ve γ' fazları dökümdeki mikro segregasyonlardan dolayı lokal olarak meydana geldiğini rapor etmiştir. Ayrıca demir ve alüminyum intermetalikleri bileşiklerinin ($Al_{13}Fe_4$, Fe_3Al ve Al_3Fe_2) oluştuğunu bildirmişlerdir [12].

Literatürde nominal bileşimde (ağırlıkça %) Cu-10Al-2.5Fe içeren Al bronzu incelenmiştir. Döküm olarak mikroyapıda α -fazında demir açısından zengin intermetalik çökeltiler bulunduğunu, α -fazi FCC bakır açısından zengin katı çözeltiler bulunduğunu rapor etmişlerdir. Yapıda bulunan demir açısından zengin intermetalik Fe_3Al parçacıkları β -fazında çökeler ve α -fazının büyümesini bir dereceye kadar engelleyerek β -fazının çekirdeklenmesi için alan sağlayarak mikroyapının iyileştirilmesine neden olur [5]. Referans [5]'te anlatıldığı gibi Şekil 3 (a)'daki SEM görüntüleri ve EDS analizinde 3 ile işaretlenmiş noktada, β fazı bölgesinde çökelmiş Fe_3Al fazı gösterilmiştir.



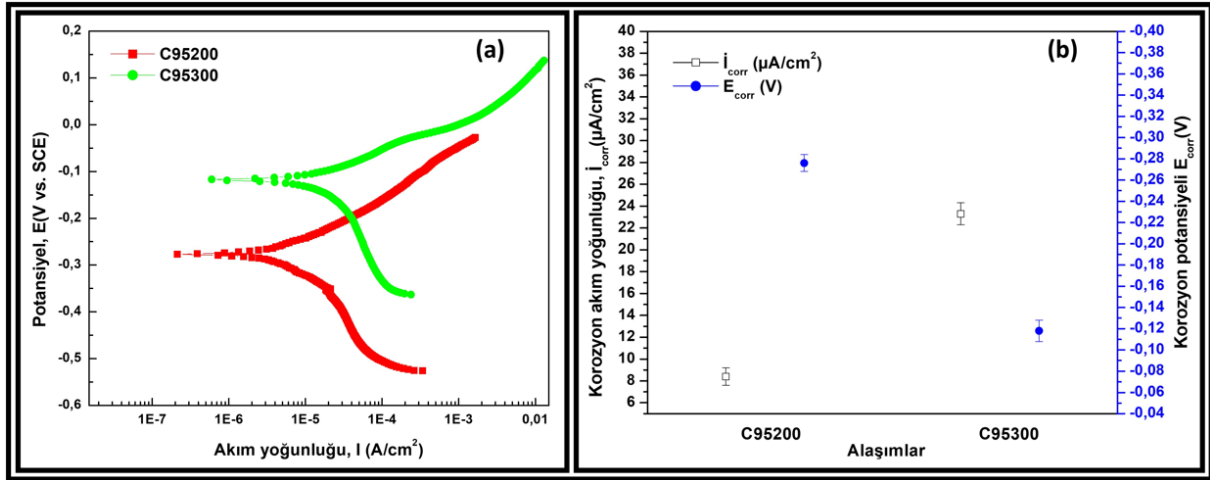
Şekil 3. Alaşımlarının SEM, EDS analizi sonuçları: (a) C95200 ve (b) C95300

C. Potansiyodinamik Polarizasyon Deney Sonuçları

Potansiyodinamik polarizasyon korozyon deneyleri yapılmıştır. Şekil 4'te C95200 ve C95300 alüminyum bronzlarının Tafel eğrileri ve I_{corr} ve E_{corr} değerleri verilmiştir. Bu eğriler Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile incelenmiş ve şekilden korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve bununla ilgili korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) sonuçları elde edilmiştir. Polarizasyon eğrileri incelendiğinde C95300 alaşımı C95200 alaşımına göre daha pozitif potansiyel değerinde kalmıştır. Bu durumu daha net şekilde açıklamak için I_{corr} ve E_{corr} değerlerindeki incelememiz gerekir.

I_{corr} akım yoğunluğudur, I_{corr} arttıkça malzemenin korozyona karşı direnci zayıflar [15]. Sırasıyla C95200 ve C95300 alaşımlarının I_{corr} değerleri 8,39 ve 23,3 V. olarak belirlenmiştir. Bu tanıma göre C95300 alaşımının I_{corr} değeri C95200 alaşımından daha yüksektir ve korozyon direnci daha zayıftır. Bu göre; I_{corr} değeri düşük olan C95200 alaşımının korozyon direncinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum daldırma korozyon testi sonuçları ile örtüşmektedir.

E_{corr} değeri akımların aşması gerektiği bariyerdir. E_{corr} pozitifeye yaklaştıkça akımların aşması lazım gelen bariyer yükselir bunun sonucunda malzemenin korozyona karşı direnci artmaktadır [15]. Burada sırasıyla C95200 ve C95300 alaşımlarının E_{corr} değerleri -0,276 ve -0,118 V. olarak tespit edilmiştir. Alaşımların korozyon dayanımları tespit edilirken, potansiyodinamik polarizasyon korozyon testi sonuçları ile daldırma korozyon testi sonuçlarını birlikte değerlendirmek daha aydınlatıcı bir sonuç verecektir.

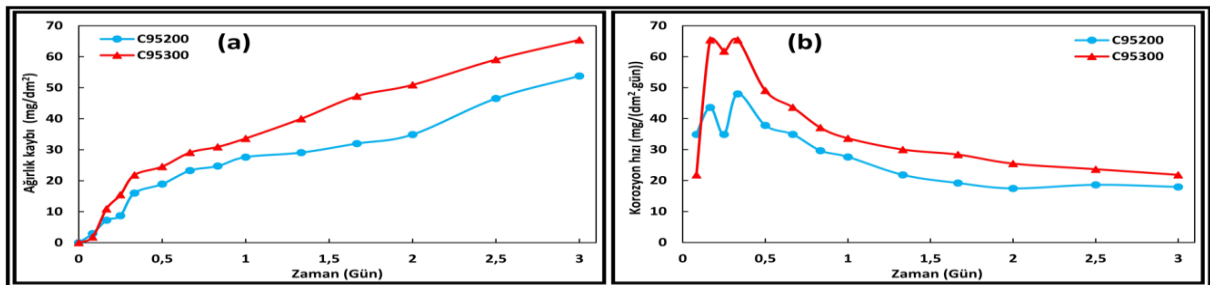


Şekil 4. Alaşımların (a) Tafel eğrileri (b) i_{corr} ve E_{corr} değerleri.

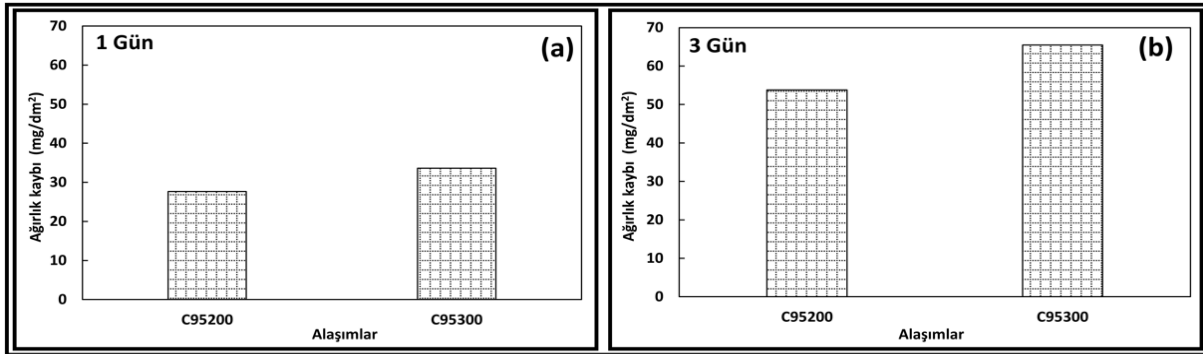
Saarivirta ve Tiainen tarafından yapılan çalışmada potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonucunda Al-Cu-Fe alaşımlarının tuzlu çözeltilerde korozyon hızı, esas olarak yapıda mevcut Cu bakımından zengin fazların miktarı ile belirlendiği bildirilmiştir. Asidik çözeltilerde, Cu bakımından zengin fazlar korozyona uğramadan kalırken, daha az Cu içeren fazlar korozyona duyarlı olduğu rapor edilmiştir. Nötr ve bazik çözeltilerde oksidasyon birincil yüzey reaksiyonu olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, Cu'nun oksit tabakasına gözenekler soktuğu bulunmuş ve Fe oksidasyon sürecini inhibe ettiği belirtilmiştir. Bu nedenle, nötr ve bazik çözümlerde, incelenen Al-Cu-Fe alaşımlarında bulunan diğer fazlara göre Cu ile birlikte Fe içeriğine sahip yarı kristalli faz en iyi korozyon performansı gösterdiği rapor edilmiştir [7]. Al-bronzunun (Cu-7Al) korozyon davranışı incelenmesinde %3,4 NaCl çözeltisinde uzun süreler boyunca bekleyen numuneler üzerinde aşındırıcı saldırı çok erken başlamış ve oluşan komşu çukurların bir araya geldiği rapor edilmiştir [11]. Referans [7]'deki bakırın Fe oksidasyon sürecini inhibe etmesive referans [11]'deki NaCl ortamındaki uzun süren bekleme sonrasında meydana gelen korozyon numuneleri üzerinde aşındırıcı saldırılar, bu çalışmadaki korozyon deneyini aydınlatmaya yardımcı olabilir.

D. Daldırma Korozyon Deney Sonuçları

Şekil 5.'de alaşımların daldırma korozyon testindeki ağırlık kaybı ve korozyon hızları görülmektedir. Daldırma korozyon testi sonuçları incelendiğinde Şekil 5 (a)'da görülen 3 gün (72 saat) ağırlık kaybı testinde C95300 alaşımı daha fazla ağırlık kaybı yaşamış ve korozyon direncinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. C95200 alaşımı daha az ağırlık kaybı yaşamış ve korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum potansiyodinamik polarizasyon korozyon test sonuçları ile örtüşmektedir. Şekil 5 (b)'de görülen korozyon hızı grafiği incelendiğinde C95300 alaşımının korozyon hızı C95200 alaşımına göre daha yüksektir. Şekil 6 (a) ve (b)'de sırasıyla 1 günlük ve 3 günlük ağırlık kayıplarının gün geçtikçe nasıl bir değişime uğradığı gösterilmiştir. C95300 alaşımının ağırlık kaybının 1'inci ve 3'üncü günlerde çok daha fazla olduğu görülmektedir.

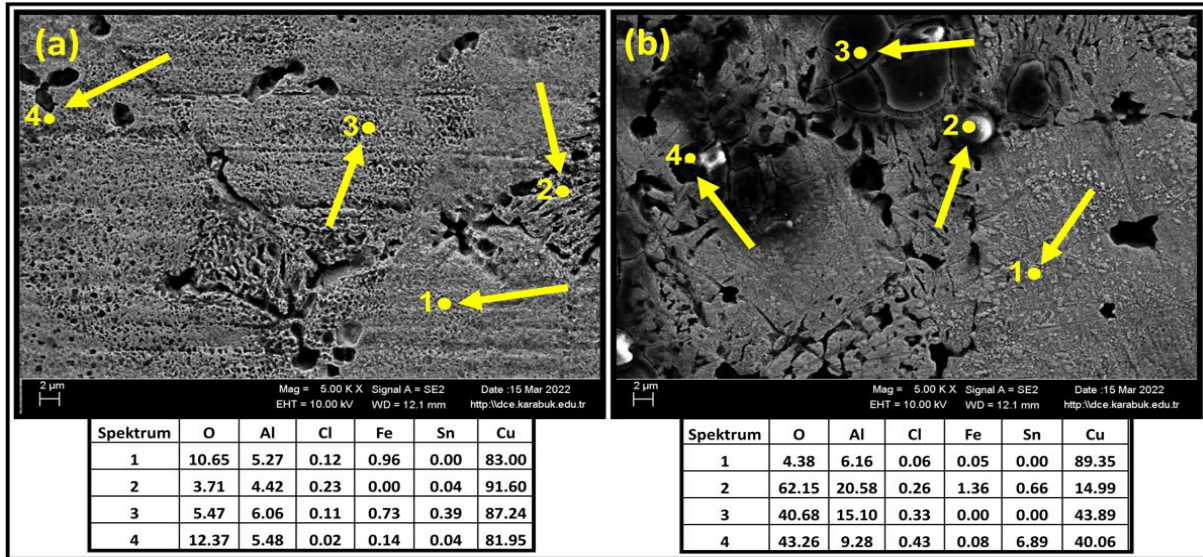


Şekil 5. Alaşımlarının daldırma korozyon testindeki (a) Ağırlık kaybı (b) Korozyon hızı



Şekil 6. Alaşımlarının daldırma korozyon testindeki (a) 1. gün sonundaki ağırlık kaybı (b) 3. gün sonundaki ağırlık kaybı

Şekil 7 (a) ve (b)'de daldırma korozyon deneyi SEM, EDS sonuçları verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde C95300 alaşımının 2, 3 ve 4'üncü bölgelerdeki oksijen (O) yüzdesi yüksektir fakat C95200 alaşımındaki noktalarda oksijen (O) yüzdesi düşüktür. Literatürdeki bir çalışma Al-Cu-Fe alaşımlarında bulunan diğer fazlara göre Cu içeriği yüksek olan fazların korozyondan neredeyse etkilenmediğini rapor etmişlerdir [7].



Şekil 7. Alaşımlarının daldırma korozyon testi sonrasındaki SEM, EDS analizi sonuçları: (a) C95200 ve (b) C95300

IV. SONUÇLAR

Döküm ile üretilen C95200 ve C95300 alaşımlarının mikroyapı ve korozyon davranışlarının karşılaştırılmasının sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Mikroyapılarda siyah bölgeler birincil α yapısını temsil eder. Tane sınırlarında görüldüğü gibi beyaz bölgeler ikincil (β) fazıdır. 95200 alaşımı Fe içeriğinin daha fazla olmasından dolayı daha ince tane yapısına sahiptir ve daha az (β) fazına sahiptir. Ayrıca yapısında Fe_3Al intermetaliti bulunmaktadır. C95300 alaşımı taneleri daha iridir ve daha fazla (β) fazına sahiptir.

Potansiyodinamik polarizasyon testinde I_{corr} değeri düşük olan C95200 alaşımının korozyon direncinin daha fazla olduğu görülmektedir. Fe miktarının artmasıyla Cu-Fe içeren fazın korozyon dayanımını geliştirdiği düşünülmektedir.

Daldırma korozyon testi bir önceki potansiyodinamik polarizasyon testini desteklemektedir. C95200 alaşımının korozyon direnci C95300 alaşımına göre daha iyi olduğu ağırlık kayıplarından anlaşılmış ve bu değerler daldırma korozyon testi sonrası alınan SEM görüntüleriyle de desteklenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Proje No: KBÜBAP-21-YL-083 numaralı proje ile Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Gohar G. A., Manzoor T. & Shah A. N. (2018). Investigation of Thermal and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys with Silver Addition Prepared by Powder Metallurgy, *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 802-812.
- [2] Kimura T., Shimizu K. & Terada K. (2007). Sliding Wear Characteristic Evaluation of Copper Alloy for Bearing, *Wear*, 263, 1-6, 586-591.
- [3] Sadykov F.A., Barykin N.P. & Aslanyan I.R. (1999). Wear of Copper and Its Alloys with Submicrocrystalline Structure, *Wear*, 225-229, 1, 649-655.
- [4] Yaşar M. & Altunpak Y. (2009). The Effect of Aging Heat Treatment on The Sliding Wear Behaviour of Cu-Al-Fe Alloys, *Materials & Design*, 30 (3) 878-884.
- [5] Hasan F., Iqbal J. & Ridley N. (1985). Microstructure of As-Cast Aluminium Bronze Containing Iron, *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 1 (4), pp. 312-315.
- [6] Yaşar M., Demiral M., Özyürek D. & Ünal M. (2009). Investigation of Wear Behaviors of C95200-C95300 Cu-Al-Fe Alloys, *Industrial Lubrication and Tribology*, 61, 1, 40-46.
- [7] Huttunen-Saarivirta E., Tiainen T. (2004). Corrosion Behaviour of Al-Cu-Fe Alloys Containing a Quasicrystalline Phase, *Materials Chemistry and Physics*, 85, 2-3, 383-395.
- [8] Lim A. B. Y., Neo W. J., Yauw O., Chylak B., Gan C. L. & Chen Z. (2015). Evaluation of The Corrosion Performance of Cu-Al Intermetallic Compounds and The Effect of Pd Addition, *2015 IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC)*, pp. 1-5.
- [9] Babalola B., Bodunrin M., Borode J. & Alaneme K. (2013). Corrosion Characteristics of As-Cast Aluminium Bronze Alloy in Selected Aggressive Media, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1 (5), 245-249.
- [10] Krogstad H. N. & Johnsen R. (2017). Corrosion Properties of Nickel-Aluminium Bronze in Natural Seawater-Effect of Galvanic Coupling to UNS S31603, *Corrosion Science*, 121, 43-56.
- [11] Ateya, B. G., Ashour, E. A., & Sayed, S. M. (1994). Corrosion Of A-Al Bronze in Saline Water. *Journal of The Electrochemical Society*, 141(1), 71-78.
- [12] Cenoz I. (2011). Effect of Different Cooling Rates on The Microstructure of Cu-Al-Fe Alloy, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 50 (1) 80-84.
- [13] Tüfekçi T. (2019). *Cr ve Si Katkısı ile Modifiye Edilmiş Alüminyum Bronzlarının Tribolojisi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [14] Ünal M. (1999). *Alüminyum Bronzunda Farklı Katılma Hızlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [15] Kılınç M. (2021). *5083 Kalite Al Alaşımının Mekanik Özelliklerine Termomekanik Isıl İşleminin Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Araştırma Makalesi - Research Article

Toz Metalürjisi Yöntemi ile Üretilen 316L Östenitik Paslanmaz Çeliğin Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi

Investigation of Weldability of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Powder Metallurgy Method

Muhammed Elitaş^{1*}, Mehmet Akif Erden²

Geliş / Received: 25/06/2022

Revize / Revised: 01/09/2022

Kabul / Accepted: 08/09/2022

ÖZ

Bu çalışmada 600 MPa ve 700 MPa presleme basınçlarında toz metalürjisi yöntemi ile 316L östenitik paslanmaz çelikler üretilmiştir. Bu çeliklerin nokta direnç kaynak yöntemi uygulanarak kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Kaynaklı numunenin mikroyapısı optik mikroskopta detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca nokta direnç kaynak işlemi sonucunda oluşan esas metal, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak metali bölgelerinin sertlik değerleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, esas metal mikroyapısının ağırlıklı olarak östenit fazından oluştuğu görülmüştür. Nokta direnç kaynak işleminde meydana gelen yüksek ısı sebebiyle kaynak metalinin ağırlıklı olarak östenit matris içerisinde delta ferrit fazından oluştuğu gözlenmiştir. Esas metalden kaynak metaline doğru sertlik değerleri artış göstermiştir. Ayrıca 700 MPa presleme basıncında elde edilen numunenin farklı kaynak bölgelerinde ölçülen sertlik değerleri 600 MPa presleme basıncında elde edilen numuneye göre daha yüksek bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler- *Toz Metalürjisi, 316L, Nokta Direnç Kaynağı, Mikroyapı, Sertlik*

ABSTRACT

316L austenitic stainless steels were produced by powder metallurgy method at 600 MPa and 700 MPa pressing pressures in this study. The weldability of these steels was investigated by applying the resistance spot welding method. The microstructure of the welded sample was analyzed in detail with optical microscope. In addition, the hardness values of the base metal, heat-affected zone and weld metal regions formed as a result of resistance spot welding process were measured. Consequently, it was observed that the base metal microstructure was mainly composed of austenite phase. Due to the high heat occurring in resistance spot welding process, weld metal mainly consisted of delta ferrite phase in the austenite matrix. Hardness values increased from base metal to weld metal. Also, the hardness values measured in different welding regions of the sample obtained at 700 MPa pressing pressure were found to be higher than the sample obtained at 600 MPa pressing pressure.

Keywords- *Powder Metallurgy, 316L, Resistance Spot Welding, Microstructure, Hardness*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: muhammed.elitas@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5358-1783>)

Makine Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye

²İletişim: makiferden@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-1081-4713>)

Biomedikal Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

I. GİRİŞ

Toz metalurjisi (TM) genellikle otomotiv bileşenlerini imal etmek için kullanılır [1–3]. Örneğin, zamanlama dişlileri Fe esaslı bir toz alaşımından yapılır [4]. İmalat sürecinde toz bileşenlerin dövme alaşımlara birleştirilmesi kaçınılmazdır. Kaynak işlemi otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilen birleştirme işlemidir [5]. Genel olarak, otomotiv endüstrilerinde birleştirme için ultrasonik nokta kaynağı [6], geleneksel sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) [7,8], pinsiz SKNK [9], lazer nokta kaynağı [10] ve nokta direnç kaynağı (NDK) gibi çeşitli yaklaşımlar vardır [11]. NDK, bu birleşimlerin yapılması için en basit ve en yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemidir. Bu yöntem, otomotiv endüstrisinde anahtar teknolojidir [12]. Otomobiller binlerce NDK içerdiğinden nokta kaynağının kalitesi önemli bir konudur [13]. Bileşenlerin elektriksel direnci, ısı oluşumuna neden olur ve iş parçalarını elektrot basıncı altında birleştirir ve levhaların yüzey durumuna ve elektrot kuvvetine bağlıdır [14,15]. İş parçaları arasındaki akım, zaman ve direncin ısı miktarını kontrol ettiği gösterilmiştir [16].

Çelikler demir karbon alaşımı olup mühendislik malzemeleri arasında önemli yere sahiptir [17,18]. Çeliklerin bir çeşidi olan paslanmaz çelikler endüstride mekanik özelliklerinin ve korozyon dayanımlarının iyi olması sebebiyle tercih edilmektedir. Birçok alanda tercih edilen östenitik paslanmaz çeliklerin kaynaklanabilirliği endüstrinin dikkatini çekmektedir. 316L östenitik paslanmaz çeliğin farklı kaynak yöntemleri ile birleşimi ve bu kaynaklı birleşimlerin mikroyapı-mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine literatürde yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Sabzi ve Dezfuli [19] 316L paslanmaz çeliğin gaz tungsten ark kaynak yöntemi sırasında elektromanyetik titreşimle mekanik özelliklerindeki ve kaynaklanabilirliğindeki gelişimi incelemiştir. Skowronska vd. [20] 316L çeliğin sürtünme kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğini değerlendirmiştir. Huysmans vd. [21] eklemeli imalat (Eİ) ile elde edilen 316L paslanmaz çeliğin gaz tungsten ark kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğini araştırmıştır. Sampath vd. [22] Eİ 316L paslanmaz çeliğin korozyif ortamlarda kaynaklanabilirliğini incelemiştir. Matilainen vd. [23] ise Eİ 316L paslanmaz çeliğin lazer kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğini değerlendirmiştir.

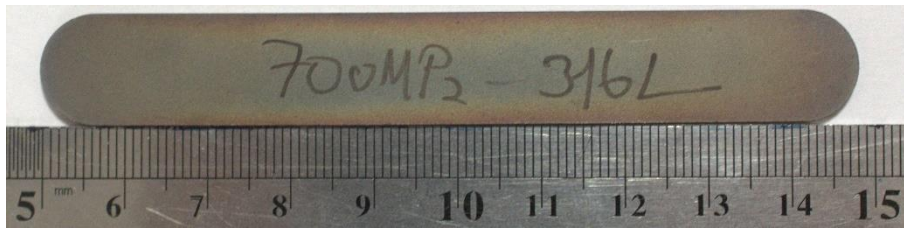
Bu çalışmada TM yöntemiyle farklı presleme basınçlarında üretilen 316L paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Literatürde temin edilen hazır 316L çeliklerin farklı kaynak yöntemleri ile kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Fakat bu çalışmanın orijinalliyi hazır 316L yerine TM yöntemi ile üretilen 316L östenitik paslanmaz çeliğin NDK ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesidir. Bu bağlamda TM 316L çeliğin NDK birleşiminin mikroyapısı ve sertliğine etkisi detaylıca araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

316L östenitik paslanmaz çelik tozu Höganäs firmasından temin edilmiştir. Tozun özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Tozlar 32 mm çaplı silindirik kalıp vasıtasıyla 600 MPa ve 700 MPa olmak üzere 2 farklı presleme basıncında Hidroliksan marka hidrolik tek pistonlu pres ile tek yönlü olarak preslenerek blok haline getirilmiştir. Sinterleme işlemi ise Protherm PTF 16/75/610 marka fırında 1200 °C’de 1 saat argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. TM yöntemiyle 700 MPa presleme basıncında üretilen 316L paslanmaz çeliğin resmi Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Temin Edilen 316L Paslanmaz Çelik Tozunun Özellikleri

Toz Boyutu (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)	% Saflık Değeri
<149	7,9	99,9



Şekil 1. TM Yöntemiyle 700mpa Presleme Basıncında Üretilen Numune Resmi

NDK işlemi Heron DN-80KVA'lık kaynak makinesinde ISO 5821 standartlarında 6 mm uç çaplı LUVATA marka A-TRODE bakır elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametreleri ve NDK birleşim bölgesi sırasıyla Tablo 2 ve Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2. NDK kaynak parametreleri

Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Süresi (ms)	Elektrot Kuvveti (daN)
6,5	180	2,1



Şekil 2. NDK Birleşim Bölgesi

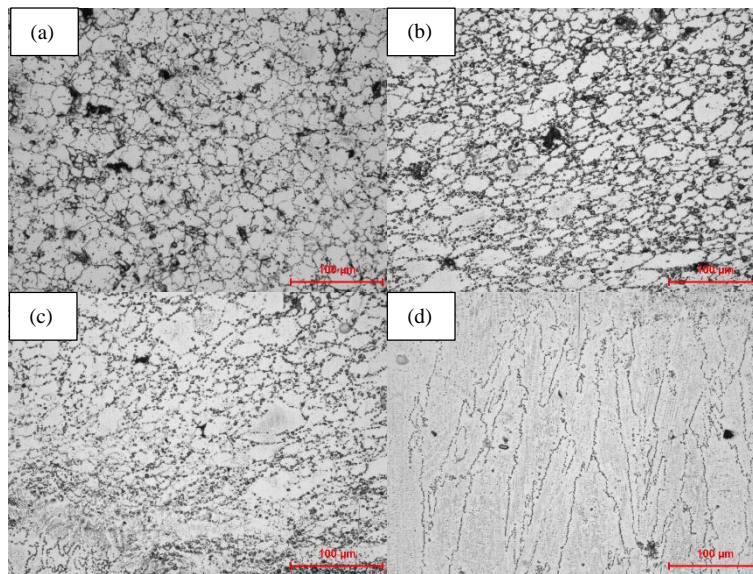
Birleşimin mikroyapısını incelemek için sırasıyla 120, 240, 360, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000 meshlik SiC zımparalar vasıtasıyla zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeyi, 3 µm ve 1 µm elmas pasta solüsyonları ile parlatılarak dağlama işlemine geçilmiştir. Dağlama işlemi kral suyu (3 ml HCL+1 ml HNO₃) kullanılarak 2 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir. Numune mikroyapısı Nikon Eclipse LV1500 marka optik mikroskop ile incelenmiştir.

Mikro sertlik deneyleri Vickers sertlik ölçüm cihazıyla esas metal (EM), ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak metali (KM) sırasıyla HV 0,5 yük 10 saniye süreyle uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 600 MPa ve 700 MPa presleme basınçlarında üretilen numuneler için ayrı ayrı uygulanmıştır.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. Mikroyapı

NDK işleminde oluşan yüksek ısı ve sonrasında hızlı soğuma neticesinde EM, ITAB ve KM bölgelerinde farklı mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 3'te sunulmuştur.

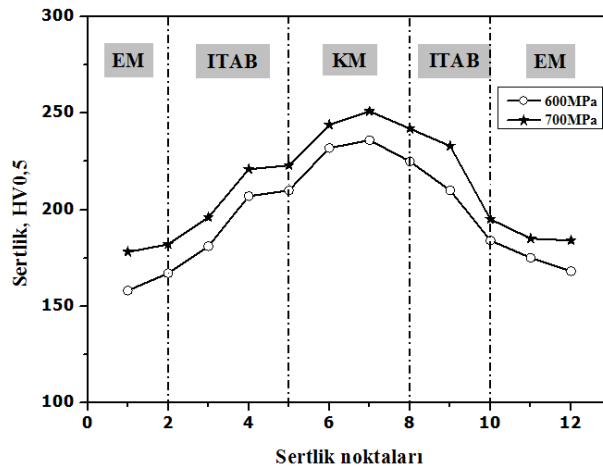


Şekil 3. NDK İşlemi Sonrası Oluşan Optik Mikroskop Görüntüleri a) EM b) EM-ITAB geçiş bölgesi c) ITAB d) KM

Şekil 3a'da EM mikroyapısının östenit faz yapısından oluştuğu görülmektedir. EM'den ITAB bölgesine doğru tane boyutu büyümüştür (Şekil 3b). ITAB bölgesi de östenit fazından oluşan mikroyapıya sahiptir (Şekil 3c). KM mikro yapısının diğer bölgelere göre farklı olduğu görülmektedir (Şekil 3d). Kaynak işlemi sırasında yüksek ısı girdisi meydana gelmektedir. Bu sebeple yapının ağırlıklı olarak delta ferrit fazından meydana geldiği gözlenmiştir. Literatürde 316L çeliğin KM mikro yapısının soğuma hızına bağlı östenit matrisin içinde çatsal, karıncalanma ve çıta tipi morfolojiye sahip delta ferrit fazlarından oluştuğu bildirilmiştir [24, 25]. Östenit fazı içerisinde bulunan delta ferrit fazı özellikle katılma çatlamasına olan direnci arttırmaktadır. Birleşimde mikro boşluk ve porozite gibi hatalar gözlenmemiştir. TM yöntemiyle üretilen 316L östenitik paslanmaz çeliğin NDK yöntemiyle uygun kaynak parametrelerinde başarılı bir şekilde birleştirilebileceği görülmüştür.

B. Mikrosertlik

600 MPa ve 700 MPa presleme basınçlarında TM yöntemiyle üretilen 316L östenitik paslanmaz çeliklerin EM, ITAB ve KM bölgelerinde eksenlere paralel doğrultuda ölçülen sertlik değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Numunelerin Sertlik Profili

Şekil 4 incelendiğinde presleme basıncının artması ile sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Presleme basıncı arttıkça üretilen parçanın yoğunluğu artmaktadır. Yoğunluk artışı ile parça içerisindeki gözenek miktarının azalması sertlik değerlerinin artmasına sebep olmaktadır [26]. Sertlik değerlerinin EM'den KM'e doğru arttığı görülmektedir. EM'den KM'e doğru NDK işleminde meydana gelen yüksek ısı girdisi sebebiyle sertlik değerlerinin artış gösterdiği literatürde belirtilmiştir [27–31]. KM'de EM'e göre sertlik değerinin artmasının önemli bir sebebi NDK işleminde meydana gelen hızlı soğuma ve katılma sonucunda oluşan KM'nin ince taneli mikroyapısıdır. Kwok vd. [32], Sathiya ve Jaleel [33] ince taneli KM'nin sertlik artışına sebep olduğunu bildirmişlerdir.

IV. SONUÇLAR

600 MPa ve 700 MPa presleme basınçlarında preslenip 1200 °C'de 1 saat argon atmosferinde sinterlenerek TM yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen numunelerin kaynaklanabilirliğinin incelendiği bu çalışmada ulaşılan sonuçlar aşağıda bildirilmiştir;

1. TM yöntemiyle üretilen 316L östenitik paslanmaz çeliğin NDK yöntemiyle kaynaklanabilir olduğu görülmüştür.
2. EM'den KM'e doğru mikroyapısal değişimler meydana gelmiştir. EM'nin östenit fazından, ITAB bölgesinin EM'e göre tane boyutu nispeten daha büyük östenit fazından, KM'nin ise ağırlıklı olarak delta ferrit fazından oluştuğu gözlenmiştir.
3. Presleme basıncı arttıkça yoğunluğun artması ve gözenek miktarının azalması sebebiyle sertlik değerleri artmıştır.
4. NDK işleminde meydana gelen yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma sonucunda sertlik değerleri EM'den KM'e doğru artış göstermiştir.

5. KM'nin EM'e göre nispeten ince taneli mikroyapısı sertlikte artışa sebep olmuştur.

TEŞEKKÜR

Kaynak işleminin gerçekleştirilmesinde katkı sağlayan ALBAKSAN MAKİNE ve Ayhan YILMAZ'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Neystani, R., Beidokhti, B., & Amelzadeh, M. (2019). Fabrication of Dissimilar Fe-Cu-C Powder Metallurgy Compact/Steel Joint Using the Optimized Resistance Spot Welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 200–206.
- [2] Ahssi, M.A.M., Erden, M.A., Acarer, M., & Çuğ, H. (2020). The Effect of Nickel on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Properties of Niobium–Vanadium Microalloyed Powder Metallurgy Steels. *Materials*, 13, 4021.
- [3] Erden, M.A., & Aydın, F. (2021). Wear and Mechanical Properties of Carburized AISI 8620 Steel Produced by Powder Metallurgy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 430–439.
- [4] Funatani, K. (2004). Heat Treatment of Automotive Components: Current Status and Future Trends. *Trans Indian Inst Met*, 57, 381–396.
- [5] Ramazan, E., & Esener, E. (2017). Gaz Altı Ark Kaynağı İşleminde Proses Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4, 30–35.
- [6] Wang, T., Shukla, S., Frank, M., & Mishra, R.S. (2019). Evolution of Bond Formation and Fracture Process of Ultrasonic Spot Welded Dissimilar Materials. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24, 171–177.
- [7] Haghshenas, M., & Gerlich, A.P. (2018). Joining of Automotive Sheet Materials by Friction-Based Welding Methods: A Review. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21, 130–148.
- [8] Güney, B. (2022). *Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği. Güncel Multidisipliner Teknik Araştırmalar*. SRA, Klaipeda, 1-20.
- [9] Yazdi, S.R., Beidokhti, B., & Haddad-Sabzevar, M. (2019). Pinless Tool For FSSW of AA 6061-T6 Aluminium Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 267, 44–51.
- [10] Kundu, J., Ray, T., Kundu, A., & Shome, M. (2019). Effect of the Laser Power on the Mechanical Performance of the Laser Spot Welds in Dual Phase Steels. *Journal of Materials Processing Technology* 267, 114–123.
- [11] Li, T., Yuan, X., Hu, Z., Wu, K., Wang, H., & Zhang, B. (2018). Dissimilar Resistance Spot Welding of DP 600/A5052/DP 600 Triple Sheets. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19, 1673–1679.
- [12] Thakur, A.G., & Nandedkar, V.M. (2010). Application of Taguchi Method to Determine Resistance Spot Welding Conditions of Austenitic Stainless Steel AISI 304. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 69, 680-683.
- [13] Jia, Q., Liu, L., Guo, W., Peng, Y., Zou, G., Tian, Z., & Zhou, Y. N. (2018). Microstructure and Tensile-Shear Properties of Resistance Spot-Welded Medium Mn Steel. *Metals*, 8, 48.
- [14] Vignesh, K., Elaya Perumal, A., & Velmurugan, P. (2017). Optimization of Resistance Spot Welding Process Parameters and Microstructural Examination for Dissimilar Welding of AISI 316L Austenitic Stainless Steel and 2205 Duplex Stainless Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 455–465.
- [15] Güney, B., & Öz, A. (2020). *Kaynağın Katılma Mekanizması. Mühendislik ve Fen Bilimlerinde Yeni Gelişmeler*. SRA, Klaipeda, 85-124.
- [16] Eşme, U. (2009). Application of Taguchi Method for the Optimization of Resistance Spot Welding Process. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 34, 519-528.
- [17] Güney, B. (2021). Microstructure Analysis of Welding Fume of Low And Medium Carbon Steels. *Revista de Metalurgia*, 57, 187.
- [18] Güney, B., Dilay, Y., Solomon, M.M., Gerengi, H., Özkan, A., & Yıldız, M. (2022). Corrosion Characteristics of Plasma Spray, Arc Spray, High Velocity Oxygen Fuel, and Diamond Jet Coated 30MnB5 Boron Alloyed Steel in 3.5 Wt.% NaCl Solution. *Corrosion Reviews*, 40, 51–63.
- [19] Sabzi, M., & Dezfali, S. M. (2018). Drastic Improvement in Mechanical Properties and Weldability of 316L Stainless Steel Weld Joints by Using Electromagnetic Vibration During GTAW Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 33, 74–85.

- [20] Skowrońska, B., Chmielewski, T., Pachla, W., Kulczyk, M., Skiba, J., & Presz, W. (2019). Friction Weldability of UFG 316L Stainless Steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 64, 1051-1058.
- [21] Huysmans, S., Peeters, E., De Bruycker, E., & De Prins, K. (2021). Weldability Study of Additive Manufactured 316L Austenitic Stainless Steel Components—Welding of AM With Conventional 316L Components. *Welding in the World*, 65, 1415–1427.
- [22] Sampath, V.K., Silori, P., Paradkar, P., Niauzorau, S., Sharstniou, A., Hasib, A., Villalobos, S., & Azeredo, B. (2022). 3D Printing of Stainless Steel 316L and Its Weldability for Corrosive Environments. *Materials Science and Engineering: A*, 833, 142439.
- [23] Matilainen, V. P., Pekkarinen, J., & Salminen, A. (2016). Weldability of Additive Manufactured Stainless Steel. *Physics Procedia*, 83, 808–817.
- [24] Ventrella, V. A., Berretta, J. R., & De Rossi, W. (2010). Pulsed Nd: YAG Laser Seam Welding of AISI 316L Stainless Steel Thin Foils. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1838–1843.
- [25] Dadfar, M., Fathi, M. H., Karimzadeh, F., Dadfar, M. R., & Saatchi, A. (2007). Effect of TIG Welding on Corrosion Behavior Of 316L Stainless Steel. *Materials Letters*, 61, 2343–2346.
- [26] Erden, M. A. (2017) Presleme Basıncının Toz Metalürjisi ile Üretilen Alaşımız Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6, 257–264.
- [27] Pal, T. K., & Bhowmick, K. (2012). Resistance Spot Welding Characteristics and High Cycle Fatigue Behavior Of DP 780 Steel Sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 280–285.
- [28] Ma, C., Chen, D. L., Bhole, S. D., Boudreau, G., Lee, A., & Biro, E. (2008). Microstructure and Fracture Characteristics of Spot-Welded DP600 Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 485, 334–346.
- [29] Khan, M. I., Kuntz, M. L., Biro, E., & Zhou, Y. (2008). Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels. *Materials Transactions*, 49, 1629-1637.
- [30] Holovenko, O., Ienco, M. G., Pastore, E., Pinasco, M. R., Matteis, P., Scavino, G., & Firrao, D. (2013). Microstructural and Mechanical Characterization of Welded Joints on Innovative High-Strength Steels. *La Metallurgia Italiana*, 3, 3-12.
- [31] Gould, J. E., Khurana, S. P., & Li, T. (2006). Predictions of Microstructures When Welding Automotive Advanced High-Strength Steels. *Welding Journal*, 85, 111-116.
- [32] Kwok, C. T., Fong, S. L., Cheng, F. T., & Man, H. C. (2006). Pitting and Galvanic Corrosion Behavior of Laser-Welded Stainless Steels. *Journal of materials processing technology*, 176, 168–178.
- [33] Sathiya, P., & Jaleel, M. A. (2010). Measurement of the Bead Profile and Microstructural Characterization of a CO₂ Laser Welded AISI 904 L Super Austenitic Stainless Steel. *Optics & Laser Technology*, 42, 960–968.

Araştırma Makalesi-Research Article

SQAM Kullanan Bina-içi Enerji Hattı İletişim Sistemleri Üzerine Bir Analiz

An Analysis on Indoor Power Line Communication Systems Using SQAM

Ömer Faruk Akdemir¹, Mehmet Bilim^{2*}

Geliş / Received: 18/07/2022

Revize / Revised: 01/12/2022

Kabul / Accepted: 01/12/2022

ÖZ

Bu çalışma, enerji hattı haberleşmesi (power line communication, PLC) sağlayan bağlantılar için kare dördün genlik modülasyonu (square quadrature amplitude modulation, SQAM) ile performans analizini sunmaktadır. Yapılan analizde, ele alınan sistem modeline ait alıcı uçtaki anlık işaret gürültü oranının (signal to noise ratio, SNR) olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) kullanılmıştır. Analizler sonucunda yaklaşık bir hata ifadesi türetilmiştir. Türetilen hata ifadesi yardımıyla, sistem parametrelerinin değişimlerinin hata performansına olan etkileri incelenmiştir. Verilen eğrilerde, analitik sonuçlar ile tam nümerik (simülasyon) sonuçlarının birbiriyle uyumlu olması yapılan analizin doğruluğunu onaylamaktadır.

Anahtar Kelimeler- *Enerji Hattı Haberleşmesi, Kare Dördün Genlik Kipleme, Hata Performansı*

ABSTRACT

This paper presents the performance analysis with square quadrature amplitude modulation for powerline communication links. In the analysis, the probability density function (PDF) of the instantaneous signal-to-noise ratio (SNR) at the end of receiver for the system model under consideration was used. As a result of the analysis, an approximate error expression was derived. With the help of the derived error expression, the effects of the changes in the system parameters on the error performance are examined. In the error curves, the compatibility of the analytical results with the exact numerical (simulation) results confirms the accuracy of the analysis.

Keywords- *Power Line Communication, Square Quadrature Amplitude Modulation, Error Performance*

¹İletişim: omerfarukakdemir@outlook.com (<https://orcid.org/0000-0003-0962-8198>)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: mbilim@nny.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2518-3125>)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kayseri, Türkiye

I. GİRİŞ

Enerji iletim haberleşmesi (power line communication, PLC), hali hazırda şebeke bağlantılarını kullanması ve yapay zeka destekli iletişim mimarisinde yoğun bir şekilde kullanılacağı öngörülmesi sebebiyle son dönemlerde oldukça popüler bir konu olmuştur [1]. Bundan dolayı araştırmacılar, PLC ile ilgili bazı güncel çalışmalar ile literatüre katkıda bulunmuşlardır [2-13]. [2]'deki sunulan çalışmada, fiziksel katman güvenliği ve kanal gürültü cevabının çok seviyeli niceleme ile birlikte PLC konuları ele alınmıştır. [3]'teki yazarlar, kaskat H köprülü dönüştürücüler ile PLC sistemlerinde eş zamanlı güç ve dijital veri iletiminin detaylarını açıklamışlardır. Güvenilir düşük veri hızlı PLC sistemleri için dağılmış yük kontrol tekniğinin detayları [4]'teki çalışmada verilirken, PLC sistemleri için fiziksel katmanlı gizli anahtar oluşturma yöntemi [5]'te sunulmaktadır. İki atlamalı karma PLC/RF iletim sistemlerinin performans analizlerinin adımları ve elde edilen ifadeler ile ilgili sonuçlar, [6]'daki çalışmada verilmektedir. Dikgen olmayan çoklu erişim sistemlerini kullanan PLC sistem modeline ait gizlilik kesinti analizi [7]'de gerçekleştirilmiştir. Çok-girişli çok-çıkışlı PLC sistemlerinde dikgen frekans bölmeli çoğullamanın uzay zamanlı paralel taşıyıcılar arası girişimini bastırmanın bit hata oranı performansı [8]'deki çalışmada sunulmaktadır. [9]'daki çalışmada ise PLC kanal modeline ait yeni bir matematiksel tanımlama ve bu tanımlama kullanılarak görünür ışık haberleşmesinin iki atlamalı bir biçimde PLC sistemleri ile kullanımına ait performans analizleri verilmiştir. [10]'daki çalışmada ise dürtüsel gürültünün etkisini PLC sistemlerinde azaltmak için ön kodlama işleminin kullanılabilirliği izah edilirken, [11]'de verilen çalışmada ise PLC sistemlerinde çapraz dördün genlik modülasyonunun (cross quadrature amplitude modulation, XQAM) performansı incelenmiştir. [12]'de, yazarlar üç düğümlü ve iki yollu röle destekli bir PLC sistemi için güç optimizasyonu ele almışlardır. [13]'te sunulan çalışmada, kırmık yayma spektrumlu modülasyon çeşidinin PLC sistemlerinde sergilemiş olduğu performans sunulmaktadır.

Öte yandan veri hızı haberleşmede önemli bir kıstas olup, sistem performansı açısından kritik bir yere sahiptir. Bunun için kare dördün genlik modülasyonu (square quadrature amplitude modulation, SQAM) iyi bir çözüm olup, farklı sistem modellerinde kullanılabilir [14-17]. Bundan dolayı PLC sistemleri için SQAM analizi [9]'da önerilen kanal modeli kullanılarak literatürde, yazarların bildiği kadarıyla, sunulmamıştır. Literatür taramasında bu çalışmada sunulan benzer şekilde herhangi bir SQAM analizi [9]'daki kanal modelini kullanarak PLC sistemlerinde yapılmamıştır. Bu noktadan hareketle, literatürdeki bu eksiklik yazarlar tarafından bu çalışma ile katkı sağlanarak giderilmeye çalışılmaktadır. Tek-girişli tek-çıkışlı (single-input single-output, SISO) bir PLC sistemin SQAM tekniği ile hata analizi alıcı uçtaki anlık işaret gürültü oranının (signal to noise ratio, SNR) olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Yapılan analiz sonucunda yaklaşık bir hata ifadesi elde edilmiş olup, türetilen yaklaşık hata ifadesine bağlı olarak bazı hata eğrileri nümerik sonuçlar bölümünde sunulmuştur. Farklı sistem parametreleri ve tam nümerik (simülasyon) sonuçları ile bu sonuç grafikleri verilmiştir.

II. SİSTEM VE KANAL MODELLERİ

Bu çalışmada, SISO yapıya sahip bir bina-içi PLC sistemi ele alınmaktadır. Burada sistem modeli, mevcut bina-içi enerji hatlarını kullandığından herhangi bir ek masrafa ihtiyaç duymadan kanal ortamı hazırdır. Bina-içi enerji hatları için literatürde farklı kanal modelleri önerilmiştir. Ancak bu modeller arasında [9]'daki kanal modeli son zamanlarda güncel olarak önerilmiştir ve popüler bir kanal modelidir. Bu sebeple, bu makalede bina-içi SISO PLC şeması için [9]'da önerilen modelin kullanılması tercih edilmiştir. Buna göre, ele alınan sistem için alıcı uçta anlık SNR'nin PDF ifadesi şu şekildedir [9]:

$$f_{\gamma_{PLC}}(\gamma) = Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \quad (1)$$

Burada

$$Q_1 = (1 - PI) U_1 \quad (2)$$

$$Q_2 = PI U_2 \quad (3)$$

$$U_1 = \frac{(\zeta_1)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \quad (4)$$

$$U_2 = \frac{(\zeta_2)^{m_2}}{\Gamma(m_2)} \quad (5)$$

$$\zeta_1 = m_1 / \Omega_1 \quad (6)$$

$$\zeta_2 = m_2 / \Omega_2 \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. PI impuls etkili gürültü (impulsive noise, IN) olasılığını belirtmekte ve $PI = \lambda T$ 'dir. λ şemadaki saniyelik birimi, T IN'ye ait zamanı tanımlamaktadır. $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonu, m_1 ve m_2 ele alınan sistemdeki kanalın gölgeleme parametreleridir. $m_1 = (e^{(\sigma_1)^2} - 1)^{-1}$ ve $m_2 = (e^{(\sigma_2)^2} - 1)^{-1}$ olarak formüle edilmektedir. Burada $\sigma_1 = \sigma_2 = 2\tau$ şeklinde belirtilirken, τ kanal katsayısı olan h değerinin ortalamasıdır. Ω_1 ve Ω_2 ise güç ifadelerine ait ortalamalardır ve $\Omega_1 = e^{\tau_1} \sqrt{((1+m_1)/m_1)}$, $\Omega_2 = e^{\tau_2} \sqrt{((1+m_2)/m_2)}$ biçiminde tanımlanmaktadır. Ayrıca $\tau_1 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_1$, $\tau_2 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_2$ şeklinde ifade edilirken $\bar{\gamma}_1$ yalnızca arka plan gürültü (background noise, BN) durumundaki SNR'nin ortalamasıdır ve $\bar{\gamma}_1 = \frac{E_b}{\sigma_G^2}$ biçiminde ifade edilmektedir. E_b işaret enerjisine ait bilgiyi ve σ_G^2 toplam gürültü varyans tanımlamasını ifade etmektedir. $\bar{\gamma}_2$ ise IN ve BN etkilerinin her ikisi de var iken ortalama SNR'yi tanımlamaktadır ve $\bar{\gamma}_2 = \frac{E_b}{(o+1)\sigma_G^2}$ biçimindedir. $\bar{\gamma}_2$ ifadesinde $o = \frac{\sigma_I^2}{\sigma_G^2}$ biçiminde olup, σ_I^2 ise IN'nin varyansını belirtmektedir [9]. Bu çalışmada PDF temelli hata performans incelemesi yapılacağından denklem (1)'deki PDF ve devamındaki tanımlamalardan faydalanılacaktır. Böylelikle, literatürde ilk kez, [9]'daki PLC kanal modeli kullanılarak SQAM hata analizinin bu çalışma ile yapılması hedeflenmektedir.

III. HATA ANALİZİ

Bu bölümde, SISO PLC bir sistemin SQAM hata analizi, PDF temelli yaklaşım ile gerçekleştirilmektedir. Buradan hareketle

$$P_e = \int_0^{\infty} p(e|\gamma) f_{\gamma_{PLC}}(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (8)'deki integralin $p(e|\gamma)$ ve $f_{\gamma_{PLC}}(\gamma)$ sırasıyla koşullu hata olasılığı ve PDF ifadesi olmak üzere iki adet bileşeni mevcuttur. Burada PDF ifadesi, eşitlik (1)'de verilmiştir. SQAM için $p(e|\gamma)$ ifadesi [14]

$$p(e|\gamma) = 4\Delta Q(\sigma\sqrt{\gamma}) - 4\Delta^2 Q^2(\sigma\sqrt{\gamma}) \quad (9)$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Burada $Q(\cdot)$, Gauss fonksiyonudur ve $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$ olarak ifade edilmektedir. $Q(x)$ 'teki $\operatorname{erfc}(\cdot)$, hata fonksiyonudur. Eşitlik (9) için $\Delta = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)$ ve $\sigma = \sqrt{\frac{3}{M-1}}$ biçiminde olup, M modülasyon seviyesidir. Eşitlik (9)'daki koşullu hata ifadesi, hata fonksiyonu cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$p(e|\gamma) = 2\Delta \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) - \Delta^2 \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \right) \quad (10)$$

Eşitlik (10) veya (9) ile verilen ifadelerden biri ve eşitlik (1), eşitlik (8)'de yerine yazılırsa

$$P_{e_SQAM} = \int_0^{\infty} \left[2\Delta \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) - \Delta^2 \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \right) \right] \left[Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \right] d\gamma \quad (11)$$

$$P_{e_SQAM} = \int_0^{\infty} \left[4\Delta Q(\sigma\sqrt{\gamma}) - 4\Delta^2 Q^2(\sigma\sqrt{\gamma}) \right] \left[Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \right] d\gamma$$

elde edilir. Eşitlik (11)'de verilen ifadeleri çözüme kavuşturmak matematiksel açıdan oldukça zahmetlidir. Bu sebeple, literatürde sıklıkla başvuru alan $Q(\cdot)$ 'li terimler için üst sınır yaklaşımı yönteminden faydalanılmaktadır. Literatürde en temel ve kullanımı yaygın olan üst sınır yaklaşımlarından bir tanesi Chernoff yaklaşıklığıdır. Bu sebeple bu yaklaşıklık

$$Q(x) \approx \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (12)$$

olarak tanımlanmaktadır [18]. Bu yaklaşıklık birçok çalışmada kullanılmıştır [15-17]. Buna göre, eşitlik (9)'daki $p(e|\gamma)$ ifadesindeki $Q(\cdot)$ 'li terimler sırasıyla şu şekilde yazılabilir:

$$Q(\sigma\sqrt{\gamma}) \approx \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\gamma} \quad (13)$$

$$Q^2(\sigma\sqrt{\gamma}) \approx \frac{1}{4} e^{-\sigma^2\gamma} \quad (14)$$

Buradan hareketle, eşitlik (13) ve (14), eşitlik (9)'da yerine konulursa

$$p(e|\gamma) \approx 2\Delta e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\gamma} - \Delta^2 e^{-\sigma^2\gamma} \quad (15)$$

olarak yeniden elde edilir. Eşitlik (15) ve (1), (8)'de yerine yazılırsa

$$P_{e_SQAM} \approx \int_0^{\infty} \left[2\Delta e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\gamma} - \Delta^2 e^{-\sigma^2\gamma} \right] \left[Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \right] d\gamma \quad (16)$$

elde edilir. Eşitlik (16) yeniden düzenlendiğinde

$$P_{e_SQAM} \approx 2\Delta Q_1 J_1 - \Delta^2 Q_1 J_2 + 2\Delta Q_2 J_3 - \Delta^2 Q_2 J_4 \quad (17)$$

olarak yazılabilmektedir. Q_1 ve Q_2 eşitlik (2) ve (3)'te tanımlanmıştır. Burada

$$J_1 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_1-1} e^{-\gamma\left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_1\right)} d\gamma \quad (18)$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_1-1} e^{-\gamma(\sigma^2 + \zeta_1)} d\gamma \quad (19)$$

$$J_3 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_2-1} e^{-\gamma\left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_2\right)} d\gamma \quad (20)$$

$$J_4 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_2-1} e^{-\gamma(\sigma^2 + \zeta_2)} d\gamma \quad (21)$$

biçimindedir. Eşitlik (18)-(21)'de verilen integraller bir adet polinom ve bir adet üstel terim içermektedir. Bu integrallerin çözümü [19, eşitlik (3.381.4)] ifadesi kullanılarak elde edilebilmektedir. Böylelikle

$$J_1 = \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_1 \right)^{-m_1} \Gamma(m_1) \quad (22)$$

$$J_2 = (\sigma^2 + \zeta_1)^{-m_1} \Gamma(m_1) \quad (23)$$

$$J_3 = \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_2\right)^{-m_2} \Gamma(m_2) \quad (24)$$

$$J_4 = (\sigma^2 + \zeta_2)^{-m_2} \Gamma(m_2) \quad (25)$$

olarak elde edilir. Burada $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonudur [19]. Eşitlik (22)-(25)'de verilen ifadeler eşitlik (17)'de yerine konulursa

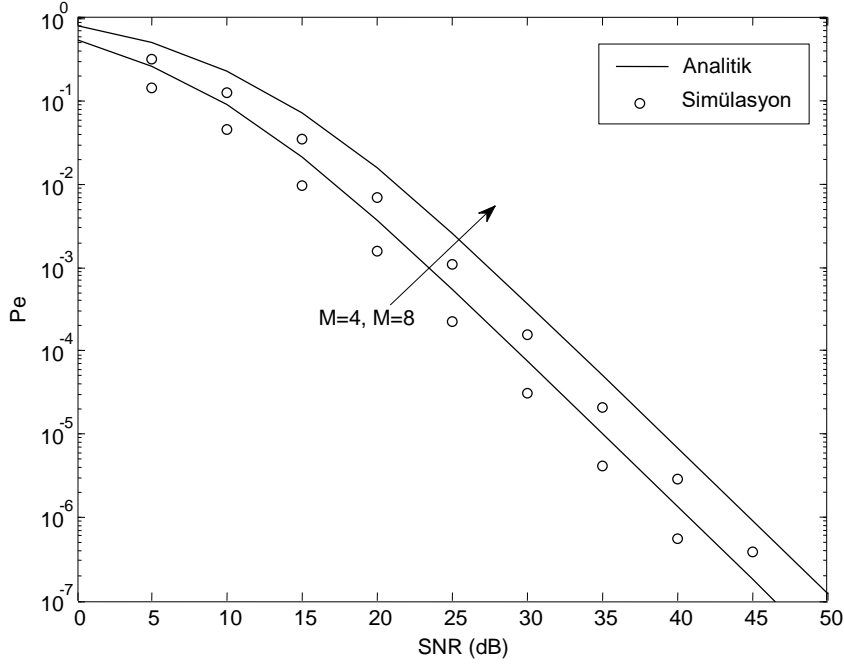
$$P_{e_SQAM} \approx 2\Delta Q_1 \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_1\right)^{-m_1} \Gamma(m_1) - \Delta^2 Q_1 (\sigma^2 + \zeta_1)^{-m_1} \Gamma(m_1) \\ + 2\Delta Q_2 \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_2\right)^{-m_2} \Gamma(m_2) - \Delta^2 Q_2 (\sigma^2 + \zeta_2)^{-m_2} \Gamma(m_2) \quad (26)$$

şeklinde türetilir.

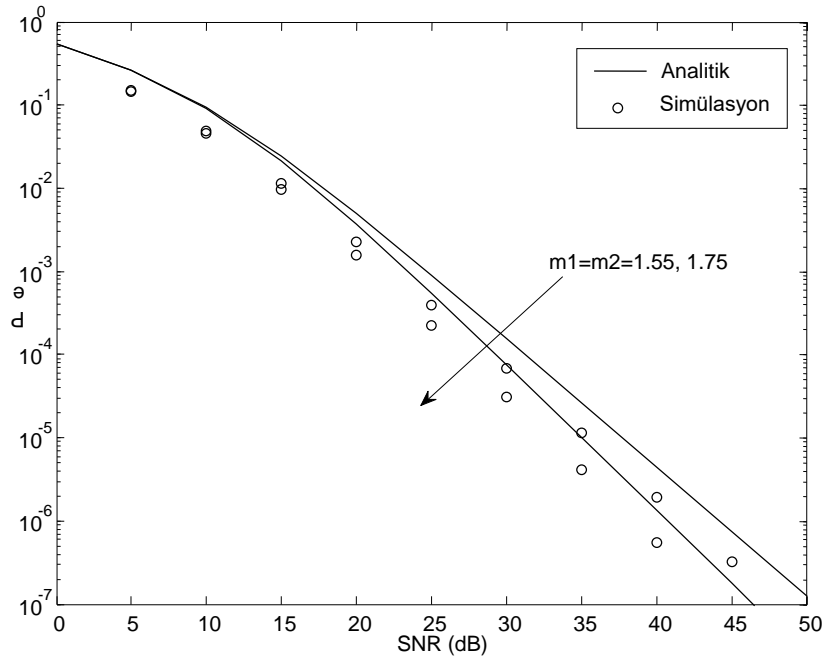
IV. BULGULAR

Bu bölümde, SQAM kullanan bir SISO bina-içi PLC sistemin hata analizleri ile ilgili çeşitli hata performans eğrileri sunulmaktadır. Bir önceki bölümde yapılan analiz sonucunda türetilen yaklaşık hata ifadesinin doğruluğu tam nümerik bilgisayar simülasyonları ile kıyaslamalı olarak verilerek izah edilmektedir. İlk grafik olan Şekil 1'de sistem parametreleri şu şekildedir: $m_1 = m_2 = 1.75$, $PI = 0.2$ ve $o = 5$. Şekil 1'de farklı M seviyelerinin hata performansına olan etkisi incelenmektedir. Burada M seviyesi arttıkça performansın literatüre uygun bir şekilde azaldığı görülmektedir. Buradaki sisteme rakip olabilecek literatürdeki çalışmalardan [11]'de sunulan çalışma dikkate alındığında, PLC sistemlerine XQAM uygulamasının yapıldığı görülmektedir. XQAM için [11]'de verilen Şekil 1'deki farklı XQAM seviyeli modülasyonlar için verilen performans eğrilerinden burada sunulan eğrilerin daha iyi olduğu görülmektedir. Örnek vermek gerekirse, 10^{-3} 'lük bir hata performansı için [11]'deki sistemde yaklaşık 28 ve 34 dB'lik SNR gerekli iken, buradaki sistemde ise yaklaşık 21 ve 26 dB'lik SNR gerekmektedir. Bu durum ise bu çalışmada sunulan sistem modelinin [11]'deki sistem modeline göre yaklaşık 7-8 dB'lik kazancının olduğunu göstermektedir. Bir diğer sonuçta ise PLC kanalları için gölgeleme parametre değerlerinin etkisi incelenmektedir. Burada sistem için gerekli olan parametreler şu şekilde ayarlanmıştır: $M=4$, $PI = 0.2$ ve $o = 5$. Şekil 2'den de görüldüğü üzere, $m_1 = m_2 = 1.55$ 'ten $m_1 = m_2 = 1.75$ 'e arttırıldığında hata performansı iyileşmektedir. Bunun da sebebi, PLC kanal ortamındaki şartların gölgeleme parametresinin artmasıyla birlikte iyileşmesidir. Bu sebeple, hata performansı özellikle 15 dB sonrasında $m_1 = m_2 = 1.75$ olduğu durumda $m_1 = m_2 = 1.55$ olduğu duruma kıyasla, daha belirgin bir şekilde iyileştiği görülmektedir. İncelenen son analiz sonuçları da Şekil 3'te verilmektedir.

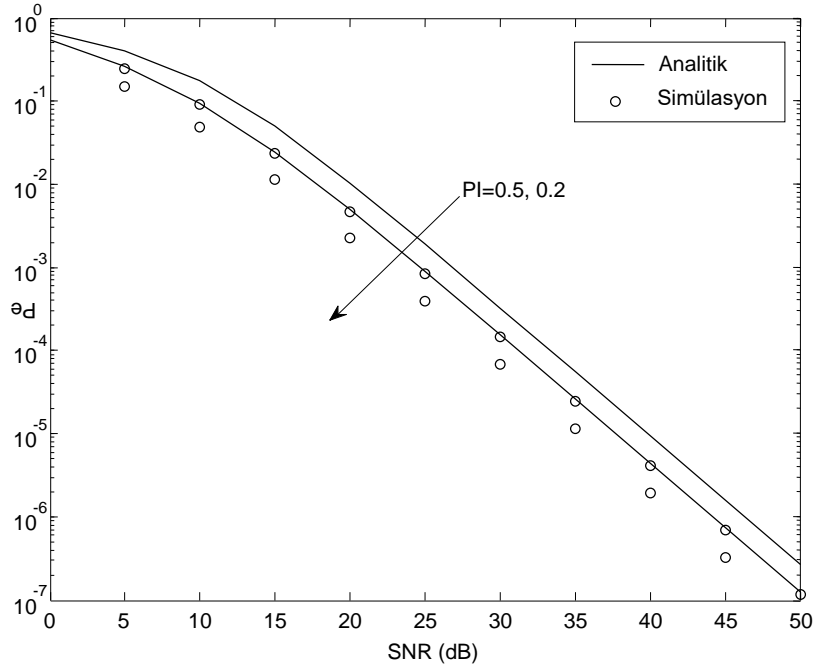
Şekil 3 için SISO bina-içi PLC sistemin parametre ayarlamaları $m_1 = m_2 = 1.55$, $M=4$ ve $o = 5$ biçimindedir. Burada IN'in oluşma olasılığı olan PI parametresinin değişiminin sistem performansına olan etkisi incelenmiştir. $PI=0.5$ olduğu durum ile $PI=0.2$ olduğu durum kıyaslandığında 0.5 olduğu durumun beklenildiği gibi daha kötü olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü, IN durumunun 0.5 olasılıkla oluşma durumu 0.2 olasılıkla oluşma durumuna göre daha fazladır. Bu da IN'in olumsuz etkisinin ele alınan sistem üzerinde gösterdiği bir netice olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 1. SISO Bina-İçi PLC Bir Sistemin Farklı M Seviyesi İçin Hata Performans Eğrileri



Şekil 2. SISO Bina-İçi PLC Bir Sistemin Farklı Gölgeleme Parametreleri İçin Hata Performans Eğrileri



Şekil 3. SISO Bina-İçi PLC Bir Sistemin Farklı PI Değerleri İçin Hata Performans Eğrileri

Şekil 1-3'te verilen sonuçların hepsinde, analitik ile nümerik tam simülasyon sonuçlarının benzer bir trend ve iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Yapılan analizde, hata ifadesi türetilirken Chernoff üstel üst sınır yaklaşımı kullanılmıştır. Bu sebeple, analitik sonuçlar tam nümerik simülasyon sonuçlarının üst tarafından yaklaşım göstermektedir. Bu durum da ayrıca yapılan analizin doğruluğunu farklı bir açıdan ortaya koymaktadır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışma, SISO bir PLC sistemin SQAM kullanılması durumunda hata analizini sunmaktadır. Sunulan hata analizinde PDF temelli yaklaşım kullanılmış, yaklaşık bir hata ifadesi elde edilmiştir. Bütün nümerik sonuçlardaki analitik sonuçlar, elde edilen yaklaşık hata ifadesinden faydalanılarak elde edilmiştir. PLC sistemindeki ve SQAM modülasyonundaki farklı parametre değişimleri ile farklı hata performansları gösterilmeye çalışılmıştır. Sunulan bütün sonuçlarda, analitik sonuçlar ile tam nümerik (simülasyon) sonuçlarının iyi bir uyum içerisinde olduğunu söylemek mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] Kabalcı, Y. (2016). A Survey On Smart Metering and Smart Grid Communication, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 302-318.
- [2] HernandezFernandez, J. Omri A. & Pietro, R. D. (2022). Channel Impulse Response Multi Level Quantization for Power Line Communications, *IEEE Access*, 10, 66113-66126.
- [3] Mandourarakis, I. Koutroulis E. & Karystinos, G. N. (2022). Power Line Communication Method for The Simultaneous Transmission Of Power and Digital Data by Cascaded *H*-Bridge Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37, 10, 12793-12804.
- [4] Aderibole, A. O. Kircher, K. J. Leeb S. B. & Norford, L. K. (2022). Distributed Load Control Using Reliable Low-Data-Rate Power Line Communication, *IEEE Access*, 10, 50242-50253.
- [5] Zhang, J. Liu, X. Cui Y. & Xu, D. (2022). Physical-Layer Secret Key Generation in Power Line Communication Networks, *IEEE Access*, 10, 48539-48550.
- [6] Yang, L. Yan, X. Li, S. da Costa D. B. & Alouini, M. -S. (2022). Performance Analysis of Dual-Hop Mixed PLC/RF Communication Systems, *IEEE Systems Journal*, 16, 2, 2867-2878.
- [7] Ahiadormey, R. K. Anokye, P. Jo, H. -S. Song C. & Lee, K. -J. (2021). Secrecy Outage Analysis in NOMA Power Line Communications, *IEEE Communications Letters*, 25, 5, 1448-1452.

- [8] Fadaei Tehrani, A. YehH. -G. & Kwon,S. -C. BER Performance of Space–Time Parallel ICI Cancellation of OFDM in MIMO Power Line Communications, *IEEE SystemsJournal*, 15, 2, 1742-1752.
- [9] Jani,M. GargP. & Gupta,A. (2020). Performance Analysis of a Mixed Cooperative PLC–VLC System for Indoor Communication Systems, *IEEE SystemsJournal*, 14, 1, 469-476.
- [10] Ge H., Sun S., Dai X. & Tian H., (2022). Mitigating the Effect of Impulsive Noise in Power Line Communications with Preprocessing, 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), 2022, pp. 462-465.
- [11] Akdemir O.F. & Bilim M., (2022). Indoor Power Line Communication with XQAM Signaling, 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2022, pp. 1-4.
- [12] Liong A.G.A., Gopal L., RongY., Juwono F. H. & Chiong C.W.R., Power Optimization of a Three-Node Two-Way Relay-Assisted Power-Line Communication System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022. (accepted for publication)
- [13] Robson S. & Haddad, M. A Chirp Spread Spectrum Modulation Scheme for Robust Power Line Communication, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022 (accepted for publication).
- [14] Sathwani D. (2018). Simple and Tightly Approximated Integrals over κ - μ Shadowed Fading Channel With Applications. *IEEE Trans VehTechnol.* 67, 10, 10092-10096.
- [15] Bilim M. & Kapucu,N. (2019).Average Symbol Error Rate Analysis of QAM Schemes Over Millimeter Wave Fluctuating Two-Ray Fading Channels, *IEEE Access*, 7, 105746-105754.
- [16] Bilim M. (2019). QAM Signaling over κ - μ Shadowed Fading Channels, *Physical Communication*, 34, 261-271.
- [17] Bilim M. (2021). Different QAM Schemes Analyses for ARS Fading Channels, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32, 1, e4119.
- [18] Wozencraft J. M. and JacobsI. M. (1965). *Principles of Communication Engineering*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 83.
- [19] Gradshteyn, I. S., & Ryzhik, I. M. (2007). *Tables of Integrals, Series and Products, 7th ed.*, San Diego, CA:Academic.

Araştırma Makalesi – Research Article

Sentetik Polimerlerin Flokülasyonda Verimliliğini Etkileyen Faktörler*

Factors Affecting Efficiency of Synthetic Polymers in Flocculation

Noyan Akray¹, Tayfun Şengül^{2*}

Geliş / Received: 21/07/2022

Revize / Revised: 07/09/2022

Kabul / Accepted: 08/09/2022

ÖZ

Polimerler endüstriyel atıkların katı sıvı ayırımında yaygın bir şekilde kullanılan etkili ürünlerdir. Atıklarda katı-sıvı ayırımının yapılması, atıkların daha düzenli ve kolay depolanabilmesini sağlamanın yanında, yüksek su içeriğinin depolama sahasından uzaklaştırılması depolanmış atıkları çevreye tehdit olmaktan çıkararak atık hacmini önemli bir miktarda düşürerek depolanma maliyetlerini azaltır. Polimer performansı bulanıklık deneyleri ile ölçülmektedir. Katı sıvı ayırımında kullanılan polimerlerin etkinliğini, karıştırma hızı, karıştırma süresi, çökeltme süresi, sıcaklık ve katı formdaki polimerin sıvı çözelti halinde hazırlandıktan sonra kullanılmalarda arasında geçen depolama süresi gibi birçok faktör etkilemektedir. Bu deneysel çalışmada, endüstriyel bir atığı temsilen Kütahya Espey bor zenginleştirme (konsantratör) tesisinin atık barajından doğal haliyle temin edilen atık önce kurutulmuş daha sonra atık barajındaki su/zemin oranı dikkate alınarak atık zemin süspansiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan atık zemin süspansiyonuna moleküler ağırlıkları farklı dört anyonik polimer belirli bir oranda karıştırılarak katı-sıvı ayırımında polimer performansını etkileyen faktörler belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk, karıştırma süresinin 1-3 dakika, süspansiyonun çökeltme süresinin 2-4 dk aralığında olduğu, polimer türüne göre süspansiyon sıcaklığının bulanıklık ve flokülasyonu etkileyebilecek bir faktör olduğu, polimer çözeltisi hazırlandıktan 24 saat sonra 7 gün süreyle etkinliğinde bir azalma olmadan kullanılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Anyonik Polimer, Endüstriyel Atık, Flokülasyon, Bulanıklık, Jar Deneyi

ABSTRACT

Polymers are effective products widely used in the solid-liquid separation of industrial wastes. Making solid-liquid separation in the wastes ensures that the wastes can be stored more regularly and efficiently, while removing the high water content from the landfill makes the accumulated wastes not a threat to the environment and reduces the waste volume by a significant amount, thus reducing the storage costs. Polymer performance is measured by turbidity tests. Many factors affect the effectiveness of the polymers used in solid-liquid separation, such as mixing speed, mixing time, settling time of slurry, temperature, and storage time which is the time elapsed between the use of the solid polymer after it has been prepared as a liquid solution. In this experimental study, the waste obtained from the tailings dam of the Kütahya Espey boron enrichment (concentrator) plant in its natural form, representing an industrial waste, was first dried, and then a waste ground suspension was prepared by taking the

*Bu makale, Noyan Akray'ın, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Dr. Öğr. Üyesi Tayfun Şengül danışmanlığında yapmış olduğu, "Endüstriyel Bir Atığın Geotekstil Tüp Kullanılarak Susuzlaştırılması ve Depolanması" (2022) başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

¹İletişim: noyan.akray@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6640-4727>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Evliya Çelebi Yerleşkesi, 43100 Merkez/Kütahya, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişimi: tayfun.sengul@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3473-7724>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Evliya Çelebi Yerleşkesi, 43100 Merkez/Kütahya, Türkiye

water/soil ratio in the tailings dam into account. The factors affecting the polymer performance in solid-liquid separation were determined by mixing four anionic polymers with different molecular weights into the prepared soil suspension. According to the findings, the ideal mixing speed has been determined to be 200-250 rpm, the mixing time as 1-3 minutes, and the settling time of the suspension between 2-4 minutes. Also, the suspension temperature was found to be a factor that could affect the turbidity and flocculation according to the polymer type. Moreover, the polymer solution can be used for 7 days without a decrease in its effectiveness, 24 hours after it is prepared.

Keywords- Anionic Polymer, Industrial Waste, Flocculation, Turbidity, Jar Test

I. GİRİŞ

Nüfus artışı ve gelişen teknoloji, hızla artan üretimi de beraberinde getirmiştir. Çağımızda üretimin merkezi fabrikalardır ve arza karşılık verebilmek için her geçen gün kapasiteleri arttırılmaktadır. Üretim kapasitesi artan fabrikaların atığı da artmakta ve atıkların depolanacağı yer arayışları hızlanmaktadır. Sadece küresel madencilik sektörünün her yıl ürettiği endüstriyel atık miktarı milyarlarca tonu bulurken 2014 yılında üretilen atık miktarının 14 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir [1]. Endüstriyel atıklar genellikle ağır metal ihtiva ettiklerinden atık barajlarında depolanma mecburiyeti bulunmaktadır.

Katı dane oranı %5-15 arasında değişen sulu formdaki endüstriyel atıklar borularla atık barajlarına taşınmaktadır. Endüstriyel atıklar herhangi bir katı sıvı ayırma işlemine tabi tutulmadıklarında ortamdaki suyun katı danelerden ayrışması çok uzun süren bir süreç olduğundan, atık barajlarında atık zeminin depolanması beraberinde yüksek miktarda suyu da depolamak ve bunun için birden fazla atık barajı inşa etmek anlamına gelmektedir. Daha fazla atık barajına gereksinim duymak yüksek maliyetinin yanında baraj kazası riskini de arttırmaktadır. Sismik olaylar ve aşırı su seviyesi baraj kazalarına sebep olabilmekte ve tarım arazilerine atık suyun sızma ihtimali çevresel bir tehdit oluşturmaktadır. Dünya genelinde 2000 yılından sonra 74 büyük atık barajı kazası rapor edilirken, atık barajı kazası oluşma sıklığı her geçen gün artmaktadır. Bu atık barajı kazalarında 858 can kaybının yanında 153 kayıp insan olmasından dolayı can kaybının çok daha yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca tarım arazileri ve içme suyu kaynaklarının kullanılamaz hale gelmesinin yanında, yerleşim alanlarında meydana getirdiği zararın milyarlarca dolar olduğu bilinmektedir [2].

Atık zeminin büyük oranda sudan ayrıştırılıp depolanması ise daha emniyetli ve düşük maliyetli bir depolama yöntemidir. Zemini sudan ayıracak teknoloji günümüzde birçok yerde başarı ile uygulanmaktadır. Su içerisindeki serbest zemin partikülleri topaklayıcı polimerler yardımı ile bir araya getirilerek doğal tane boyutuna göre boyutları onlarca kat artan yapılar hızlı bir şekilde çöktürebilmektedir. Sudan kesin bir şekilde ayrılan atık zeminin hacminde önemli bir miktarda azalma meydana gelmesinin yanında depolanan atık zemin yeri geldiğinde tekrar kullanılma imkânına sahip olabilmektedir.

Katı sıvı ayırımında polimer performansını ölçmenin en etkili yolu atık zemin süspansiyonunun bulanıklığının ölçülmesidir. Polimer eklenen atık zemin süspansiyonunda serbest zemin partikülleri ne kadar az bulunuyorsa süspansiyonun bulanıklık değeri o kadar düşük ölçülmektedir ki bu polimerin atık zemini topaklaştırma performansının bir göstergesidir.

Zemin suyunun bulanıklığını ve aynı zamanda kullanılan polimerin katı sıvı ayırımında etkinliğinin belirlenmesi için jar test (bulanıklık deneyi) yaygın bir şekilde uygulanan bir deney yöntemidir [3-5]. Buna rağmen bu deney yönteminde sonuca etki eden süspansiyonun karıştırma hızı, karıştırma süresi ve çökeltme süresi gibi faktörler araştırmacılar tarafından farklı uygulanabilmektedir.

Satyamurthy ve Bhatia [6] düşük plastisiteli siltli zeminden (ML) oluşan, beş farklı konsantrasyon oranında katı tane içeren süspansiyonun katı sıvı ayırımı için anyonik flokülant kullanarak jar deneyleri yürütmüşlerdir. Bu deneylerde 50-200 rpm karıştırma hızlarında süspansiyon 5 dk süreyle karıştırılmıştır.

Sher ve diğ. [7] polimer endüstrisinin ürettiği önemli miktardaki atık suyun suyollarına bırakılmadan önce arıtılması üzerine yürüttükleri araştırmada, katı tanelerin çöktürülmesinde flokülasyon işlemi uygulanmıştır. Bu maksatla yürütülen jar deneylerinde anyonik poliakrilamid (Magnafloc155) flokülant olarak kullanılmıştır. Flokülasyon deneylerinde 5 dakika boyunca 40 rpm'de yavaş karıştırma yöntemi benimsenmiş, deneylerde süspansiyonun çökeltmesi için 30 dakika beklenilmiştir.

Tassinari ve diğ. [8] farklı konsantrasyonlarda kaolin süspansiyonu ile gerçekleştirdikleri deneylerde, 200 rpm yüksek karıştırma hızında 2 dk daha sonra 30 rpm düşük karıştırma hızında 5 dk süspansiyonu karıştırdıktan sonra, süspansiyonun çökmesine 5 dk müsaade edilip zamanın bir fonksiyonu olarak sürekli bulanıklık değerleri ölçülmüştür.

Araştırmacıların yürüttükleri çalışmalarda genel olarak katı sıvı ayırımında etkili polimer ve dozu belirlendiği için jar deneylerinde belirli bir karıştırma hızı, karıştırma ve çökme süresi tüm deneylerde sabit olarak uygulanmaktadır. Buna rağmen karıştırma hızı, karıştırma ve çökme sürelerinin flokülasyona olan etkisini belirlemeye yönelik çalışmalar oldukça kısıtlıdır [5].

Bu çalışmada Kütahya Espey bor zenginleştirme (konsantratör) tesisinin atık barajından temin edilen kütülecce %15 katı daneden oluşan endüstriyel bir atık zeminin farklı yük yoğunluğuna sahip anyonik iyon yüklü sentetik polimerler kullanılarak çökeltmesinde polimer verimliliğine etki eden faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu maksatla etkili polimer tipi ve dozunun belirlendiği jar deneylerinde süspansiyonun optimum karıştırma hızının, karıştırma ve çökme sürelerinin, ortam sıcaklığının ve polimerlerin etkili kullanım sürelerinin flokülasyon ve dolayısıyla süspansiyonun bulanıklık değerine etkisi araştırılmıştır.

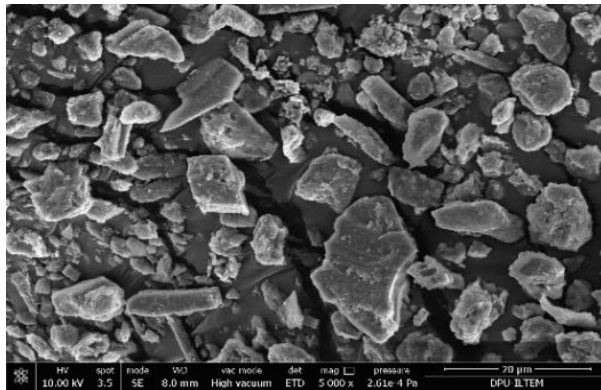
II. MALZEME

A. Atık Zemin

Bor üretimi için açık ocaklardan çıkarılan kolemanit cevheri fiziksel zenginleştirme yapılarak konsantrasyon kolemanit üretilmektedir. Daha sonra elde edilen bu ürün istenilen boyutlarda öğütülerek, reaksiyon, filtrasyon, kristalizasyon ve kurutma gibi çeşitli üretim aşamalarından geçirilerek borik asite dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm sırasında atık zeminler oluşmaktadır. Bu deneysel çalışmada endüstriyel atık zeminini temsilen Kütahya Espey bor zenginleştirme tesisinin atık barajından temin edilen atık zemin kullanılmıştır. Bu atık zeminin X-Ray Floresans (XRF) spektroskopisi ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları Tablo 1’de, taramalı elektron mikroskopun ikincil elektron modu ile 5000 kat büyütülmüş mikro yapı görüntüsü (SEM-SE) Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. XRF deneyi sonuçları

Oksit	(%)	Oksit	(%)		
1	SiO ₂	28,18	9	SO ₃	0,39
2	CaO	20,40	10	TiO ₂	0,37
3	Al ₂ O ₃	7,74	11	Na ₂ O	0,24
4	MgO	6,74	12	P ₂ O ₅	0,18
5	F ₂ O	3,50	13	Cs ₂ O	0,13
6	K ₂ O	3,22	14	MnO	0,07
7	SrO	1,66	15	Cl	0,06
8	As ₂ O ₃	0,46			



Şekil 1. Bor zenginleştirme atık zemininin taramalı elektron mikroskop fotoğrafı

Bu deneysel çalışmada kullanılan atık zeminin dane boyutu dağılımını belirlemek amacı ile ASTM D6913-04’e [9] göre elek analizi, D7928-17’e [10] göre hidrometre analizi gerçekleştirilmiştir. Dane boyutu dağılımına göre belirlenen zemin yüzdeleri ve zeminin fiziksel özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Zemin fiziksel özellikleri

Çakıl %	Kum %	Silt %	Kil %	Spesifik Gravite (G _s)	Likit Limit (LL) %	Plastisite İndisi (PI) %
0,2	46,2	20,6	33,0	2,5	37,5	15,0

Elde edilen bu sonuçlara göre atık zemin %46,2 oranında kum ve %53,6 oranında ince daneli zeminden oluştuğu ayrıca %0,2 civarında çakıl içerdiği, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli inorganik killer ve siltli killer (CL) grubunda olduğu belirlenmiştir.

B. Polimer

Polimerler, katıldıkları bulamaçta zemin tanelerini elektriksel çekim kuvveti etkisi ile birbirlerine bağlayıp taneler arası fiziksel bir köprü oluşturarak topaklaştıran, doğal tane boyutuna göre onlarca kat daha büyük bir kütle halinde oluşan bu topakların çökmesini hızlandırarak suyun ayrışmasını sağlayan doğal veya sentetik kimyasallardır. Bu çalışma için, iyon durumuna göre anyonik, molekül ağırlıklarına göre çok yüksek molekül ağırlıklı, beyaz, renksiz ve suda çözünabilir polimerler üreticiden kuru toz formda temin edilmiştir. Bu polimerler %0,25 konsantrasyonda 2500 ppm sulu çözelti haline getirilerek 24 saat bekletildikten sonra homojen olması sağlanarak deneylerde kullanılmıştır. Kullanılan polimerlerin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Polimer özellikleri

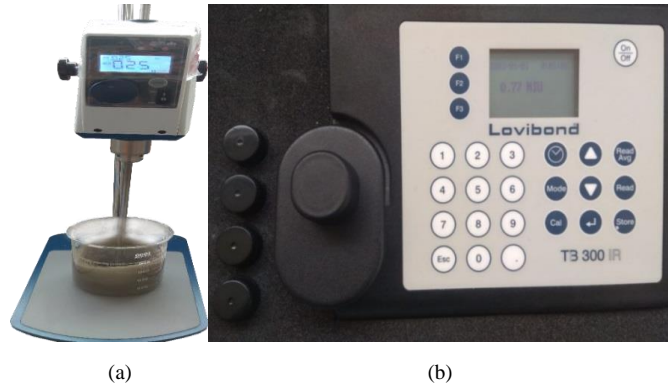
Polimer Kodu	Yük yoğunluğu	Moleküler kütle	Yoğunluk (g/cm ³)	Fiziksel form
913	Düşük	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz
923	Orta	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz
934	Orta	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz
956	Yüksek	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz

III.YÖNTEM

Bulanıklık deneyi, süspansiyonun bulanıklık değerinin 20 NTU (Nefelometrik Bulanıklık Birimi) limit bulanıklık değerinin altına düşmesini sağlayan en düşük polimer dozunun ve etkili polimer tipinin belirlendiği basit bir deney yöntemidir. Bulanıklık deneyleri ASTM D2035-19 [11] uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Atık barajlarına depolanmak üzere borularla taşınan endüstriyel atık süspansiyonlarında katı dane oranı kütlece yaklaşık %5-15 civarında olması nedeniyle bulanıklık deneyleri 1000 ml'lik standart deney kaplarında, ağırlıkça %15'i zemin olacak şekilde 500 ml atık zemin bulamacı hazırlanarak yapılmıştır. Atık zemin bulamacı, 82,40 gr katı atık, 467,07 gr saf su ile hazırlanmış ve Şekil 2.(a)'da gösterilen mekanik karıştırıcı kullanılarak 2 dakika süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra farklı yük yoğunluğuna sahip anyonik iyon yüklü homojen bir şekilde hazırlanan polimerler zemin bulamaçlarına her aşamada 10 ppm (2 ml) olacak şekilde 120 ppm'e kadar eklenerek tekrar mekanik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

Polimer ilave edilen süspansiyon karıştırıldıktan sonra zemin tanelerinin çökmesi için beklenmiş ve çökelen zemin seviyesi ile su yüzeyi arasında kalan bölgenin yaklaşık ortasından şırınga yardımıyla süzüntü suyu (supernatant) örnekleri alınarak nefelometre adı verilen bulanıklık ölçme cihazında (Şekil 2.(b)) süspansiyonun bulanıklık değeri NTU cinsinden belirlenmiştir. Bulanıklık çözünmüş, çökmüş ya da askıda kalan tanecik yapılı organik yahut inorganik maddelerin çözelti içerisinde ışığı dağıtması veya yansıtmasına bağlı olarak solüsyonun berraklığı olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra, bulanıklık değeri ölçülen süzüntü su numuneleri deney kabına boşaltılarak, bulanıklık deneyi tekrarlı bir şekilde devam ettirilmiştir.



Şekil 2. Mekanik karıştırıcı ve bulanıklık ölçer a) Mekanik karıştırıcı b) Bulanıklık ölçer

IV. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

A. Etkili Polimer Tipi ve Dozunun Belirlenmesi

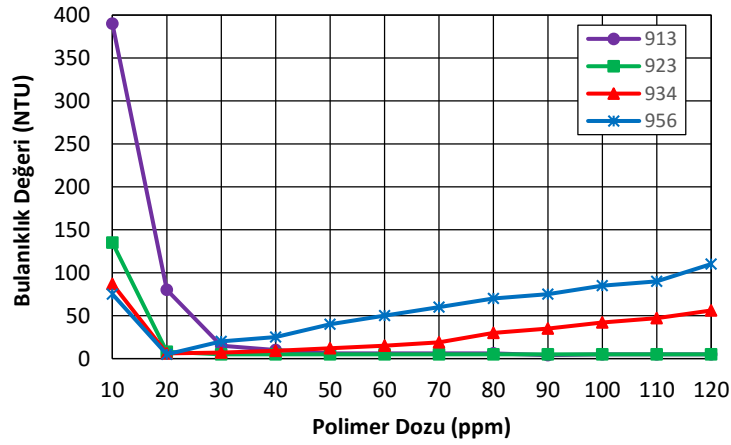
Katı-sıvı ayrımı için çok çeşitli polimerler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Atık zeminin özelliklerine göre etkili polimer tipi ve dozu araştırmacılar arasında en yaygın kabul görmüş deney yöntemi olan bulanıklık deneyleri ile belirlenmesine rağmen, bu deneylerde karıştırma hızı, karıştırma süresi ve bulamacın çökeltme süresi gibi sonuca etki eden bazı faktörlerde uygulama farklılıkları görülmektedir. Bulanıklık deneyleri için farklı araştırmacılar tarafından benimsenen karıştırma parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Literatürde kullanılan parametreler

Araştırmacılar	Zemin Tipi	Seçilen karıştırma hızı (dev/dk)	Seçilen karıştırma süresi (dk)	Seçilen bekleme süresi (dk)
Zhu ve diğ. [12]	Yağ içerikli endüstriyel atıklar	100	2	5
Oruç ve Sabah [13]	Tunçbilek kömür tesisi atığı	150	0,5 - 0,75	15
Spritzer ve diğ. [14]	İnce taneli siltli kil	260 - 270	1	2
Fatema ve diğ. [15]	Uçucu kül	180 - 200	1	0,5
Sengul ve Bulut [5]	Seyitömer uçucu külü	200 - 250	1 - 3	2 - 4

Bulanıklık deneylerinde yapılan bu farklı uygulamalar zemin tipine ve çoğu zaman araştırmacının tecrübesine göre belirlenmesine rağmen belirlenen bu faktörler optimum seviyelerinden uzak olabilmektedir. Bu nedenle süspansiyonun optimum karıştırma hızı, karıştırma ve çökeltme süreleri, ortam sıcaklığı ve polimerlerin etkili kullanım sürelerinin katı sıvı ayrımında uygulanacak polimer tipi ve dozunun belirlenmesine etkisi her çalışma sahası için deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Atık zemininin çöktürülmesinde etkili polimer tipi ve dozunun belirlenmesi için 4 farklı anyonik tipte polimer seçilip bulanıklık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırma hızı, karıştırma süresi ve bulamacın çökeltme süresi sabit tutulup etkili polimer ve dozu belirlenmiştir. Farklı yük yoğunluklu ve dozlu polimer ilave edildiğinde elde edilen bulanıklık deney sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir.

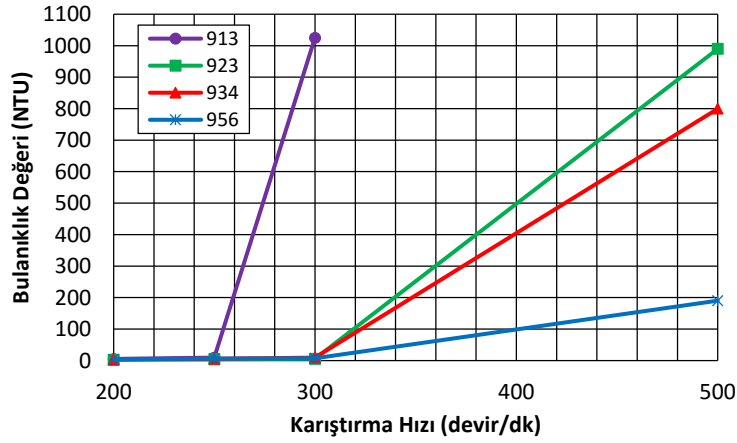


Şekil IV. Polimer katkılı atık zeminin bulanıklık deney sonuçları

Espey bor zenginleştirme tesisinin atık zemini ile yapılan bulanıklık deneylerinde 4 farklı anyonik polimer kullanılmış olup, bu polimerlerin tamamının atık zemin süspansiyonunda taneler arası fiziksel bir köprü kurarak onların topaklaşması sonucunda hızlı bir şekilde çökmesini sağladığı görülmüştür. 913 anyonik polimerinin değişen dozlarda kullanıldığı bulanıklık deneylerinde 20 NTU limit bulanıklık değeri altına 30 ppm dozda ulaşıldığı, daha sonra polimer dozunun artırılmasının süspansiyonun bulanıklık değerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı belirlenmiştir. Diğer anyonik polimerlerin kullanıldığı deneylerde limit bulanıklık değerine 20 ppm dozda ulaşılmasına rağmen, 956 ve 934 anyonik polimerinin kullanıldığı deneylerde artan polimer dozlarında sırasıyla 50 ppm ve 80 ppm'de süspansiyonun bulanıklık değerinin limit bulanıklık değerinin üzerine çıktığı belirlenmiştir. 923 anyonik polimerinin kullanıldığı deneylerde 20 ppm'den daha yüksek polimer dozlarında süspansiyonun bulanıklığında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Bu nedenle Espey atık zemininde katı-sıvı ayrımı için ideal polimer dozunun 20 ppm olduğu, etkili polimer olarak 923, 934 ve 956 anyonik polimerlerinin üçünün de seçilebileceği, buna rağmen aşırı doz polimer kullanılması durumunda süspansiyonun bulanıklığında artışa neden olmayan 923 anyonik polimerinin seçilmesinin daha uygun olduğu düşünülmektedir.

B. Karıştırma Hızının Bulanıklığa Etkisi

Endüstriyel atıklarda etkili katı sıvı ayrımı için polimerin süspansiyondaki tanelerle yeterli teması sağlayacak şekilde karıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle laboratuvar bulanıklık deneylerinde farklı karıştırma hızlarının süspansiyondaki tanelerin çökmesine dolayısı ile süspansiyonun bulanıklık değerine etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu şekilde optimum temas süresi belirlenerek arazi uygulamalarında atık zeminin borularla taşınması sırasında polimerin porta dahil edileceği en uygun konumu, pompa hızı ve polimerin süspansiyonla temasını arttırmak için boruların bağlantı biçimleri tasarlanabilir. Bu amaçla polimerli atık zemin bulamacının karıştırma hızına bağlı olarak süspansiyonun bulanıklık değeri, karıştırma süresi üç dakika, çökme süresi iki dakika, polimer saklama süresi 24 saat ve süspansiyonun sıcaklığı 20 °C olarak kontrol altına alınıp, 200, 250, 300 ve 500 dev/dk karıştırma hızlarında tüm polimerler için belirlenmiştir. Karıştırma hızının bulanıklığa etkisi deney sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.



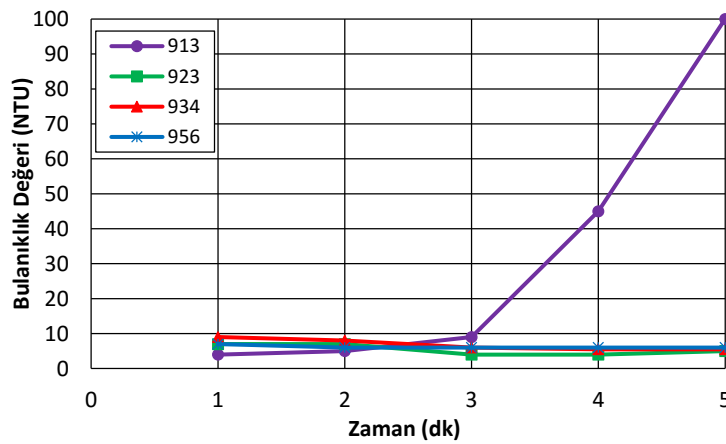
Şekil 4. Karıştırma hızının bulanıklığa etkisi

Bulanıklık deneylerinde 913 anyonik polimeri 250 dev/dk, diğer tüm polimerler 300 dev/dk'dan daha yüksek karıştırma hızlarında karıştırıldıklarında süspansiyonun bulanıklık değerinin çok hızlı bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Yüksek karıştırma hızlarında türbülans nedeniyle polimerle süspansiyondaki taneler arası bağlar zarar görmekte, topaklaşmanın azalması nedeniyle çökme davranışı yavaşlamakta ve bu nedenle süspansiyonun bulanıklık değeri artmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre polimerin Espy atık zemini ile ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk aralığında olduğu belirlenmiştir.

C. Karıştırma Süresinin Bulanıklığa Etkisi

Atık zemin bulamacına eklenen polimerlerin süspansiyon içerisinde homojen olarak dağılması, temas ettiği taneler arası bağ oluşturarak topaklaşmanın sağlanabilmesi için ideal bir karıştırma süresince karıştırılması gerekmektedir. Karıştırma süresinin kısa olması polimerin süspansiyondaki tanelere temasını azaltırken, ideal karıştırma süresinin üzerine çıkılması durumunda topaklaşan tanelerin türbülans etkisiyle zarar görmesi sonucu daha küçük topaklara ayrılarak çökmesi gecikmektedir.

Atık zemin ile kullanılan polimerin ideal karıştırma süresinin belirlendiği deneylerde karıştırma hızı 250 rpm, çökme süresi iki dakika, polimer saklama süresi 24 saat ve karışım suyu sıcaklığı 20 °C olacak şekilde kontrol altında tutulmuş, polimerli atık zemin süspansiyonu 1, 2, 3, 4 ve 5 dakika değişen karıştırma sürelerinde karıştırıldıktan sonra süspansiyonun bulanıklık değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur.



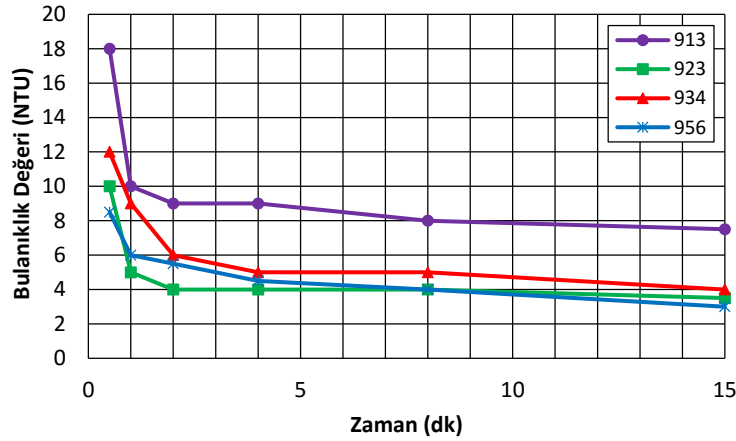
Şekil 5. Karıştırma süresinin bulanıklığa etkisi

Anyonik polimer katkılı atık zemin bulamacının karıştırma süresinin 1-3 dakika arasında değişmesi durumunda süspansiyonun bulanıklık değerinde önemli bir değişiklik olmazken üç dakikadan daha uzun

karıştırma sürelerinde anyonik 913 polimer katkılı süspansiyonda bulanıklık değeri karıştırma süresi arttıkça çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu sonuca göre, atık zeminin anyonik polimer kullanılarak çökeltilmesinde süspansiyonun ideal karıştırma süresinin 1-3 dakika aralığında olduğu belirlenmiştir.

D. Süspansiyonun Çökeltme Süresinin Bulanıklığa Etkisi

Süspansiyonun çökeltme süresinin bulanıklığa etkinin belirlendiği deneylerde, karıştırma hızı 250 rpm, karıştırma süresi üç dakika, polimer saklama süresi 24 saat ve karışım suyu sıcaklığı 20 °C olacak şekilde kontrol altında tutulmuş, polimerli atık zemin süspansiyonu karıştırıldıktan sonra çökeltmesi için ½, 1, 2, 4, 8 ve 15 dk gibi farklı çökeltme süreleri uygulanmış ve süspansiyonun bulanıklık değerleri ölçülmüştür. Belirlenen bulanıklık değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

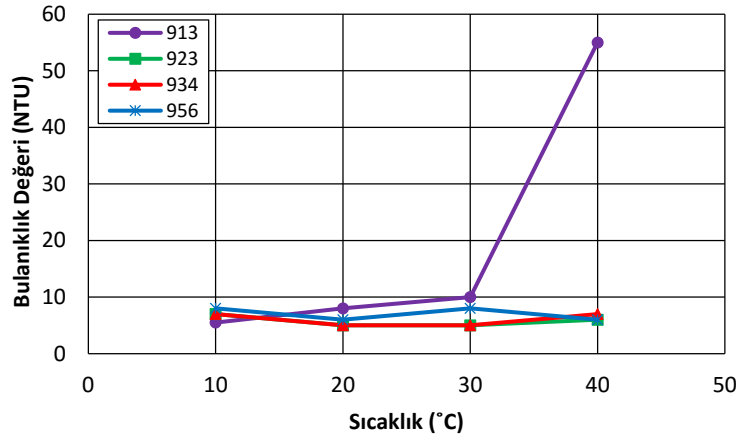


Şekil 6. Süspansiyonun çökeltme süresinin bulanıklığa etkisi

Elde edilen sonuçlara göre, 0-2 dk aralığında süspansiyonun çökeltme süresi arttıkça bulanıklık değeri hızlı bir şekilde azalırken, 4. dk'dan itibaren bulanıklık değerlerindeki azalma oldukça düşmektedir. Bunun nedeni olarak polimerin atık zemin süspansiyondaki taneleri topaklaştırarak çökeltilmesi mekanizmasında ilk dört dakikada çok etkili olduğu, bu süreden sonra tanelerin çökeltmesi devam etmesine rağmen bu çökeltmenin polimerin topaklaştırma etkisinden çok yerçekimi etkisiyle zamana bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Atık zeminlerin polimer kullanılarak çökeltilmesinin araştırıldığı jar deneylerinde süspansiyonun çökeltme süresinin, polimerin tanelerin çökeltmesi üzerinde çok etkili olduğu 2 dk'dan daha kısa ve çökeltmesinin polimer etkisinden daha çok yerçekimi etkisiyle gerçekleştiği 4 dk'dan daha uzun seçilmemesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu sonuç, polimer katkılı süspansiyonun çökeltmesi için ideal sürenin 2-4 dk aralığında olduğunu göstermektedir.

E. Süspansiyon Sıcaklığının Katı-Sıvı Ayrımına Etkisi

Depolanan endüstriyel atıkların polimerler kullanılarak atık barajında çökeltilmesi ve bu şekilde katı danelerden ayrıştırılan suyun ortamdan uzaklaştırılması atık barajı hacminin efektif kullanılması yanında su basınçları etkisiyle stabilite problemlerinin de azaltılmasına sebep olmaktadır. Endüstriyel atıklar atık barajlarında mevsimsel farklılıklar nedeniyle farklı ortam sıcaklıklarında depolanmaktadır. Bu nedenle mevsimsel sıcaklık farklılıklarının, kullanılan polimerin flokülasyon mekanizmasına etkisinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Bu maksatla jar deneylerinde karıştırma hızı 250 rpm, karıştırma süresi üç dakika, çökeltme süresi iki dakika ve polimer saklama süresi 24 saat olarak sabit tutularak, ülkemizin iç ve dış sularında dört mevsim ölçülebilir sıcaklıklar olan 10, 20, 30 ve 40 °C gibi farklı süspansiyon sıcaklıklarında kullanılan polimerlerin flokülasyondaki verimliliğinin değişimi belirlenmiştir. Polimerlerin farklı ortam sıcaklıklarında kullanılmasının flokülasyon mekanizmasına etkisi Şekil 7.'de gösterilmiştir.

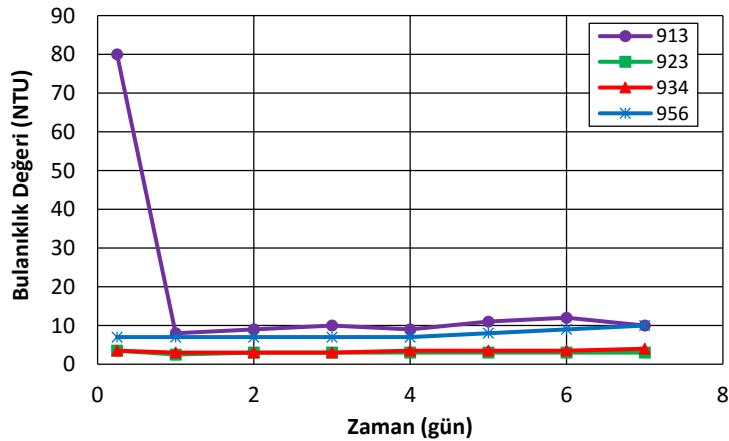


Şekil 7. Farklı ortam sıcaklıklarının flokülasyon mekanizmasına etkisi

913 anyonik polimerinin kullanıldığı deneylerde 30 °C'den düşük süspansiyon sıcaklıklarında sıcaklık artışına bağlı olarak bulanıklık değerinde hafif artış gözlemlenirken, 30 °C'den yüksek ortam sıcaklıklarında bulanıklık değerinde çok hızlı bir artış meydana gelmiştir. Bu sonuç 913 anyonik polimerinin farklı ortam sıcaklıklarında kullanılması durumunda sıcaklık artışına bağlı olarak atık zemini topaklaştırmadaki verimliliğinin azaldığı anlamına gelmektedir. 923, 934 ve 956 anyonik polimerlerinin kullanıldığı atık zemin süspansiyonlarında 10 - 40 °C gibi geniş bir ortam sıcaklığı aralığında süspansiyonun bulanıklığında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Genel olarak katı sıvı ayırımında kullanılan farklı iyon yükü, yük yoğunluğu ve moleküler kütleye sahip polimerlerin farklı ortam sıcaklıklarında flokülasyondaki verimliliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ile sıcaklığa bağlı olarak kullanılan polimer dozunda ayarlama yapılarak istenilen katı sıvı ayırımının başarılı bir şekilde sürdürülebilmesi sağlanabilir.

F. Polimer Çözeltilisinin Saklama Süresinin Bulanıklığa Etkisi

Sentetik polimerler üreticiden kuru granüler toz formda temin edilirken, istenilen konsantrasyonda homojen sulu çözelti haline getirilerek katı sıvı ayırımında kullanılmaktadırlar. Sulu çözelti haline getirilen sentetik polimerlerin, çözeltilerde tüm polimerin homojen olarak çözülmesinin sağlanacağı minimum süre ve polimerin flokülasyonda verimliliğinin değişmediği maksimum süreler belirlenerek, saklanması ve kullanılması deneysel çalışmalarda elde edilen bulanıklık değerlerinin doğru yorumlanması açısından oldukça önemlidir. Bu maksatla kuru formdaki polimerler çözelti haline getirildikten sonra ¼, 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün gibi farklı saklama sürelerinde muhafaza edilip, atık zemin süspansiyonuna optimum dozda eklenerek, karıştırma hızı 250 rpm, karıştırma süresi üç dakika, çökeltme süresi iki dakika ve karışım suyu sıcaklığı 20 °C olarak sabit tutularak polimer saklama süresinin flokülasyona etkisi belirlenmiştir. Belirlenen bulanıklık değerleri Şekil 8.'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Polimer çözeltilisinin saklama süresinin bulanıklığa etkisi

Deney sonuçları incelendiğinde polimerlerin çözelti haline getirildikten sonra bir haftalık saklama süreleri boyunca flokülasyonda herhangi bir verimlilik kaybı olmadan kullanılabilmesi anlaşılmaktadır. 913 anyonik polimerinin sulu çözelti haline getirilip altı saat bekletildikten sonra kullanılmasıyla elde edilen bulanıklık değerinin, diğer anyonik polimerlerin altı saat saklama süresinden sonra elde edilen bulanıklık değerlerinden çok yüksek olması ve 24 saat sonunda 7 gün süreyle bulanıklık değerlerinde önemli bir değişiklik göstermemesi polimerin sulu formda homojen çözülmesi için minimum 24 saat süreyle bekletilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Diğer polimerlerin ise çözelti haline getirildikten 6 saat sonra kullanılmasının bulanıklık değerleri üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, bor zenginleştirme tesisi atığının anyonik iyon yüklü polimerle çökeltilerek depolanmasının araştırıldığı bu çalışmada ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk, karıştırma süresinin 1-3 dk, çökeltme süresinin 2-4 dk olduğu belirlenmiştir. Ayrıca farklı ortam sıcaklıklarında (10-30 °C) ve polimer çözeltisi hazırlandıktan 24 saat sonra 7 gün boyunca polimerin etkinliğinde önemli bir azalma olmadan katı sıvı ayırımında kullanılabilmesi deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Sengul ve Bulut [5] tarafından yürütülen F sınıfı uçucu külden oluşan atık zemin bulamacının anyonik ve katyonik polimerler ile çökeltilerek katı sıvı ayırımının yapıldığı çalışmada elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, farklı atık zeminlerin polimer kullanılarak çökeltilmesi çalışmalarında polimer verimliliğine etki eden faktörlerin optimum değerleri belirlenmeden etkili polimer tipi ve dozunun belirlenmesi durumunda, bu çalışmalarda belirlenmiş olan optimum değerler referans kabul edilebilir.

V. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada endüstriyel bir atık olan Kütahya Espey bor zenginleştirme (konsantratör) tesisi atığının katı – sıvı ayırımı yapılarak depolanmasında farklı yük yoğunluğuna sahip dört farklı sentetik polimerden etkili polimer tipi ve dozu jar testleri yapılarak belirlenmiştir. Kullanılan polimer tipi ve dozu katı-sıvı ayırımında sonuca etki eden en önemli faktör olmasına rağmen süspansiyonun ideal karıştırma hızı, karıştırma ve çökeltme süreleri, süspansiyon sıcaklığı, polimer saklama süreleri flokülasyon ve dolayısıyla süspansiyonun bulanıklık değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar özetlendiğinde;

- Kütlece katı tane oranı %15 olan, düşük plastisiteli kil zeminden oluşan endüstriyel atığın katı sıvı ayırımında anyonik iyon yüklü polimerlerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi düşünülmektedir.
- Süspansiyondaki katı danelerin çökeltilmesinde orta ve yüksek yük yoğunluklu anyonik polimerlerin 20 ppm dozda daha etkili olduğu, bazı polimer tiplerinde ise artan polimer dozlarında bulanıklık değerinde bir miktar artış meydana geldiği dolayısıyla bu dozlarda kritik misel konsantrasyonunun aşıldığı anlaşılmıştır.
- Atık zemin süspansiyonundaki tanelerle polimerin etkili bir şekilde temas etmesi ve taneler arası fiziksel bir köprü kurarak topaklaşmasını sağlayıp hızlı bir şekilde çökmesi için ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk ve karıştırma süresinin 1-3 dakika aralığında olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek karıştırma hızları ve sürelerinde topaklaşan taneler arası fiziksel köprülerin zarar görmesi nedeniyle süspansiyonun bulanıklık değeri ve çökeltme sürelerinde artış meydana gelmektedir.
- Polimer katılı süspansiyonun çökmesi için ideal sürenin 2-4 dk aralığında olduğunu, polimer etkisiyle meydana gelen topakların ilk 4 dk da çöklediği bu nedenle bulanıklık değerinde hızlı bir düşüş olduğu, bu süreden daha uzun bekleme sürelerinde bulanıklıktaki azalmanın polimer etkisinden çok süspansiyonda askıda kalmış tanelerin zamana bağlı çökmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Farklı ortam sıcaklıklarında sıcaklığın polimer performansı üzerine etkisi incelendiğinde 10 - 30 °C sıcaklık aralığında süspansiyonun bulanıklığında önemli bir değişim gözlemlenmediği, 30 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda flokülasyonun olumsuz etkilenebileceği ve bu nedenle kullanılan polimer dozu ayarlanarak bu olumsuz etkinin azaltılabileceği düşünülmektedir.
- Katı haldeki polimerlerin çözelti halinde hazırlandıktan 24 saat sonra bir haftalık süre boyunca deneysel araştırmalarda bulanıklık değerlerinde önemli bir değişikliğe neden olmayacak şekilde kullanılmaya uygun olduğu, arazi katı - sıvı ayırımı uygulamalarında bu süreden çok daha uzun bir süre flokülasyonda etkili bir şekilde kullanılabilmesi saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Adiansyah, J.S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies, *Journal of Cleaner Production*, 1081050–1062, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>.
- [2] World Information Service on Energy. (2019). WISE-Uranium Project, *Chronology of Major Tailings Dam Failures*. <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. (Accessed 26 August 2022).
- [3] Maurer, B. W., Gustafson, A. C., Bhatia, S. K., & Palomino, A. M. (2012). Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry. *Fuel*, 97, 411-417.
- [4] Cetin, D., Sengul, T., Bhatia, S. K., & Khachan, M. M. (2017). Effect of polymer and fiber usage on dewatering and compressibility behavior of fly ash slurries. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(5), 678-687.
- [5] Sengul, T., & Bulut, A. (2022). Determination of the factors affecting the efficiency of the polymer in solid-liquid separation with synthetic polymers. *Arab J Geosci* 15, 858 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10108-3>
- [6] Satyamurthy, R. & Bhatia, S. K. (2009). Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. *Geosynthetics International*, 16(2), 83-96. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.83>
- [7] Sher, F., Malik, A., & Liu, H. (2013). Industrial polymer effluent treatment by chemical coagulation and flocculation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 684-689, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.07.003>.
- [8] Tassinari, B., Conaghan, S., Freeland, B., & Marison, I. W. (2015). Application of turbidity meters for the quantitative analysis of flocculation in a jar test apparatus. *Journal of Environmental Engineering*, 141(9), [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000940](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000940)
- [9] ASTM D 6913-04. (2009). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [10] [ASTM D7928-17. (2017). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [11] ASTM D2035-19. (2019). Standard practice for coagulation - flocculation jar test of water. West Conshohocken, PA, United States. ASTM International. <http://www.astm.org>.
- [12] Zhu, X., Reed, B. E., Lin, W., Carriere, P. E. & Roark, G. A. R. Y. (1997). Investigation of emulsified oil wastewater treatment with polymers. *Separation Science and Technology*, 32(13), 2173-2187.
- [13] Oruç, F. & Sabah, E. (2006). Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings. XXIII. International Mineral Processing Congress, 3-8 September 2006, Istanbul-Turkey.
- [14] Spritzer, J. M., Khachan, M. M. & Bhatia, S. K. (2015). Influence of synthetic and natural fibers on dewatering rate and shear strength of slurries in geotextile tube applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(3), 26.
- [15] Fatema, N., Bhatia, S. K. & Grady, W. F. (2018). Comparison of 1-D and 2-D geotextile dewatering tests with fly ash slurry. In Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics, 16-21. September 2018, Seoul, Korea.

Araştırma Makalesi - Research Article

Tonoz Tipi Çelik Izgara Kabuk Sistemlerde Modüler Değişimlerin Yapı Davranışına Etkisi

Effect of Modular Changes on Structural Behavior in Vault Type Steel Gridshell Systems

İlyas Devran Çelik¹, Taha Koç^{2*}

Geliş / Received: 22/07/2022

Revize / Revised: 23/10/2022

Kabul / Accepted: 19/12/2022

ÖZ

Günümüzde kent nüfusları gitgide artış göstermektedir. Kent nüfuslarının artmasıyla beraber yüksek insan kullanım kapasitesine sahip geniş ve ferah kapalı mekânlar oluşturulma ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda geniş açıklıkları kolaylıkla geçebilecek yeni taşıyıcı sistemler arayışına gidilmiştir. Yakın zamanda keşfedilen modern taşıyıcı sistemlerin başında ızgara kabuk (Gridshell) taşıyıcı sistemler gelmektedir. Izgara kabuk taşıyıcı sistemler ile geniş açıklıklar ekonomik olarak geçilebilmektedir. Bu çalışmada tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemler sayısal olarak incelenmiştir. Oluşturulan sayısal modellerde tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemler sabit basıklık oranı için dörtgen, üçgen ve altıgen modül geometrileri dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemleri, 3 farklı modül geometrisi için analiz edilmiştir. Analizlerde değişken açıklıklar için en uygun modül geometrisi, en uygun modül geometrisine ait en uygun modül boyu ve taşıyıcı sistemin m² düşen taşıyıcı sistem ağırlığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm açıklıklarda dörtgen modül geometrisine sahip modellerde en az m²'ye düşen taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır. Açıklık arttıkça altıgen modül geometrisinin dörtgen modül geometrisine alternatif olabileceği görülmüştür. Çalışma da ayrıca analiz edilen sistemler simetrik kar, asimetrik kar ve rüzgâr yükleme durumları altında analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen düşey ve yatay yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda altıgen modül geometrisi diğer 2 modül geometrisine göre yer değiştirmelere en dirençli modül geometrisi olduğu tespit edilmiştir. Yer değiştirme karşılaştırmaları incelendiğinde; tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemlerde asimetrik yükleme durumunda sistemlerin yer değiştirmelerinde olumsuz ölçüde artış meydana geldiği belirlenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemlerde farklı modül geometrileri için tasarımcılara bir perspektif sunacaktır.

Anahtar Kelimeler- *Izgara Kabuk, Tonoz, Modül Geometrisi, Modül Boyu, Konstrüksiyon Ağırlığı*

ABSTRACT

Today, population in urban areas is increasing gradually. With the increase in the urban population, the need to create large and spacious indoor spaces with high capacity for human usage has arisen. Along with this need, a search was made for new carrier systems that could easily cross wide spans in order to create spaces high volume spaces. Gridshell carrier systems are the leading modern carrier systems that have been discovered recently. In this study, vault type steel gridshell systems were numerically investigated. In the numerical models created, rectangular, triangular, and hexagonal module geometries were taken into account for the fixed flatness ratio of the vault type steel grid shell systems. Within the scope of the study, vault type steel grid shell systems were

¹ İletişim: devrancelik@sdu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9011-4041>)

İnşaat Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Isparta, Türkiye

^{2*} Sorumlu yazar İletişim: taha.koc0@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1802-9066>)

İnşaat Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Isparta, Türkiye

analysed for 3 different module geometries. In the analysis, the most suitable module geometry for variable spans, the most suitable module size of the most suitable module geometry and the carrier system weight per m² of the carrier system were determined. According to the results obtained, the weight of the carrier system, which decreased to at least m², was reached in the models with rectangular module geometry in all spans. It has been seen that the hexagonal module geometry can be an alternative to the rectangular module geometry as the span increases. In the study, the analysed systems were under symmetric snow, asymmetric snow, and wind loading conditions and the vertical and horizontal displacements span were compared. As a result of the analysis, it was determined that the hexagonal module geometry was the most resistant to displacements compared to the other 2 module geometries. When the displacement comparisons are examined; In the case of asymmetrical load in vault type steel grid shell systems, it was determined that the displacements of the systems increased negatively. The results obtained in this study will provide a perspective to the designers for different module geometries in vault type steel grid shell systems.

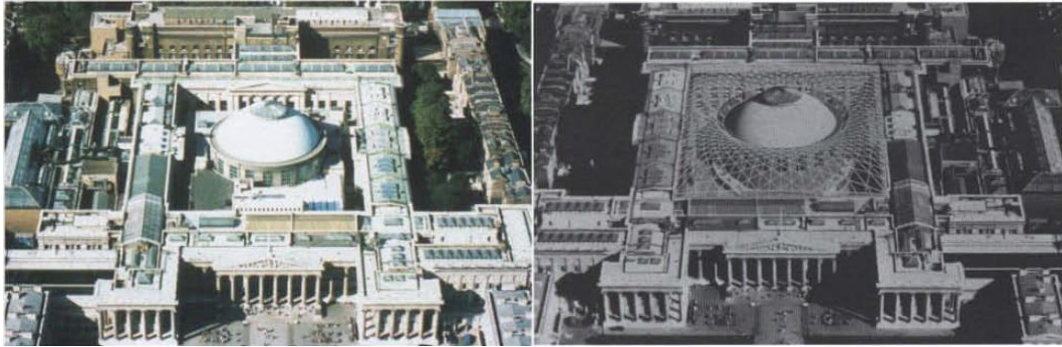
Keywords- *Gridshell, Vault, Module Geometries, Module Length, Constructions Weight*

I. GİRİŞ

Günümüzde birçok ülkede kentlerin nüfusu gittikçe artmaktadır. Nüfusun artmasıyla beraber şehirlerde toplu yaşam alanlarının genişlemesi ihtiyacı doğmuştur [1]. Ferah yaşam alanları ve yüksek hacimli alanlar oluşturmak amacıyla kent yapılaşmasında yeni yapı mecburiyeti meydana gelmiştir [1,2]. Meydana gelen yapılaşma ihtiyacıyla beraber mimari görünümler dikkate alınarak inşaa edilecek yapılarda kalabalık insan hareketliliğini kolaylıkla karşılayabilecek yapılar için yeni taşıyıcı sistemler tasarlanmaya başlanmıştır [1-4]. Gelişen teknoloji inşaat sektörüne de sirayet etmiştir. Öncelikli olarak tasarlanacak yapılarda kalabalık insan hareketliliğini karşılayabilmesinin yanında ekonomik olması, hafif olması, güvenilir olması ve kullanılabilir olması gibi faktörler dikkate alınmıştır. Dikkat edilen faktörler ışığında Gridshell (Izgara kabuk) taşıyıcı sistemler geliştirilmiştir [2,4,5]. Oluşturulan ızgara kabuk yapılar hafiflik, kullanım ömürlerinin uzun olması ve kent mimarisine kattığı estetik görünümü ile ön plana çıkmaktadır. Izgara kabuk sistemlerin yapı elamanlarında alüminyum, fiber glass, ahşap ve çelik yapı malzemesi kullanılabilmektedir [1,2,5].

Izgara kabuk sistemler güncel mimari algılara yeni bir soluk getirmiştir. Yapı tasarımında sağladığı kolaylıkların yanında mekân tasarımında da büyük avantajları bulunmaktadır [1,3,4]. Büyük açıklıkları kolaylıkla geçebilmesinin yanında yapı yüksekliği ile rahat ve konforlu mekânlar oluşturulabilmektedir [6,7]. Yüksek açıklıkların rahatlıkla geçilmesiyle beraber mekân tasarımında en önemli unsurlardan olan ölü alan oluşmasının önüne geçilmektedir. Böylelikle yoğun insan hareketi olacak mekânlarda karmaşanın önüne geçilebilmektedir. Mekân aydınlatmaları da ızgara kabuk sistemlerde estetik bir görünüm ile sağlanabilmektedir [1,8-10].

Dünyada yoğun insan hareketliliği olan birçok noktada kullanılmaktadır. Izgara kabuk sistemler başlıca müze, alışveriş merkezleri, kongre merkezleri, sergi alanları, botanik bahçelerinde tercih edilmektedir [1,9-13]. İngiltere'nin Londra şehrinde bulunan British Museum yapısının çatısında çelik ızgara kabuk konstrüksiyon uygulaması yapılmıştır. Dünyanın en eski müzelerinden olan British Museum dünyanın birçok yerinden turiste misafirlik eden yoğun insan hareketliliği oluşan mekânların başında gelmektedir. Geniş alana sahip olan çatısında farklı yüzey geometrisiyle beraber üçgen modül geometrisi ile birlikte çelik ızgara kabuk sistem kullanılarak estetik bir görünüm elde edilmiştir. Yeni eklenen çelik konstrüksiyon çatı kaplamasında cam yapı malzemesi kullanılarak hem alan aydınlatma sorununun önüne geçilmiş hem de kullanım ömrü uzun olan bir yapı oluşturulmuştur [3-5]. Şekil 1.'de British Museum binasının çatı kısmının uygulama öncesi ve sonrasına ait üstten görünümüne yer verilmiştir.



Şekil 1. British Museum çatı çelik ızgara kabuk uygulaması [4]

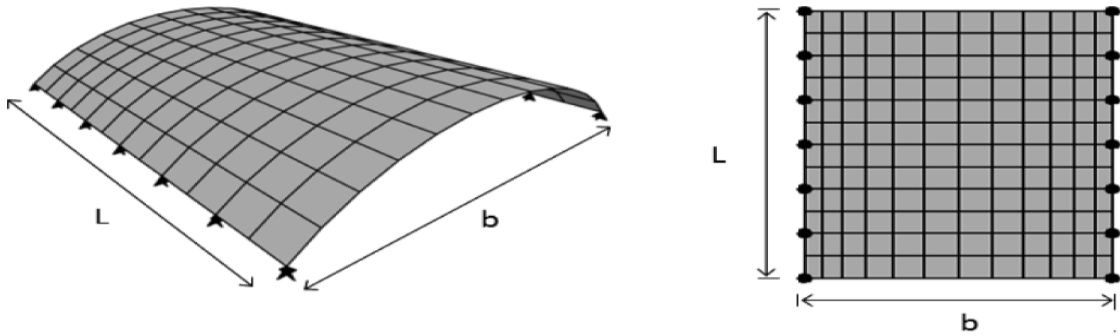
Estetik görünümü ile daha çok kültür sanat yapılarında kullanılan ızgara kabuk sistemlerin kullanıldığı bir diğer yapı ise Almanya'nın Berlin kentinde bulunan Deutsches Historisches Museum yapısıdır. British Museum yapısından farklı olarak üçgen modül geometrisi yerine dörtgen modül geometrisi tercih edilmiştir. Yapının avlu kısmında kullanılan ızgara kabuk sistem, 1.75metremodül boylarında dörtgen geometrisinden oluşmuştur. Avlu kısmı 40x40 metrelik bir alana sahiptir. Çift eğrilikli oluşturulan ızgara kabuk sistem modern yapısıyla yapıya estetik bir görünüm sağlamıştır [5,14,15]. Şekil 2.'de Deutsches Historisches Museum binasında uygulanan çelik ızgara kabuk uygulamasına yer verilmiştir.



Şekil 2. Deutsches Historisches Museum çatı çelik ızgara kabuk uygulaması [14]

Abedi ve ark.[16], çalışmalarında lamel desene sahip tek katmanlı ızgara kabuk tonoz sistemlerde aşık etkilerini göz önüne alarak stabilite davranışlarını incelemişlerdir. Tek katmanlı ızgara kabuk sistemlerin en büyük kullanım nedenlerinin geniş alanları kapatmak ve mimari görünümünün güçlü olmasını söylemişlerdir. Bu tür yapılarda çok fazla ince elemanın bulunmasından dolayı stabilite analizi yapılması gerektiği üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında analizler için sonlu elemanlar programı olan Abaqus kullanmışlardır. Analizler, 0.1 ve 0.3 basıklık oranına sahip 2 farklı model üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Modeller ölü yük, kar yükü, rüzgar yükü, deprem yükü ve sıcaklık değişimi altında değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca nadir ve orta kar yükü için 0.1 basıklık oranına sahip modelle sırasıyla 70x40x2 cm 100x50x3, 0.3 basıklık oranına sahip modelde ise 40x20x1.5 ve 40x40x1.5 cm kutu profil tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda aşık yapılarının kararsızlık modunu değiştirebileceğini ve asimetric kar yükleme durumunda yapısal taşıma kapasitesinin simetric kar yükleme durumuna göre daha az artış olduğunu söylemişlerdir [16]. Kaveh ve Mirzaei [17], çalışmalarında 3 farklı konfigürasyona sahip tek katmanlı ızgara kabuk sistemler için 5 farklı basıklık oranı kullanarak Meta-sezgisel algoritma adı verdikleri bir analiz yöntemini kullanarak oluşturdukları modellere boyut optimizasyonu uygulamışlardır. Çalışmalarında tüm modeller Asce 7-10 yönetmeliğine uygun olarak çelik boru profil tercih etmişlerdir. Çalışmalarında analizler sonucunda maksimum yer değiştirmeler, yapı elemanlarının maksimum taşıma kapasiteleri ve metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı parametrelerine bakılarak 0.17 basıklık oranında en ekonomik tasarım elde etmişlerdir. Sheidai ve ark. [18], çalışmalarında 4 farklı basıklık oranına sahip tek katmanlı ızgara kabuk sistemleri incelemişlerdir. Çalışma kapsamında oluşturulan tüm modellerde dörtgen modül

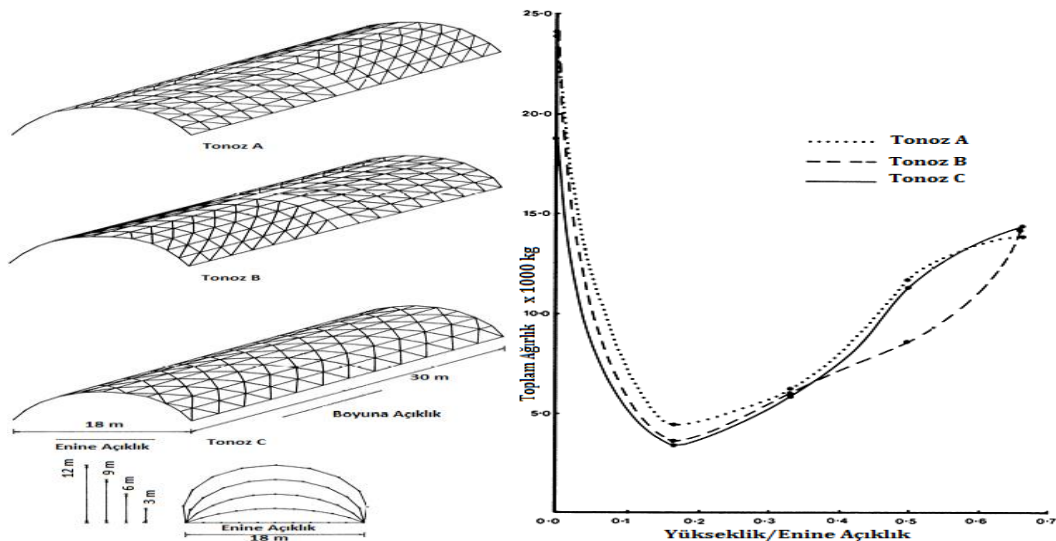
geometrisi ve yapı elemanlarında ise çelik kutu profil tercih etmişlerdir. Tüm modellerde enine açıklık 22 metredir. Boyuna açıklık ise yakın değerlere sahip olmasına karşın farklılık göstermektedir. Modellerin sahip oldukları basıklık oranları ise 0.12, 0.18, 0.23, 0.29 olarak belirlenmiştir. Çalışmalarının sonucunda tek katmanlı ızgara kabuk sistemlerde eğim açısının çökme yükünü direkt etki ettiği ve 0.2 basıklık oranında kritik hassasiyet gösterdiği sonucuna varmışlardır. Çökmenin mesnet noktalarından başladığı ve bundan dolayı bu tür yapılarda mesnet yerleşiminin önemli olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında tek katmanlı ızgara kabuk sistemlerin daha büyük basıklık oranına sahip olabileme yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 3.'te çalışma kapsamında oluşturulan modellerin 3 boyutlu ve üstten görünüşlerine yer verilmiştir. B enine açıklığı, L harfi ise boyuna açıklığı ifade etmektedir [18].



Şekil 3. Oluşturulan modellerin 3 boyutlu ve üstten görünüşleri [18]

Khalili ve ark. [19,20], Çalışmalarında 12 farklı model üzerinden tonoz tipi ızgara kabuk sistemleri incelemişlerdir. Yapılarda üçgen modül geometrisi kullanmışlardır. Çalışmalarında ızgara kabuk sistemlerde 6 kontrol noktası belirlemişlerdir. Analizleri 0.1, 0.3, 0.4, 0.5 basıklık oranlarına sahip modellerde 20, 40 ve 60 metre enine açıklık için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları kapsamında oluşturulan yapılarda çelik boru profil kullanmışlardır. Analizlerde yapı elemanlarında oluşan maksimum yer değiştirme miktarı ve yapıdaki taban kesme kuvveti parametrelerini karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda ise tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde enine açıklık arttıkça taban kesme kuvvetlerinin ve yer değiştirmelerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca 0.3 ve 0.4 basıklık oranında 40 ve 60 metre enine açıklıkta yakın yer değiştirmeler meydana gelmiştir.

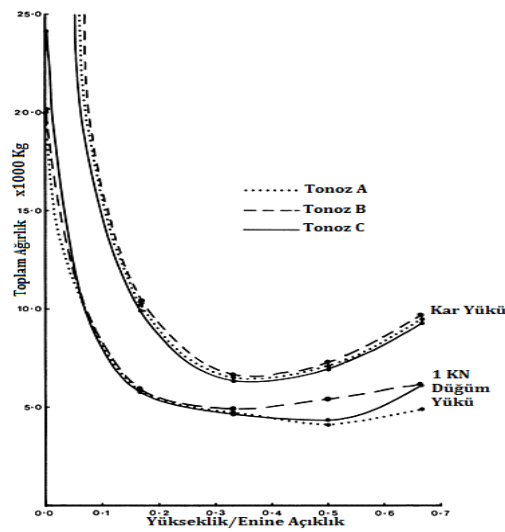
Makowski[21], çalışmasında 3 farklı yüzey geometrisine sahip olan tonoz tipi ızgara kabuk sistemin yapısal davranışını incelemiştir. Çalışma da her 3 tonoz tipi ızgara kabuk sistem 0.17, 0.34, 0.5 ve 0.67 basıklık oranı için analizleri gerçekleştirilmiştir [21]. Şekil 4.'te 3 farklı yüzey geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemlere ve analizler sonucunda elde edilen taşıyıcı sistem ağırlıklarına yer verilmiştir.



Şekil 4. 3 farklı yüzey geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemler ve taşıyıcı sistem ağırlık karşılaştırılması [21]

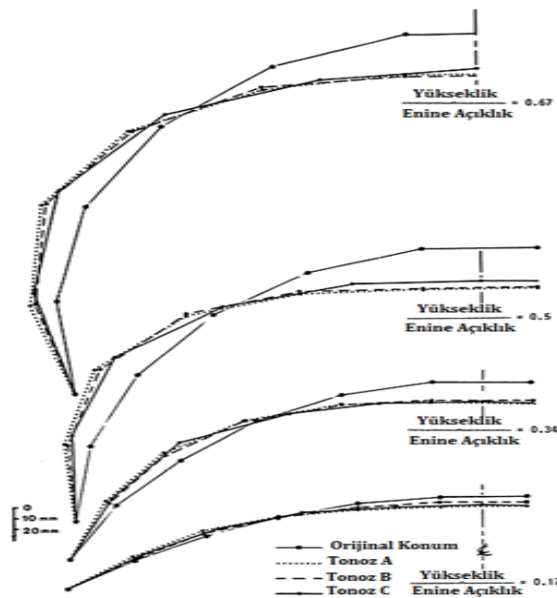
Makowski [21], çalışma kapsamında tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde enine açıklık 18 metre ve boyuna açıklık ise 30 metre olarak belirlenmiştir. Basıklık oranları 0.67, 0.5, 0.34, 0.17 basıklık oranları için sırasıyla yapı yükseklikleri 12 m, 9 m, 6 m, 3 m olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde tonoz tipi ızgara kabuk sistemler kendi ağırlıkları üzerinden analizleri gerçekleştirilmiş ve 0.17 basıklık oranında en az taşıyıcı sistem ağırlığı elde edilmiştir [21,22].

Çalışmanın diğer bölümünde modeller 1 KN (Kilonewton) düğüm yükü ve kar yükü altında analiz edilmiştir. Analizler sonucunda kar yükü altında tüm 3 farklı yüzey geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde 0.34 basıklık oranında en az taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır [21]. Şekil 5.'te 3 farklı tonoz tipi ızgara kabuk sistemler kar yükü ve 1 KN (Kilonewton) düğüm yükü altında elde edilen taşıyıcı sistem ağırlıklarına ait grafiğe yer verilmiştir.



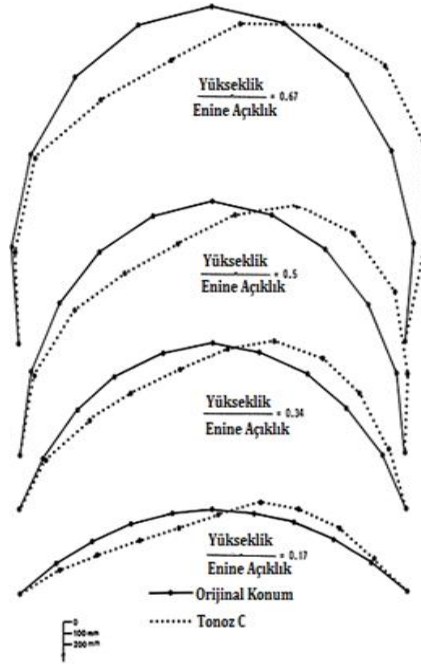
Şekil 5. 3 farklı tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerin kar ve 1 KN düğüm yükü altında taşıyıcı sistem ağırlık karşılaştırılması [21]

Çalışmanın ikinci bölümünde tüm tonoz tipi ızgara kabuk sisteme simetrik yükleme, C tipi tonoz ızgara kabuk sisteme ise asimetrik yükleme gerçekleştirilmiştir [21]. Şekil 6'da tüm tonoz tipi ızgara kabuk sistemlere uygulanan simetrik yükleme durumunda meydana gelen yer değiştirmeler ölçekli olarak yer verilmiştir.



Şekil 6. 3 farklı tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde simetrik yükleme durumunda oluşan yer değiştirme [21]

Makowski [21], çalışmanın son bölümde C tipi tonoz ızgara kabuk sisteme asimetrik yükleme altında analizleri gerçekleştirmiştir. Şekil7.'de C tipi tonoz ızgara kabuk sistemde asimetrik yükleme durumunda oluşan yer değiştirmelere ölçekli olarak yer verilmiştir. Asimetrik yükleme durumunda C tipi tonoz ızgara kabuk sistemde yer değiştirmelerde simetrik yüklemeye göre artış gözlenmiştir. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde asimetrik yükleme durumu taşıyıcı sistemi olumsuz etkilemektedir [21].



Şekil 7. C tipi tonoz ızgara kabuk sistemde asimetrik yükleme durumunda oluşan yer değiştirme [21]

Yapılan literatür araştırmasında ızgara kabuk sistemlerin birçok farklı formda tasarlanabildiği görülmüştür [21,23-27]. Izgara kabuk sistemlerde yüzey geometrisinin, modül geometrisinin yanında yapının yükseklik/açıklık (Basıklık Oranı) oranının büyük önem arz ettiği görülmüştür [17,18-,23-27,]. Literatürde bu tür taşıyıcı sistemlerde 0.2 basıklık oranının altında yapısal sorunlar ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır [18,21,28-30]. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemler üzerine yapılan literatür çalışmasında Makowski [21,22], Abedi ve ark. [16], Kaveh ve Mirzaei [17], Khalili ve ark. [19,20], çalışmaları dikkate alınarak ve tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde kullanım amacına uygun yapı oluşturma amacıyla çalışma kapsamında oluşturulan tüm modellerde basıklık oranı 0.35 olarak belirlenmiştir.

Çalışmada tonoz tipi çelik ızgara kabuk taşıyıcı sistemlerde ekonomik olarak yüksek açıklık geçebilmek amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında yapılarda yüksek hacim oluşturma, ekonomik yapı oluşturma ve yapı güvenliği ön planda tutulmuştur. Çalışma, farklı modül geometrilerinden meydana getirilerek tasarlanan tonoz tipine sahip çelik ızgara kabuk çelik konstrüksiyonlar için tasarımcılara yol gösterecektir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

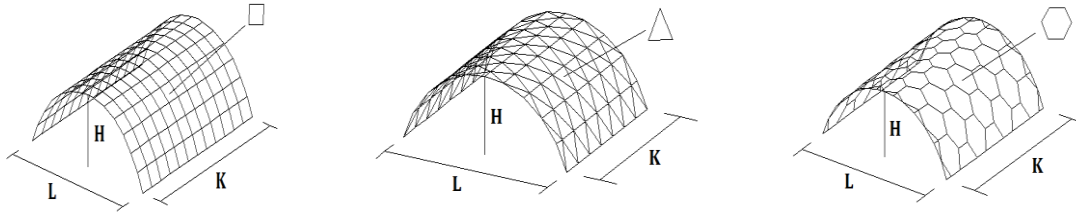
Çalışmada çevresel koşullar altında tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerin taban alanına düşen taşıyıcı sistem ağırlığı cinsinden farklı açıklıklar için karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapıların modellenmesinde yapısal analiz programı olan SAP2000 kullanılmıştır. Izgara kabuk sistemlerde sistemlerin tasarımında literatürde; alüminyum, fiberglass, ahşap ve çelik yapı malzemesi tercih edilebilmektedir. Tercih edilen malzeme tipine göre farklı birleşim detayları oluşturulmaktadır [1,3,10,11]. Çalışma kapsamında oluşturulan modellerde S275 standardına sahip yapı çeliği tercih edilmiştir. Tablo 1'de S275 standardına sahip yapı çeliğini malzeme özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 1. S275 Malzeme Özellikleri

Malzeme Özellikleri	N/mm ² (Newton/milimetrekare)
Akma Gerilmesi (Fy)	275
Kopma Gerilmesi (Fu)	430

Öncelikli olarak modellerde kullanılan yapı elemanlarına kesit tayini yapılmıştır. Yapılar da tasarım aşaması Amerikan AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan modellerde tasarım aşamasında ASD (Allowable Strength Design) emniyetli dayanıma göre tasarım yöntemi tercih edilmiştir. Tüm modellerde mesnetlenme koşulları ankastre olarak programa tanıtılmıştır.

Modellenen yapılar farklı açıklıklar boyunca 0.35 basıklık oranı için dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrileri aralarında yapısal davranışları karşılaştırılmıştır. İlk olarak her 3 modül geometrisi için en uygun modül boyları tespit edilmiştir. Her bir modül geometrisinde yapı ağırlıkları üzerinden en uygun modül boyları bulunularak modül geometrileri kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Şekil 8’de 3 farklı modül geometrisine sahip tonoz tipi ızgara kabuk sistemlere yer verilmiştir.



Şekil 8. Farklı modül geometrilerine sahip ızgara kabuk sistemler

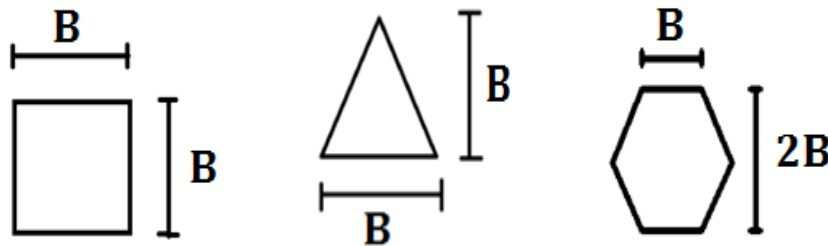
Şekil 8.’de gösterilen modellerde L harfi açıklığı, H harfi yapı yüksekliğini, K harfi ise yapı derinliğini temsil etmektedir.

Modeller 20, 30, 40 ve 50 metre açıklık için analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapı yükseklikleri her açıklık için basıklık oranı 0.35’i sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 2’de her bir açıklık için belirlenen yapı yüksekliklerine yer verilmiştir.

Tablo 2. Yapı yükseklikleri

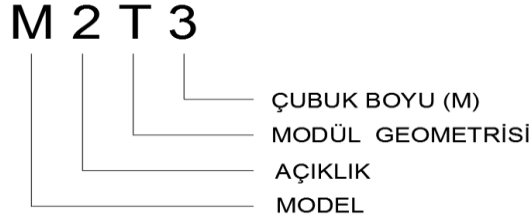
Açıklık (m)	Yapı Yüksekliği (m)
20	7
30	10.5
40	14
50	17.5

Şekil 9.’da 3 modül geometrisi için alt parametre olan modül boyuna yer verilmiştir. Şekilde gösterilen B harfi 3 modül geometrisi içinde modül boyunu ifade etmektedir. Şekil 9.’ da sırasıyla dörtgen, üçgen ve altıgen modül geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 9. 3 modül geometrine ait modül boyu gösterimi

Çalışmada oluşturulan modeller sahip oldukları açıklık, modül geometrisi ve modül boylarına göre 4 haneli kodlanmıştır. Şekil 10'da model numaralarının kodlama gösterimine yer verilmiştir. Açıklık kısaltması açıklık miktarının ilk sayısına uygun olarak yapılmıştır. Modül geometrisinin kodlaması dörtgen için S harfi (Square), üçgen için T harfi (Triangle), altıgen için ise H harfi (Hexagonal) kullanılmıştır.



Şekil 10. Modellerin numaralarının kodlanış gösterimi

Çalışmada ilk olarak 20, 30, 40 ve 50 metre açıklıkta oluşturulan modellerde dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrilerinde analizlerde dikkate alınan yüklenme durumları ve sınır koşullar için en uygun modül boyları tespit edilmiştir. Dörtgen ve üçgen modül geometrisinde modül boyu 2 metreden başlayarak yarım metre artırılarak 4 metre modül boyuna kadar analizleri gerçekleştirilmiştir. Altıgen modül geometrisinde ise analizler 3 metre modül boyunda başlamıştır. Tablo 3'te oluşturulan bütün modellere ait geometrik parametrelere ait değerlere yer verilmiştir.

Tablo 3. Model geometrik parametreleri

Açıklık (m)	Model Numaraları	H(m)	K (m)
20	M2S2-M2T2	7	24
	M2S3-M2T3	7	27
	M2H3	7	33
	M2H4	7	32
	M2S3.5-M2T3.5-M2S4-M2T4-M2H3.5	7	28
	30	M3S2-M3T2	10.5
M3S3-M3T3		10.5	27
M3S3.5-M3T3.5-M3S4-M3T4-M3H3.5		10.5	28
M3H3		10.5	33
40	M4S2-M4T2	14	26
	M4S3-M4T3	14	27
	M4H3	14	33
	M4S3.5-M4T3.5 M4H3.5	14	28
50	M5S2-M5T2	17.5	26
	M5S3-M5T3	17.5	27
	M5S3.5-M5T3.5-M5H3.5-M5S4-M5T4	17.5	28
	M5H4	17.5	32
	M5H3	17.5	33

Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde K harfi ile gösterilen yapı derinliği değişkenlik göstermektedir. Yapı derinliği modül geometrilerine göre 24 metre ile 33 metre aralığında seçilmiştir. Modellerde 140x140 dan başlayarak maksimum 400x400 SHS tercih edilmiştir. Analizlerde kullanılan kesitlerde üretim ve montaj aşamasında kolaylık sağlaması nedeniyle kesit ebatlarında değişiklik yapılmamış ve cidar kalınlıkları maksimum 15 mm'yi geçmeyecek şekilde tasarımı yapılmıştır. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde farklı profil kesit kullanılması montaj aşamasında birleşim bölgelerinde montaj zorluğu meydana getirmektedir. Tablo 4'te çalışmada kabul edilen sınır durum ve yüklenme koşulları için optimum sınırları belirlenen modellerde kullanılan profil kesit özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 4. Optimum Modellerde kullanılan kesit özellikleri

Açıklık (m)	Optimum Model Numaraları	Kullanılan Profil (mm)
20	M2S4	SHS140x140X4/7/8
	M2T4	SHS140X140X4/5
	M2H3.5	SHS250X250X4/5/./9
30	M3S4	SHS220X220X4/5/./8
	M3T4	SHS200X200X4/7
	M3H3	SHS280X280X4/5/./9/11/13
40	M4S3	SHS280X280X4/5/6/7/8
	M4T3.5	SHS250X250X4/5/6/10
	M4H3	SHS350X350X4/5/6/./10
50	M5S4	SHS350X350X4/5/6/7/8
	M5T4	SHS350X350X4/5/9
	M5H3	SHS400X400X4/5/./12

Optimum modeller 3 yükleme durumu altında analiz edilmiş ve yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır. Analizlerde kullanılan yükler G (Ölü Yük) , K (Kar Yüğü), SK (Sol Kar Yüğü), SR (Sol Rüzgâr) yüklemelerinden oluşmaktadır. Tanımlanan yükler üç şekilde kombine edilmiş ve sonuçlar bu durumlar için elde edilmiştir.

- G+K
- G+SK
- G+SR

III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışmada oluşturulan modellerin tümünde SHS (Square Hollow Section) çelik kutu profil kesit kullanılmıştır. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde genellikle ekstenel basınç altında kritik burkulmalardan dolayı gevrek göçme meydana gelmektedir. Bu sebepten dolayı tasarım aşamasında yapı elemanlarına kesit tayini yapılırken yapı elemanlarının kapasitelerinin %70 kapasiteyi geçmeyecek şekilde kesit tayini yapılmıştır. Kapasite sınırının %70'nin altında tutulması ile kesitlere gelen maksimum yük değerinin, o kesit için hesaplanan kritik burkulma yükünün ortalama 2/3'de kalınması amaçlanmıştır.

Tasarlanan sistemlerde açıklık boyunca yer değiştirme rijitliği diğer yöndeki yer değiştirme rijitliğinden görece olarak düşük olması sebebi ile tüm modellerde açıklık doğrultusu olan X yönündeki doğal titreşim periyotları karşılaştırılmıştır. Modellerdeki eksen yerleşimi şekil 7 üzerinde gösterilmiştir. Tablo 5'te 20 metre açıklığa ait modellerin Modal analiz sonucunda elde edilen X yönü 1. Doğal titreşim periyotlarına yer verilmiştir.

Tablo 5. 20 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1. doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
20	Dörtgen	2	0.465
		3	0.418
		3.5	0.407
		4	0.456
20	Üçgen	2	0.542
		3	0.452
		3.5	0.504
		4	0.484
20	Altıgen	3	0.256
		3.5	0.289
		4	0.282

Tablo 5'te 20 metre açıklık için oluşturulan modellerin 1. Doğal titreşim periyotları incelendiğinde en rijit yapı davranışı diğer iki modül geometrisine göre altıgen modül geometrisinde olduğu görülmektedir. Altıgen modül geometrisinde 1.doğal titreşim periyotları 3 metre modül boyunda 0.256 saniye, 3.5 metrelik modül boyunda 0.289 saniye, 4 metrelik modül boyunda ise 0.282 saniye olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6’da 30 metre için oluşturulan dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrilerinde modellenen yapıların X yönü 1.doğal titreşim periyot değerlerine yer verilmiştir.

Tablo 6. 30 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1.doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
30	Dörtgen	2	0.694
		3	0.535
		3.5	0.594
		4	0.586
30	Üçgen	2	0.770
		3	0.670
		3.5	0.660
		4	0.635
30	Altıgen	3	0.475
		3.5	0.444

Tablo 6.’da 30 metre açıklık için modellenen yapıların 1.doğal titreşim periyotları incelendiğinde 20 metre açıklıkta da olduğu gibi altıgen modül geometrisi en rijit yapı görülmüştür. Altıgen modül geometrisini, dörtgen modül geometrisi takip etmiştir. 30 metre açıklıkta üçgen modül geometrisinde en yüksek 1. Doğal titreşim periyot değerleri görülmüştür.

Tablo 7’de 40 metre açıklıkta oluşturulan modellerin X yönü 1.doğal titreşim periyotlarına yer verilmiştir.

Tablo 7. 40 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1.doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
40	Dörtgen	2	0.987
		3	0.827
		3.5	0.824
40	Üçgen	2	0.963
		3	0.915
		3.5	0.887
40	Altıgen	3	0.654
		3.5	0.709

Tablodaki 1.doğal titreşim periyot değerleri incelendiğinde de en rijit yapı davranışı altıgen modül geometrisinde gerçekleşmiştir. Altıgen modül geometrisi 0.65-0.7 saniye periyot değerleri gözlenirken dörtgen ve üçgen modül geometrilerinde 0.8-1 saniye aralığında periyot değerleri gözlenmiştir.

Tablo 8’de 50 metre açıklıkta oluşturulan modellerin X yönü 1.doğal titreşim periyotlarına yer verilmiştir.

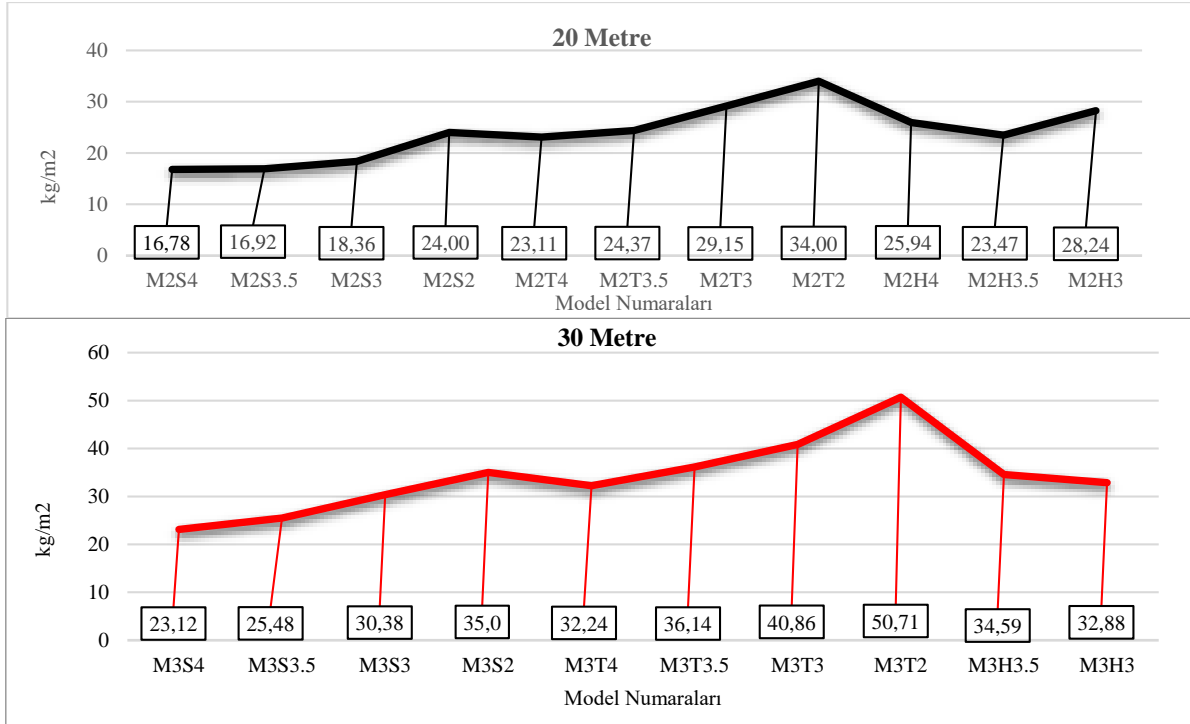
Tablo 8. 50 metre açıklıkta oluşturulan modellerin 1.doğal titreşim periyot değerleri

Açıklık (m)	Modül Geometrisi	Modül Boyu(m)	X Yönü 1.Doğal Titreşim Periyotları (saniye)
50	Dörtgen	2	1.065
		3	1.024
		3.5	1.017
		4	1.007
50	Üçgen	2	1.249
		3	1.015
		3.5	1.016
		4	1.006
50	Altıgen	3	0.881
		3.5	0.870
		4	0.890

Çalışmadaki son açıklık olan 50 metre açıklıkta modellenen yapıların 1.doğal titreşim periyotları incelendiğinde en rijit yapı davranışı diğer tüm açıklıklarda olduğu gibi altıgen modül geometrisinde görülmüştür.

Altıgen modül geometrisinde yaklaşık 0.88 saniye periyot değerleri gözlenirken dörtgen ve üçgen modül geometrilerinde 1 saniye civarlarında periyot değerleri gözlenmiştir.

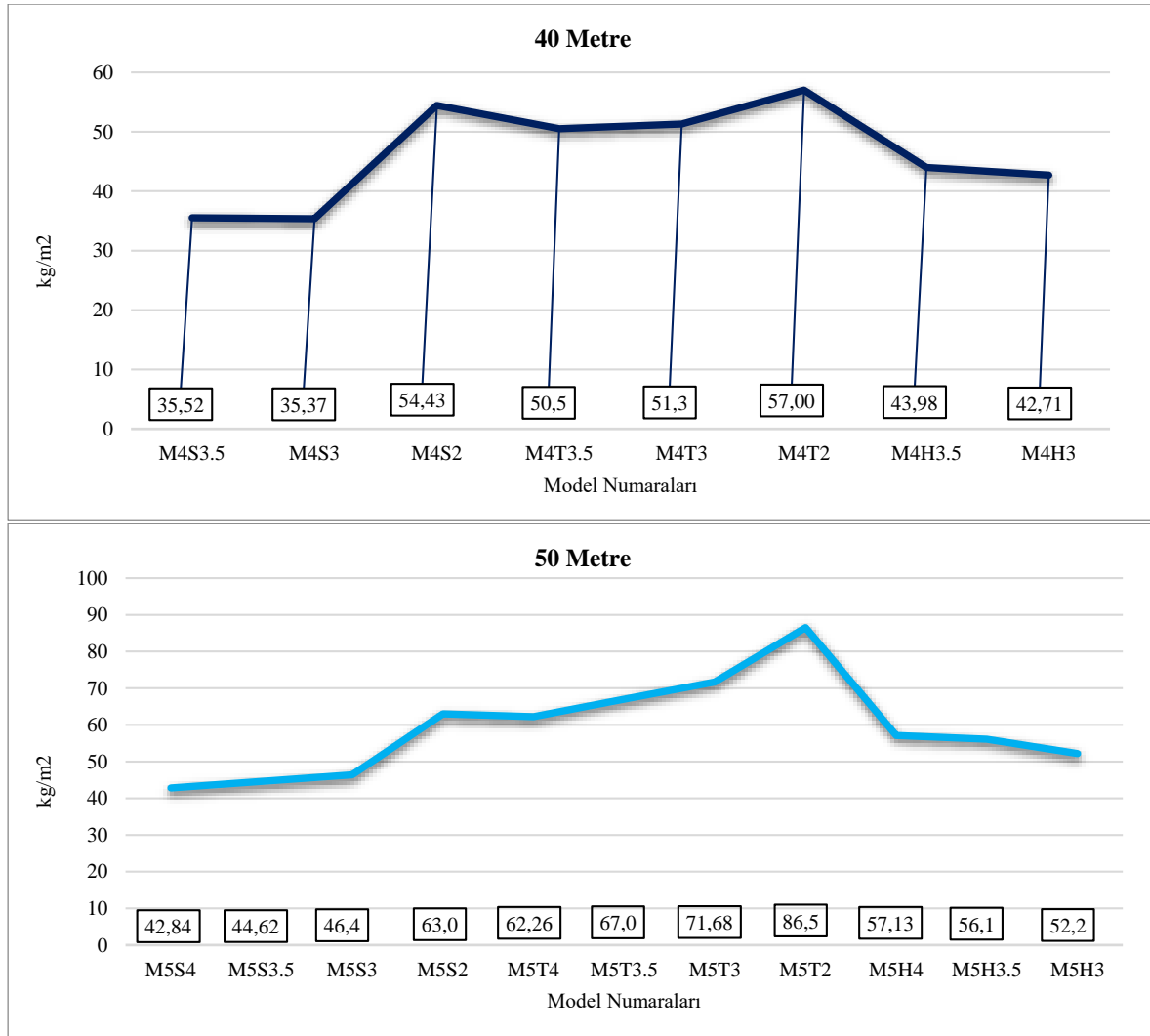
Çalışmada kullanılan modüllerin metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları bakımından kıyaslanması amacıyla, her bir açıklık için 150 kg/m² yayılı yük durumu için kesit dağılımları hesaplanmıştır. Şekil 11.'de 20 ve 30 metre açıklıklarda analizleri gerçekleştirilen modellerin m²'ye düşen kg cinsinden metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıklarına yer verilmiştir.



Şekil 11. 20 ve 30 metre açıklık için oluşturulan modellerin kg/m² cinsinden ağırlık karşılaştırılması

Şekil 11 incelendiğinde 20 metre açıklık için dörtgen modül geometrisine en uygun modül boyu 4metre, üçgen modül geometrisinde 4 metre, altıgen modül geometrisinde ise 3.5 metre modül boyu diğer modül boylarına sahip modellere göre daha az taşıyıcı sistem ağırlığına sahiptir. 30 metre açıklık için ise dörtgen modül geometrisinde 4 metre, üçgen modül geometrisinde 4 metre, altıgen modül geometrisinde ise 3 metre modül boyunda en az metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır.

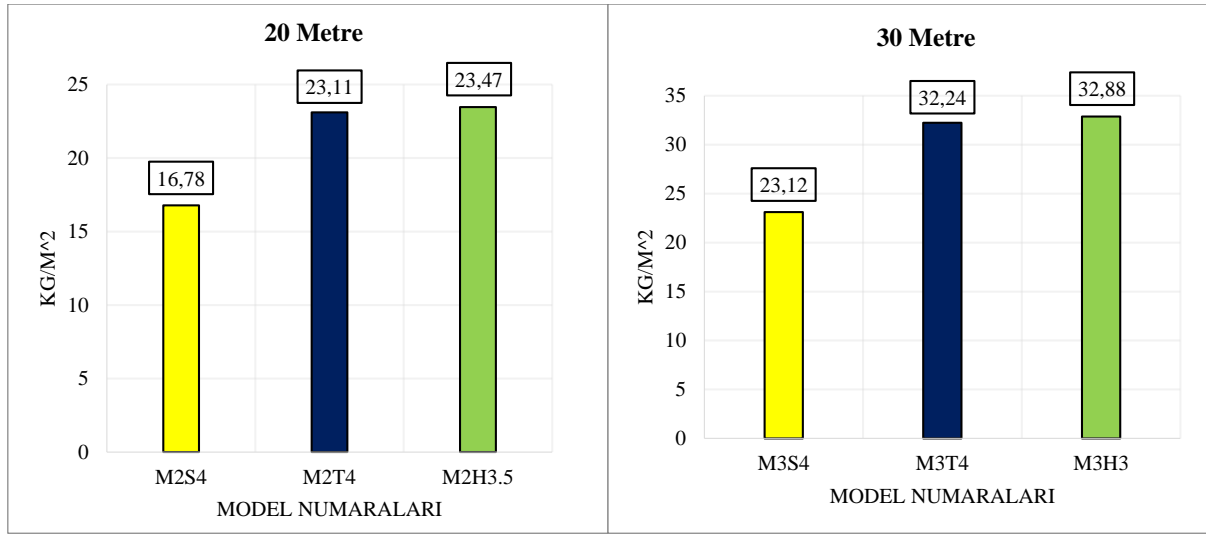
Analizler 40 ve 50 metre açıklık da gerçekleştirilmiştir. Şekil 12.'de 40 ve 50 metre açıklığa sahip yapıların m²'ye düşen kg cinsinden taşıyıcı sistem ağırlıkları gösterilmiştir.



Şekil 12. 40 ve 50 metre açıklık için oluşturulan modellerin kg/m² cinsinden ağırlık karşılaştırılması

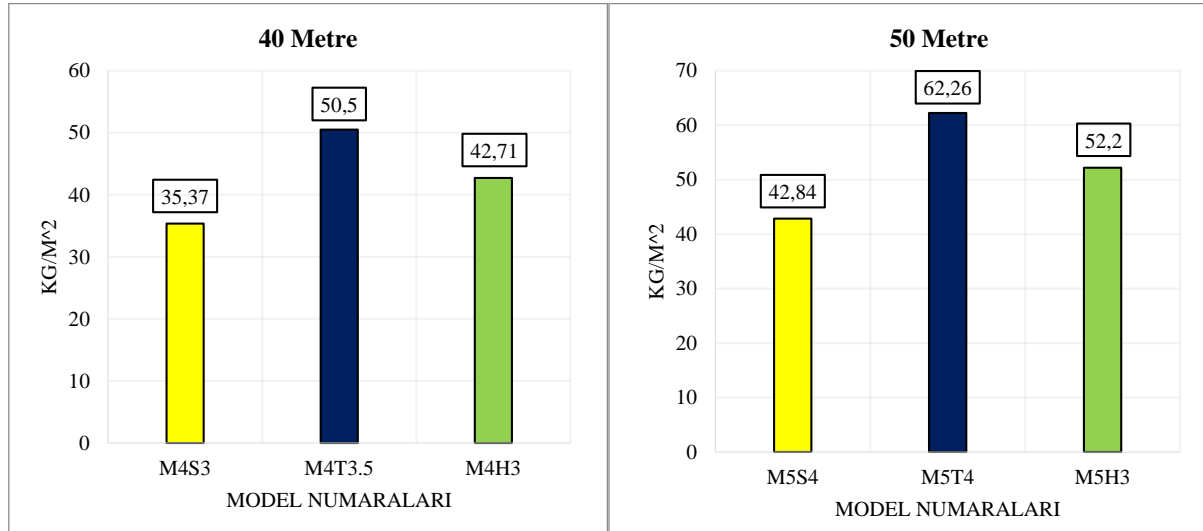
Şekil 12. incelendiğinde 40 metre açıklık için dörtgen modül geometrisinde en uygun modül boyu 3 metre, üçgen modül geometrisinde 3.5 metre, altıgen modül geometrisinde ise 3 metre modül boyu diğer modül boylarına sahip modellere göre daha az taşıyıcı sistem ağırlığına sahiptir. 50 metre açıklık için ise dörtgen modül geometrisi ve üçgen modül geometrisi için 4 metre, altıgen modül geometrisi içinse 3 metre modül boyunda en az taşıyıcı sistem ağırlığına ulaşılmıştır. Bütün açıklıklara bakıldığında dörtgen ve üçgen modül geometrisi için 4 metrelik modül boyu en uygun modül boyu olmuştur. 40 metre açıklık istisna olarak dörtgen ve üçgen modül geometrisinde farklılık oluşmuştur. Dörtgen modül geometrisinde modül boyu 1 metre azalarak 3 metre olurken, üçgende ise 0.5 metre modül boyu azalarak 3.5 metre modül boyunda en uygun sonuç yakalanmıştır. Altıgen modül geometrisinde ise 30, 40 ve 50 metre açıklıklarda en uygun boyu 3 metre olarak gerçekleşirken 20 metre açıklık da modül boyu diğer açıklıklara göre 0.5 metre artarak, 3.5 metre modül boyu olarak gerçekleşmiştir.

Çalışmada tüm açıklıklarda dörtgen, üçgen ve altıgen modül geometrisi için en uygun modül boyu tespit edilmiştir. En uygun modül boyları tespit edilen modül geometrileri için açıklık parametresi altında karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 13'te 20 ve 30 metre açıklık için en uygun modül boylarında 3 modül geometrisi kendi aralarında karşılaştırılmıştır.



Şekil 13. 20 ve 30 metre açıklık için en uygun modül boylarında 3 modül geometrisi ağırlık karşılaştırılması

3 modül geometrisi en uygun modül boyları için karşılaştırıldığında hem 20 metre hem de 30 metre açıklıkta metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı en az dörtgen modül geometrisinde elde edilmiştir. Üçgen ve altıgen modül geometrilerine bakıldığında yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 14'te 40 ve 50 metre açıklıkta en uygun modül boylarında ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.



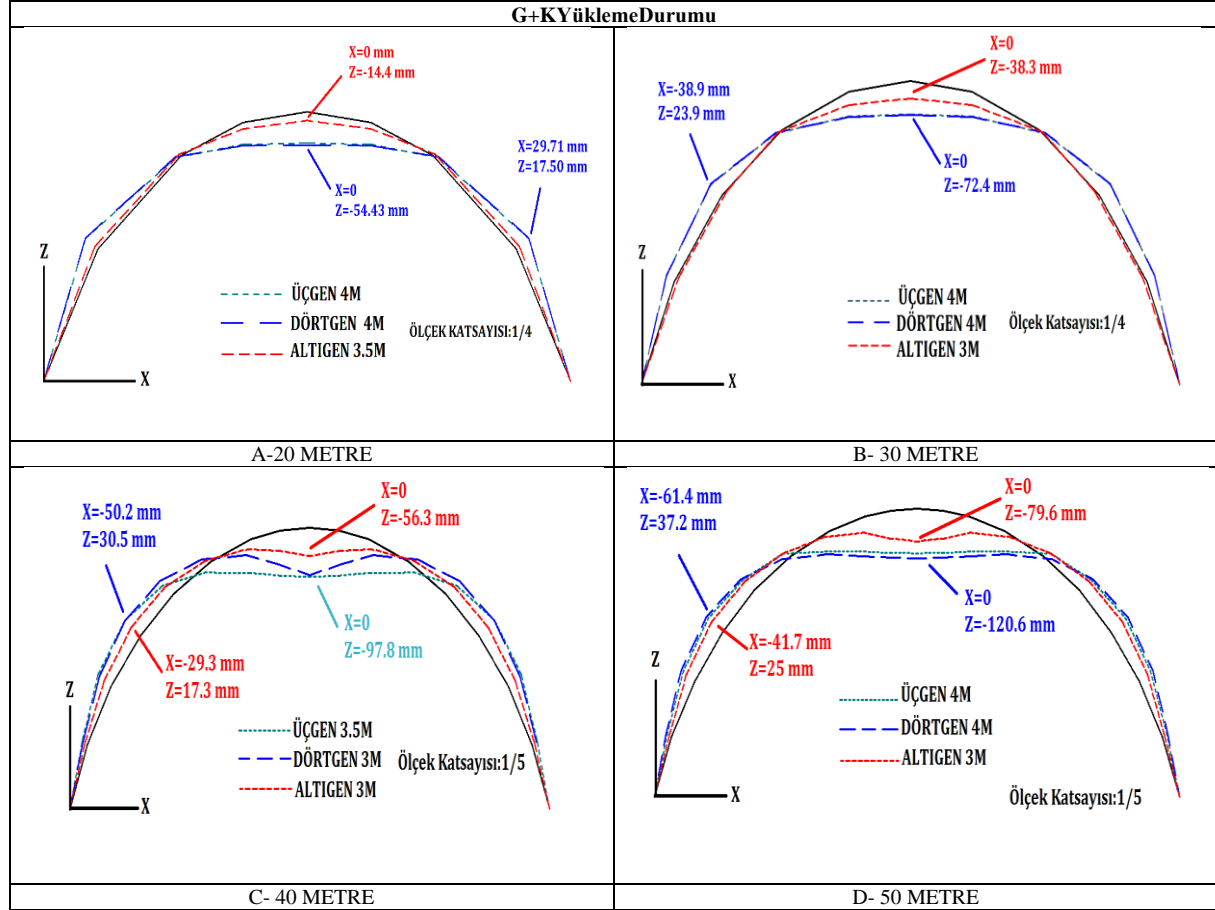
Şekil 14. 40 ve 50 metre açıklık için en uygun modül boylarında 3 modül geometrisi ağırlık karşılaştırılması

40 ve 50 metre açıklıkta da diğer açıklıklarda olduğu gibi metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı en az dörtgen modül geometrisinde sağlanmıştır. Bu açıklıklarda diğer açıklıklardan farklı olarak üçgen ve altıgen modül geometrilerinde görece farklar oluşmuştur. Her iki açıklıkta da dörtgen modül geometrisini altıgen modül geometrisi takip etmiştir. Son açıklık olan 40 ve 50 metre de en fazla metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları üçgen modül geometrisinde çıkmıştır.

Çalışmanın son bölümünde tüm açıklıklar için her 3 modül geometrisinde en uygun modül boyları tespit edilen yapılar kar, asimetrik kar ve rüzgar yüklemesi altında yer değiştirmeleri incelenmiştir [31]. Modellenen yapılar Isparta ilinin merkez ilçesinde bulunduğu dikkate alınarak kar yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılara H/3 yapı yüksekliğine kadar olan yapı elemanlarına 60 kg/m², H/3 yapı yüksekliğinin üzerinde olan yapı elemanlarına ise 120 kg/m² kar yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada oluşturulan tonoz tipi çelik ızgara kabuk sistemlerde sehim şartı düşey yer değiştirmelerin açıklığa oranı L/300 sınır şartını aşmaması gerekir. L harfi açıklığı ifade

etmektedir. Şehim şartı 20 metre açıklık için 66.67 mm, 30 metre için 100 mm, 40 metre için 133.33 mm ve 50 metre açıklık için ise 166.67 mm'dir.

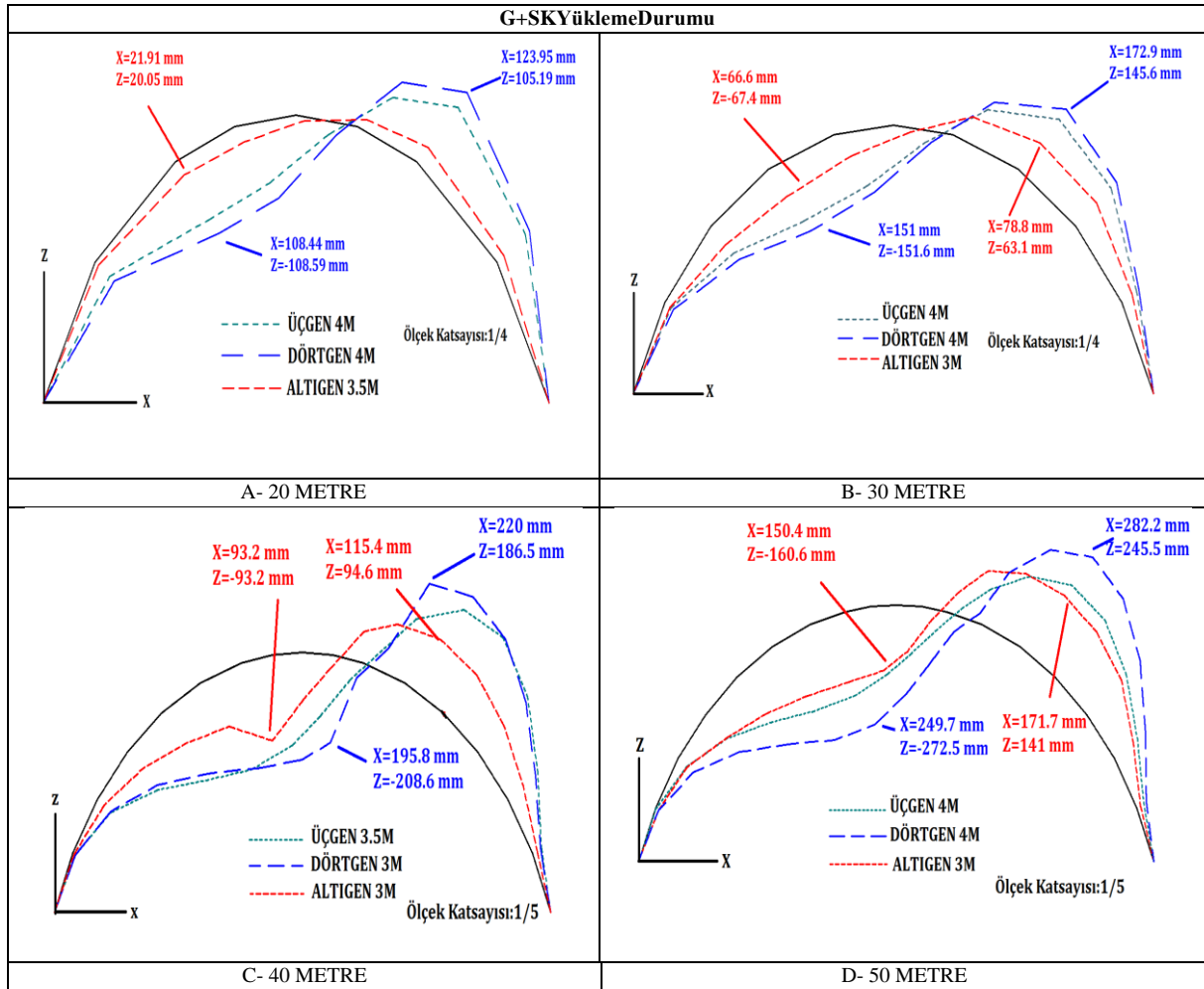
Şekil 15'te 20, 30, 40, 50 metre açıklıklarda en uygun modül boyları belirlenen modül geometrilerine ait yapıların G+K yüklemesi altında meydana gelen yer değiştirmelere yer verilmiştir.



Şekil 15. Tüm açıklıklarda en uygun modellerin G+K yüklemesi durumunda meydana gelen yer değiştirme

Şekil 15.'te m^2 'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modellerde G+K yüklemesinde meydana gelen yer değiştirmeler karşılaştırılmalı gösterimi grafiklerde yer alan ölçek katsayısı kullanılarak gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm açıklıklarda düşey yer değiştirmeye en dirençli modül geometrisinin altıgen modül geometrisi olduğu görülmektedir. Tüm açıklıklarla G+K yüklemesi durumunda şehim şartı sağlanmıştır.

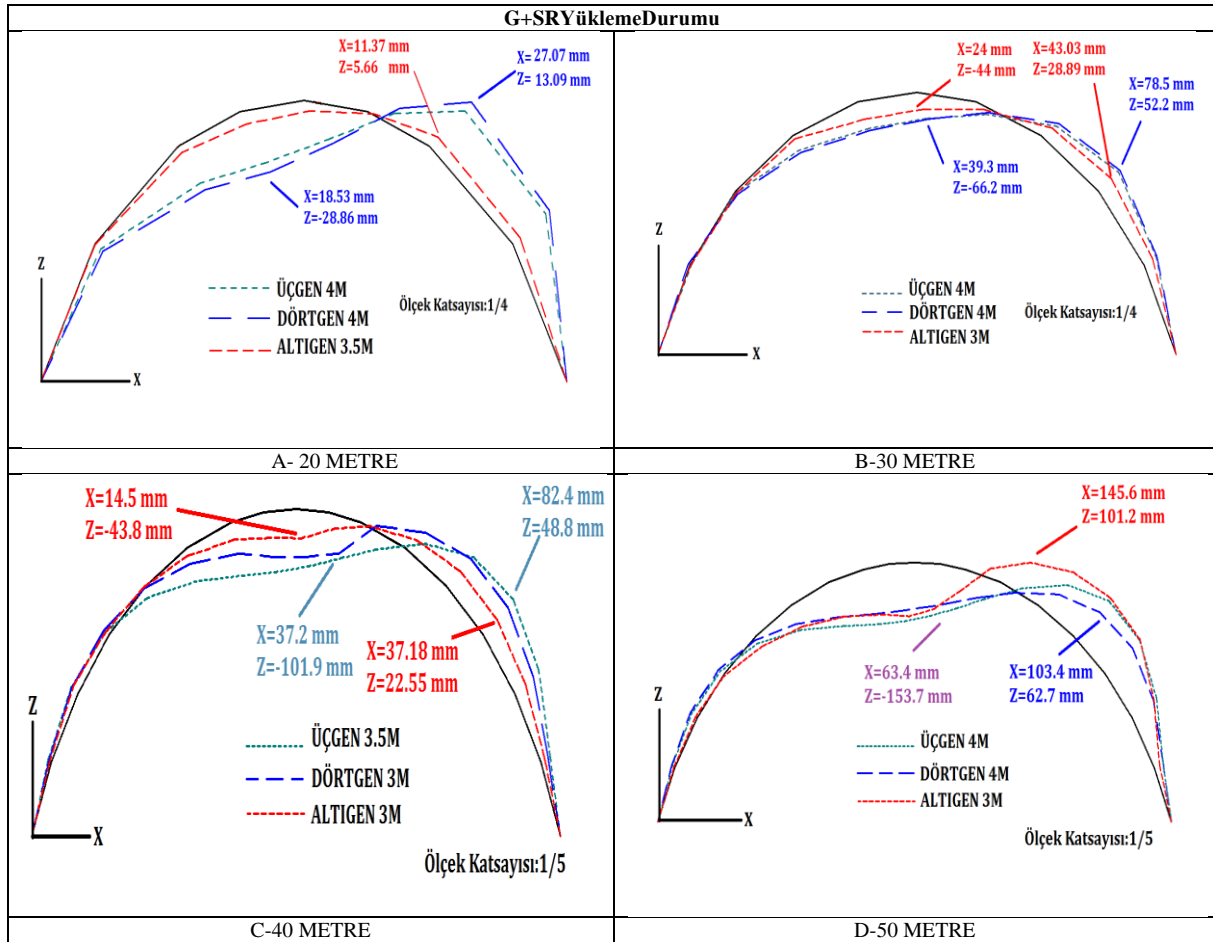
G+K yüklemesi sonrasında m^2 'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modellere asimetrik kar yüklemesi uygulanmıştır. Yapıların sadece sol bölümünde kar durumunun olduğu dikkate alınmıştır. Şekil 16'da G+SK asimetrik kar yüklemesi altında m^2 'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modeller de meydana gelen düşey yer değiştirmelere yer verilmiştir.



Şekil 16. Tüm açıklıklarda en uygun modellerin G+SK asimetrik kar yüklemesi altında meydana gelen yer değiştirme

Şekil 16'da asimetrik kar yüklemesi altında yer değiştirmeler incelendiğinde 20 ve 30 metre açıklıklarda üçgen ve dörtgen modül geometrilerinde yakın yer değiştirmeler ortaya çıkmıştır. Açıklığın arttığı 40 metre açıklıkta altıgen ve dörtgen modül geometrilerinde yapısal davranışı etkileyecek ve göçme mekanizmasını etkileyecek yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Yapılan analizde tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde literatürde benzer olarak asimetrik yüklemeye altında tüm modül geometrilerinde yer değiştirmeler artış görülmüştür. Açıklıklarında hepsinde altıgen ve üçgen modül geometrisinde sehim şartı sağlanırken, dörtgen modül geometrisinde sehim şartı sağlanmamıştır. Tüm açıklıklarda dörtgen modül geometrisinde asimetrik kar yüklemesi olumsuz etkilenmiştir.

Şekil 17'dem²'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan en uygun modellerde rüzgâr etkisi altında meydana gelen yer değiştirmelere yer verilmiştir.



Şekil 17. Tüm açıklıklarda en uygun modellerin G+SR yükleme durumu altında meydana gelen yer değiştirme

Şekil 17'de G+SR yükleme durumunda meydana gelen yer değiştirmeler incelendiğinde tüm yükleme durumunda olduğu gibi yer değiştirmeye en dirençli modül geometrisi altıgen olmuştur. Tüm açıklıklarda G+SR yükleme durumunda sehim şartı sağlanmıştır. Dörtgen ve üçgen modül geometrisinin ise yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tonoz tipi ızgara kabuk sistemler incelendiğinde, bu çalışma modül geometrilerinin toplam taşıyıcı sistem ağırlığına doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Farklı modül geometrileri ve modül boylarının yapı ağırlığına etkisinin yanında yapı davranışına olan etkisi de göz ardı edilmemelidir. Yapılan analizler sonucunda 20, 30, 40 ve 50 metre açıklıklar boyunca 3 farklı modül geometrilerinin metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır. Bütün açıklıklar için oluşturulan modellerde 0.35 basıklık oranı sabit tutulmuştur. Tonoz tipi ızgara kabuk sistemlerde yapı derinliğinin burkulma davranışına etki göstermesinden dolayı bütün modül geometrileri ve modül boyları için yapı derinlikleri yakın tutulmuştur.

Çalışmada modellenen tonoz tipi ızgara kabuk sistemler AISC 360-10 Amerikan çelik tasarım yönetmeliğine uygun olarak ASD emniyetli dayanıma göre tasarım metodu ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analizi gerçekleştirilen yapılarda çelik kutu profil (SHS) kullanılmış olup, yapı elemanların da profil et kalınlıkları birbirine yakın tercih edilmiştir.

- Çalışmanın ilk bölümünde modellerin analizleri gerçekleştirildiğinde tüm açıklıklarda altıgen modül geometrisi diğer modül geometrileri olan dörtgen ve üçgene göre daha rijit yapı davranışı sergilediği görülmüştür.

- Analizleri gerçekleştirilen modeller daha sonra yapı elemanlarının %70 kapasiteyi aşmamasına dikkat edilerek tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan modeller nihai metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan yapı ağırlıkları yapının kapladığı taban alanına bölünerek kg/m² cinsinden m²'ye düşen taşıyıcı sistem ağırlığı elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde dörtgen modül geometrisinde, diğer modül geometrileri olan üçgen ve altıgen modül geometrilerine göre metrekareye daha az kesit ihtiyacı doğmuştur. Bütün açıklıklar boyunca dörtgen modül geometrisi en ekonomik sonuçları vermiştir. 20 ve 30 metre açıklıklarda üçgen ve altıgen modül geometrileri görece olarak yakın sonuçlar verirken açıklık arttıkça m² düşen taşıyıcı sistem ağırlığında aralarındaki fark da artış görülmektedir. 40 metre ve 50 metre de üçgen modül geometrisi ekonomik sonuçlar vermemektedir. Üçgen modül geometrisine göre dörtgen ve altıgen modül geometrisi 40 ve 50 metre de daha yakın sonuçlar vermektedir. Grafikler incelendiğinde üçgen modül geometrisinde diğer modül geometrilerine göre metrekareye düşen taşıyıcı sistem ağırlığına etkisi daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Çalışmanın son bölümünde m² (metrekare) düşen taşıyıcı sistem ağırlıkları üzerinden tüm açıklıklarda her 3modül geometrisi içinde en uygun modül boyu olan modeller tespit edilmiştir. m²'ye düşen en az taşıyıcı sistem ağırlığı olan modeller kar yüklemesi, asimetrik kar yüklemesi ve rüzgâr yüklemesi altında yer değiştirmeleri incelenmiştir. Analizler sonucunda tüm açıklıklarda yer değiştirmeye en dirençli modül geometrisi altıgen olmuştur. Ayrıca asimetrik kar yüklemesi sonucunda dörtgen modül geometrisinde yer değiştirmelerin arttığı gözlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada dörtgen, üçgen, altıgen modül geometrilerinde tonoz tipi ızgara kabuk sistemler statik yüklemeye altında yapısal davranışları incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda ızgara kabuk sistemler dinamik yüklemeye altında tonoz tipinden farklı olarak amorf formda genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Özüer, Ç. (2020). *Modern Yapı Kabuklarının Geometrik Tasarımı ve Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [2] Türkçü, H. Ç. (2003). *Çağdaş Taşıyıcı Sistemler*. Birsen yayınları, İstanbul, 347.
- [3] Vardar Öz, Ö. M. (2012). *Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Barnes, M. & Dickson, M. (2000). *Widespan Roof Structures*. Thomas Telford, London, 328s.
- [5] Chilton, J. (2000). *Space Grid Structures*. Architectural Press, Oxford, 180s.
- [6] Seele, 2021. <https://seele.com/facades/steel-glass-design>, (8.11.2021)
- [7] EtnaYapı. (2018). <http://www.etnayapi.com>, (20.12.2021)
- [8] Naicu, D. (2012). *Geometry and Performance of Timber Gridshells*. Master's thesis, The University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering, Bath.
- [9] Akyürek, M. E. (2020). *Hiperbolik Paraboloidlerin Yapı Endüstrisindeki Yeri*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Koç, S. (2020). *Ahşap Izgara Kabuk Strüktürlerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Demirbaş, B. (2019). *Büyük Açıklı Yapıların Tarihsel Gelişim Süreci ve Ahşap Kabuk Sistemlerin Yapısal Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Kara, T. (2019). *Tek Tabakalı Kubbelerin Taşıyıcı Sistemlerinin Yönetmelikler Açısından Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] Orbay, A., & Savaşır, K. (2014). Tonoz Biçimli Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin Çeşitli Kriterler Açısından Etkinliğinin Karşılaştırılmasına Yönelik Bir Araştırma. *DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1), 39-49.
- [14] Schlaich Bergermann, (2021). <https://www.sbp.de/projekt>, (20.12.2021).
- [15] Tensaform, (2021). <http://www.tensaform.com/tr/projeler/tamamlanmis-projelerimiz/>, (14.12.2021).
- [16] Abedi, K., Fard., & M., Samavati, O. (2015). Stability Analysis of Lattice Single-Layer Barrel Vault Considering the Effects of Purlins. *IASS Amsterdam Symposium: Future Visions. 2015*, Amsterdam.
- [17] Kaveh, A., & Mirzaei, B. (2014). Shape Size Optimization of Single-layer Barrel Vaults Using Improved. *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 447-465.
- [18] Sheidaii, M. R., & Babaei, M., & Bayrami, S. (2013). Collapse Behavior of Single-Layer Space Barrel Vaults under Non-Uniform. *International Journal of Steel Structures*, 13(4), 723-730.

- [19] Khalili, R., & Poursha, M. (2018). Investigation of Single-Layer Barrel Vault Under the Horizontal Earthquake. *11th International Congress on Civil Engineering*, 8-10 Mayıs, Tahrán.
- [20] Khalili, R., & Poursha, M., & Abedi, K. (2020). Behavior factor and displacement amplification factor for the seismic. *Journal of Constructional Steel Research*, 169, 105987.
- [21] Makowski, Z. S. (2006). *Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults*. Taylor & Francis, Guildford UK, 477s.
- [22] Makowski, Z. S. (1972). *Space Structures*. International Association for Bridge and Structural Engineering. Zurich.
- [23] El-Sheikh, A. (2001). Performance of Single-layer Barrel Vaults with Different Configurations. *International Journal of Space Structures*, 16(2), 111-123.
- [24] El-Sheikh, A. (2002). Effect of Geometric Imperfections on Single-Layer Barrel Vaults. *International Journal of Space Structures*, 17(4), 271-283.
- [25] El-Sheikh, A. (2001). Configurations of Single-layer Barrel Vaults. *Advances in Structural Engineering*, 4(2), 53-64.
- [26] Seifi., & H., Javana A. R., & Xu, S., & Zhao, Y., & Xie, Y. M. (2018). Design Optimization and Additive Manufacturing Of Nodes İn Gridshell. *Engineering Structures*, 160, 161-170.
- [27] Cai, J., & Yixiang, X., & Wang, F., & Feng, J., & Zhang, J., (2011). A Computational Study of The Static and Dynamic Response Of A Hybrid Barrel Vault Structure. *Advance Steel Construction*, 8(4), 317-330.
- [28] Pathak, M., & K. Shah, B. J. (2010). Buckling Strength of Single-Layer Steel Braced. *Nirma University Journal Of Engineering And Technology*, 1(1).
- [29] Sun, G., & Wu, M., & Chen, Z., & Xue, S. (2019). Numerical and Experimental Investigation of the Mechanical Behavior of Cable-Supported Barrel Vault Structures with Varying Temperature. *Advances in Civil Engineering*, Vol 2019, 572196.
- [30] Talatahari, S., & Jahani, Y. (2015). Hybrid Charged System Search - Particle Swarm Optimization for Design Of Single-layer Barrel Vault Structure. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(4), 515-533.
- [31] EN 1991 1-4, (2005). *Euro code 1 Actions on structures - Part 1-4 General actions Wind actions*, European Committee for Standardization, Brussels.

Araştırma Makalesi - Research Article

Rüzgâr Hızlarında Uzun Hafıza: Amasra Bölgesi için Bir Zaman Serisi Analizi

Long Memory at Wind Speed: a Time Series Analysis for Amasra Region

Serpil Türkyılmaz^{1*}

Geliş / Received: 13/08/2022

Revize / Revised: 22/11/2022

Kabul / Accepted: 25/11/2022

ÖZ

Son yıllarda rüzgâr enerjisinin yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak yaygınlaşması ile birlikte rüzgâr hızının enerji üretimindeki ekonomik etkilerinin değerlendirilmesi de önem kazanmış ve enerji planlamalarında doğru rüzgâr hızı tahmini ve modellemesine olan ilgi artmıştır. Çalışmada klasik yaklaşımlardan farklı olarak rüzgâr hızlarındaki uzun hafıza özelliği incelenmiştir. Bu amaçla, Türkiye’ de Bartın ili Amasra bölgesi rüzgâr hızları için uzun hafıza etkisi ARFIMA-FIGARCH modelleri ile araştırılmış ve model performansları karşılaştırılmıştır. Çalışma bulgularına göre; Amasra bölgesi rüzgâr hızı serisi için ortalama ve koşullu varyansında uzun hafıza parametreleri istatistiksel anlamlı bulunmuş ve en uygun model ARFIMA(0,ξ,1)- FIGARCH(1, d, 1) modeli olarak tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Rüzgâr Hızı, Uzun Hafıza, ARFIMA Modeli, FIGARCH Modeli, FIEGARCH Modeli*

ABSTRACT

With the widespread use of wind energy as a renewable energy source in recent years, the evaluation of the economic effects of wind speed on energy production has gained importance and the interest in accurate wind speed estimation and modeling in energy planning has increased. In study, unlike the classical approaches, the long memory feature in wind speeds was investigated. For this purpose, the long memory effect for wind speeds in Bartın province Amasra region in Turkey was investigated with ARFIMA-FIGARCH models and model performances were compared. According to the study findings; Long memory parameters were found to be statistically significant in mean and conditional variance for the wind speed series of Amasra region, and the most appropriate model was estimated as ARFIMA(0,ξ,1)- FIGARCH(1, d, 1) model.

Keywords- *Wind Speed, Long Memory, ARFIMA Model, FIGARCH Model, FIEGARCH Model*

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: serpil.turkyilmaz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7193-4148>)
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Bilecik, Türkiye

I. GİRİŞ

Son yıllarda artan enerji talebi ile birlikte fosil enerji tüketiminin olumsuz etkileri, rüzgâr enerjisi gibi temiz yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimindeki en temel risk değişen hava koşullarıdır ve en yaygın enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi üretimini etkilemektedir. Depolama söz konusu olmadığı için önemli bir ekonomik problem olarak görülmektedir. Rüzgâr enerjisi için riske maruz kalma, rüzgârı karakterize eden iki unsur olan “genel rüzgâr hızı” veya “rüzgâr hızı yoğunluğu ve rüzgâr yönü” ile ilişkilendirilmektedir [1]. Özellikle riskli yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimi portföyündeki artan payı değerlendirildiğinde üretim risklerinin nicelleştirilmesi ve öngörülmesi büyük önem arz etmektedir. Rüzgâr çiftliklerinin yönetimi ve işletilmesi, rüzgâr enerjisi üretimindeki rolü gibi diğer pek çok faktör sebebiyle rüzgâr hızının hatasız tahmini gerekli olmaktadır. Bu sebeple rüzgâr hızlarının yüksek doğrulukta tahmin problemi son yıllarda ilgi odağı haline gelmiştir. Rüzgâr enerjisi tahminleri için meteorolojik ve istatistiksel/matematiksel modeller olarak iki temel yaklaşım söz konusudur. Meteorolojik modeller bir güç eğrisi aracılığıyla rüzgâr enerjisi tahminine dönüştürülen hava tahmini modellerini içermekte iken ikinci yaklaşım, rüzgâr enerjisi üretimi ile ilgili ve geçmiş dönem rüzgâr verilerini kullanarak değişkenler arasındaki ilişkileri açıklayan, ileriye dönük tahmini mümkün kılan zaman serileri, yapay sinir ağları, veri madenciliği gibi istatistiksel modellere dayanmaktadır [1,2]. Meteorolojik yaklaşımla kısa dönem rüzgâr hızı ve yoğunluğunun tahmini yapılabilmektedir.

Rüzgâr enerjisi ile ilgili risk analizi, uzun dönem tahminleri, diğer meteorolojik değişkenlerle ilişkilerinin değerlendirilmesi ve simülasyonları için istatistiksel model ve yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgâr hızı belirsizliğinin tahmini için koşullu değişen varyans modelleri GARCH türü modeller kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde rüzgâr enerjisi alanında farklı tahmin yöntemlerini kullanan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bazılarında izleyen kısımda değinilmektedir. Shen ve Ritter [1] çalışmalarında rüzgâr gücünün oynaklığını tahmin etmede bir Markov rejim süreçli GARCH (MRS-GARCH) modelini kullanmışlardır. MRS-GARCH modelinin, rüzgâr gücünün oynaklığını tahmin etmede geleneksel GARCH modellerinden daha iyi performans gösterdiğini ve üstel GARCH modelinin ise geleneksel GARCH modelleri arasında daha iyi olduğunu bulmuşlardır. Caporin ve Pres [2] çalışmalarında rüzgâr yoğunluklarının tahmini ve simülasyonu için üç alternatif yaklaşımın ARG, ARFIMA-GARCH ve ARFIMA-FIGARCH performanslarını karşılaştırmışlar ve ARFIMA tabanlı modellerin daha iyi sonuçlar verdiği bulgusuna ulaşmışlardır. Bouette vd. [3] çalışmalarında İrlanda günlük rüzgâr hızı verileri için ARFIMA modelinin serinin davranışını yeterli düzeyde yakalayamadığını ve mevsimsel uzun hafıza GARMA modelinin seri için uygun model olduğunu göstermiştir. Liu ve Wang [4]’ in çalışmalarında rüzgâr hızı tahmini için ARFIMA-EGARCH modeli kullanılmış ve bulguları söz konusu modellerin klasik yaklaşımlardan daha yüksek doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir. Özen vd. [5] çalışmalarında Türkiye'nin İstanbul, İzmir, Muğla, Tekirdağ ve Eskişehir illerinde yer alan beş havalimanının kendi tarihsel rüzgâr hızı verileri için tekrarlayan bir yapay sinir ağı ve uzun kısa-süreli hafıza (LSTM) kullanılmıştır. Çalışma için seçilen istasyonları düşük rüzgâr hızına sahip olduğundan rüzgâr hızlarındaki artış ve azalışlar model tarafından tam olarak yorumlanamamış ve sadece rüzgâr hızı verilerini değil diğer değişkenleri de kullanan farklı modellerin de tahmin edilmesinin uygun olduğu önerilmiştir. Malinda ve Hui [6]’ nin çalışmalarında enerji fiyatlarının oynaklık ve asimetric oynaklığındaki uzun hafızayı karşılaştırmak için ARFIMA, ARFIMA, ARFIMA-FIEGARCH ve ARFIMA-HYGARCH modelleri kullanılmış ve enerji fiyatlarının oynaklığı için asimetric uzun hafıza ARFIMA-FIEGARCH modeli en uygun model olarak önerilmiştir. Haddad vd. [7] çalışmalarında belirli bir yenilenebilir enerji sistemi için SARIMA tabanlı bir model önerilmiştir. Rüzgâr türbini ve güneş paneli modelleri sayesinde küresel enerji sisteminin toplam maliyetini optimize etmek için önerilen modelin gerçek verilerle uygunluğu doğrulanmıştır. Emami vd. [8] çalışmalarında İran'ın Erdebil ili ve Nayer şehrine ait rüzgâr yönü verileri için uzun hafızalı zaman serisi modellerini kullanmıştır. Bulguları, otoregresif kesirli entegre hareketli ortalama ARFIMA(3,0,0)-FIGARCH(1,0,1) modelinin kriterlere göre en uygun model olduğunu göstermiştir. Taylor vd. [9]’ nin çalışmalarında Birleşik Krallık' taki beş rüzgâr santralinde bir ila 10 gün öncesinden üretilen rüzgâr gücünün olasılık yoğunluk fonksiyonunu tahmin etme yöntemleri araştırılmıştır. Rüzgâr gücü yoğunluğunun nokta tahminlerinin zaman serisi modelleriyle elde edilenlere göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Dong [10]’ un çalışmalarında veri ön işleme, optimizasyon, tahmin ve değerlendirme gibi çeşitli bileşenleri içeren birleşik bir rüzgâr hızı tahmin stratejisi geliştirilmiştir. Stratejinin performansını değerlendirmek için, Çin'in Shandong eyaletindeki büyük rüzgâr çiftliklerinden toplanan 10 dakikalık rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarında, önerilen birleşik stratejimizin tahmin yeteneğinin, seçilen diğer karşılaştırılabilir modellere göre daha iyi olduğu gösterilmiştir. Bulgulara göre; rüzgâr enerjisi üretim planlaması için güvenilir destek sağlayabileceği önerilmiştir. Prabha vd. [11]’ nin çalışmalarında uzun kısa-süreli hafıza (LSTM) yaklaşımı ile dört farklı bölge için zaman serisi verilerinin rüzgârlı ve rüzgârsız aylar olarak kümelenecek rüzgâr hızının bir saat

önceden tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bulgulara göre LSTM yaklaşımının rüzgâr hızı tahmin hatalarını azaltılabileceği ile ilgili kanıtlar sunulmuştur. Balcı vd. [12]'nin çalışmalarında Balıkesir iline ait saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılarak tahmin için EEMD-MLP (topluluk ampirik mod ayrıştırması-çok katmanlı algılayıcılar) ve CEEMDAN-MLP (uyarlanabilir gürültü ile komple topluluk ampirik mod ayrıştırması-çok katmanlı algılayıcılar) hibrit tahmin yaklaşımları karşılaştırılmalı olarak önerilmiştir. Çalışmada model performans kriterlerine göre CEEMDAN-MLP hibrit modelinin rüzgâr hızı tahmini için daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Altınsoy & Bal [13]'ün çalışmalarında Ankara ili bazı ilçelerinin rüzgâr hızı tahmini için farklı öğrenme algoritmaları ile yapay sinir ağları kullanılmış ve ilçeler için hesaplanan ortalama mutlak yüzde hata Çubuk ilçesi için %9,48, Keçiören için %7,77, Polatlı için %7,88, Bala için %6,83, Şereflikoçhisar için %8,02 ve Haymana için %5,41 olarak elde edilmiştir. Kurban vd. [14]'nin çalışmalarında Weibull ve Rayleigh istatistiksel dağılım fonksiyonları ile bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelini analiz edebilmek amacıyla Anadolu Üniversitesi tarafından desteklenen araştırma projesi kapsamında Eskişehir ili iki eylül kampüsü bölgesinde kurulan rüzgâr gözlem istasyonundaki 2005 yılına ait 4 ay için (Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim) 15 sn. aralıklarla ölçülen rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Çalışma bulguları, Weibull dağılımının ilgili bölgedeki rüzgâr hızlarını analiz etmede Rayleigh dağılımına göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Çağlar [15]'ün çalışmasında iki parametrelili Weibull dağılımı ile Antalya-Elmalı Bölge Meteoroloji İstasyonu verileri kullanılarak Antalya ilinin rüzgâr hızı ve gücü için potansiyel analizi yapılmıştır. Çalışma bulgularına göre; hata analizi göstergelerinin ortalama güç yoğunluğu için moment metodunun uygun olduğunu desteklediği belirtilmiştir. Görgülü [16]'nın çalışmasında Rayleigh dağılımı ile İstanbul ili için Atatürk Havalimanı meteoroloji istasyonundan alınan iki yıllık veriler kullanılarak ortalama rüzgâr hızları yoğunluğu ve gücü belirlenmiş ve gerçek verilerle karşılaştırılmıştır. Bulguları, ilgili bölgenin bir rüzgâr enerjisi santrali kurulumu için uygun bir potansiyele sahip olmadığını göstermiştir. Yanıktepe ve Kara [17]'nin çalışmasında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi çatısında kurulu rüzgâr ölçüm cihazı ile ölçülen rüzgâr hızları kullanılarak ilgili bölgede rüzgâr enerjisi potansiyel analizi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan grafik yöntemi, maksimum olabilirlik yöntemi ve değiştirilmiş en yüksek olabilirlik yöntemi bulgularına göre, grafik yönteminin ölçüm yapılan yılın rüzgâr verileri için diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise Türkiye'de yüksek rüzgâr hızına sahip bölgeler arasında bulunması ayrıca kıyıya yakın bir bölgede yer alması sebebiyle seçilen Bartın ili Amasra bölgesinin rüzgâr hızları kullanılarak koşullu değişen varyans için asimetrik etkileri göz önünde bulunduran üstel GARCH (EGARCH) modeli tahmin edilmiştir. Ayrıca rüzgâr hızlarındaki uzun hafıza özelliğinin incelenmesi için ortalamadaki uzun hafıza süreci ARFIMA modelleri ve oynaklığındaki uzun hafıza özelliği de FIGARCH modelleri ile tahmin edilmiştir. Rüzgâr hızlarının oynaklığındaki asimetrik uzun hafıza sürecinin tahmini için FIEGARCH modelleri kullanılmış ve tahmin edilen istatistiksel anlamlı tüm modellerin tahmin performansları seçim kriterleri LogL, Akaike bilgi kriteri (AIC) ve Schwarz (SC) bilgi kriteri ile karşılaştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında rüzgâr enerjisi analizi ile ilgili olarak çalışmalarda derin öğrenme algoritmaları, yapay sinir ağları, olasılık dağılım fonksiyonları gibi yöntemlerin ağırlıklı kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada rüzgâr hızı tahmini için literatürde kullanılan klasik tahmin yöntemlerinden farklı olarak serinin ortalama ve koşullu varyansındaki uzun hafıza sürecini de göz önünde bulunduran zaman serisi modelleri tahmin edilerek alanında literatüre katkı sağlaması beklenmektedir. Söz konusu modellerle Türkiye'de rüzgâr enerji potansiyeli yüksek bir bölge olan Bartın ili Amasra ilçesi için rüzgâr hızlarının parçalı dinamiklerinin dikkate alınarak analiz edilmesi de çalışmaya farklı bir boyut kazandırmaktadır. Çalışmanın birinci bölümü olan Giriş kısmında genel bilgi ve literatür sunulmuştur. İkinci bölüm çalışmada kullanılan zaman serisi modellerini tanıtan Metodoloji kısmıdır. Üçüncü bölüm veri ve tanımlayıcı istatistiklerle birlikte tahmin edilen model sonuçlarını ve yorumlarını içermektedir. Bulguların özetlendiği dördüncü bölüm Sonuç bölümüdür. Beşinci bölümde yararlanılan kaynaklara yer verilmiştir.

II. METODOLOJİ

Zaman serilerinde meydana gelen beklenmedik ani düşüş ve yükseliş kümelenmeleri oynaklık (volatilité) olarak tanımlanmaktadır. Bu tür serilerde hata terimleri genellikle sabit varyans (homoscedasticity) varsayımını sağlamamaktadır ve koşullu değişen varyansa (heteroscedasticity) sahip olmaktadır. Birçok zaman serisi istikrar dönemleri, ardından yüksek oynaklık ile belirsizlik dönemleri sergilediğinden, doğrusallık ve sabit varyanslı hata varyansı varsayımları ile geçerli olan klasik zaman serisi modellerinden ARIMA türü modellerin yeterli olmayacağı görülmektedir. Bu amaçla değişen varyans için Engle [18] tarafından otoregresif koşullu değişen varyans (ARCH) modeli önerilmiştir. ARCH modeli geçmiş dönem hata terimlerinin karelerinin ağırlıklı ortalamasıdır ve model (1)'de verilmiştir.

$$\varepsilon_t / \Psi_{t-1} \sim N(0, h_t) \quad (1)$$

$$h_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 \quad (2)$$

Burada $\alpha_0 > 0$, $\alpha_i \geq 0$ ve $\sum_{i=1}^q \alpha_i < 1$ ' dir ve koşulsuz varyansın pozitif olma şartı için kısıtlamalardır [18].

Bollerslev [19] koşullu varyansın gecikmeli değerlerinin de ARCH modeline dahil edildiği ARCH modelinin geliştirilmiş formu GARCH modelini geliştirmiştir. Modelin genel yazılımı (2)'deki gibidir:

$$\varepsilon_t = \xi_t \sqrt{h_t} \quad (3)$$

$$h_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j h_{t-j} \quad (4)$$

Burada $\alpha_0 > 0$, $\alpha_i \geq 0$ ve $\sum_{i=1}^q \alpha_i + \sum_{j=1}^p \beta_j < 1$ ise süreç zayıf durağandır.

ARCH ve GARCH modelleri şokların koşullu değişen varyans üzerindeki etkilerinin simetrik olduğunu varsaymaktadır. Pozitif ve negatif şokların koşullu değişen varyans üzerindeki farklı etkilerinin varlığı GARCH modellerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. İlk olarak Nelson [20] tarafından şokların sadece büyüklüğünü değil, aynı zamanda negatif ve pozitifliğini de dikkate alan (5)' de genel formu verilen üstel GARCH (EGARCH) modeli önerilmiştir.

$$\ln(h_t) = \alpha_0 + \beta \ln(h_{t-1}) + \gamma_1 \left| \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sqrt{h_{t-1}}} \right| + \gamma_2 \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sqrt{h_{t-1}}} \quad (5)$$

Model (5)' deki $\frac{\varepsilon_{t-1}}{\sqrt{h_{t-1}}}$ değeri pozitif ise şokun koşullu varyans üzerindeki etkisi $(\gamma_1 + \gamma_2)$ toplamına eşittir,

negatif ise şokun koşullu varyans üzerindeki etkisi $(-\gamma_1 + \gamma_2)$ ile ölçülmektedir. Modeldeki γ_2 parametresi istatistiksel olarak anlamlı ise kaldıraç etkisinin varlığından söz edilmektedir. Serilerin kesirli bütünleşik derecelerde durağanlık özelliği de göstermesi mümkün olduğundan ARIMA modelleri, otoregresif kesirli bütünleşik hareketli ortalama modeli ARFIMA ortalamadaki uzun hafıza modeli olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. ARFIMA modelini Granger & Joyeux [21] ve Hosking [22] uzun hafıza özelliğinin test edilmesi için önermişlerdir. ARFIMA (p, ξ , q) modelinin genel ifadesi denklem (6)' da verilmiştir.

$$\psi(L)(1-L)^\xi (y_t - \mu) = \phi(L)\varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim i.i.d.(0, h_t) \quad (6)$$

Burada ψ ve ϕ modelde AR ve MA süreçlerinin gecikme derecesini, L gecikme operatörünü ve d kesirli bütünleşme derecesi parametresini ifade etmektedir. $\xi=0$ ise ARFIMA modeli ARMA modeline, $\xi=1$ ise ARIMA modeline dönüşmektedir. Kesirli bütünleşme parametresi derecesi $\xi < 0.5$ ise seri durağandır ve çevrilebilirdir. $\xi > 0.5$ ise seri durağanlık özelliğine sahip değildir ve seri üzerinde herhangi bir şokun etkisi uzun dönemde kaybolacağı için ortalamaya dönme eğilimi gösterecektir. Fakat $\xi > 1$ durumunda seri durağanlık özelliğini kaybedecek ve herhangi bir şokun seri üzerindeki etkisi uzun dönemde de devam edeceği için ortalamaya dönme eğiliminden bahsedilemeyecektir [21, 22, 25]. Şokların oynaklık üzerindeki etkileri de sınırlı değildir ve oynaklıkta kesirli bütünleşme sürecine yol açmaktadır. Bu amaçla ARFIMA model notasyonundaki karesel hataların genişletilmiş versiyonu olarak serilerin ortalamasına benzer biçimde koşullu varyanslarındaki uzun hafıza özelliği için de Baillie vd. [23] tarafından FIGARCH modeli geliştirilmiştir. FIGARCH (p, d, q) modeli (7)' deki gibi ifade edilmektedir.

$$\phi(L)(1-L)^d (\varepsilon_t^2) = \omega + [1 - \beta(L)]v_t, \quad (7)$$

Burada $v_t = \varepsilon_t^2 - h_t$ 'dir ve ilişkisiz sıfır ortalamalı hata terimini ifade etmektedir. FIGARCH modelinde eğer $d=0$ ise model GARCH (p,q) modeline indirgenmektedir. $d=1$ için süreç bütünleşik GARCH (IGARCH) süreci olur. $0 < d < 1$ olduğunda FIGARCH (p,d,q) süreçlerinin koşullu varyansı üzerine bir şokun etkisi hiperbolik oranda yavaş biçimde azalmaktadır [23]. Şokların oynaklık üzerindeki etkilerinin asimetrik olabileceği görüşü ile Bollerslev & Mikkelsen [24], Üstel GARCH (EGARCH) modelini asimetrik uzun hafıza özelliğini de göz önünde bulunduran kesirli bütünleşik EGARCH (FIEGARCH) modelini önermişlerdir. FIEGARCH (p,d,q) modeli (8)' deki gibidir:

$$\phi(L)(1-L)^d \ln(h_t) = \beta_0 + \sum_{i=1}^q (\beta_i |y_{t-i}| + \gamma_i y_{t-i}) \quad (8)$$

$$\ln(h_t) = w + \phi(L)^{-1}(1-L)^{-d} [1 + \alpha(L)]g(z_{t-1}) \quad (9)$$

$$g(z_t) = \theta(z_t) + \gamma [z_t | - E|z_t|] \quad (10)$$

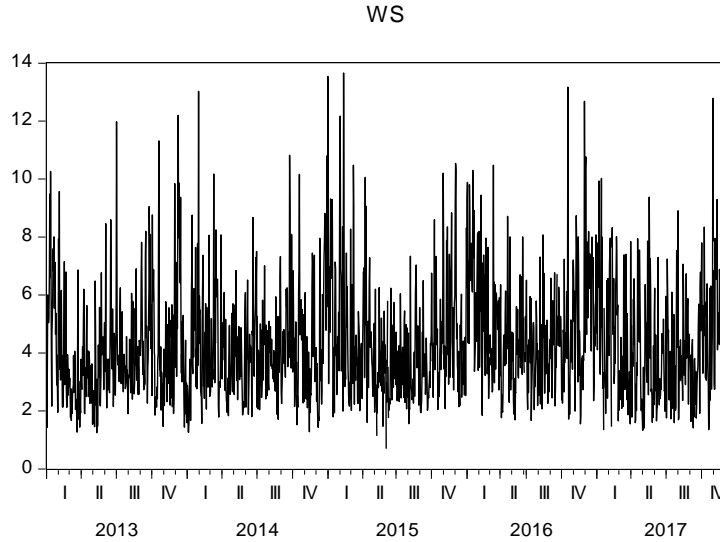
Model $d=0$ olduğunda EGARCH modeline $d=1$ olduğunda IEGARCH modeline dönüşmektedir [24].

III. AMASRA BÖLGESİ RÜZGÂR HIZLARI İÇİN AMPİRİK BULGULAR

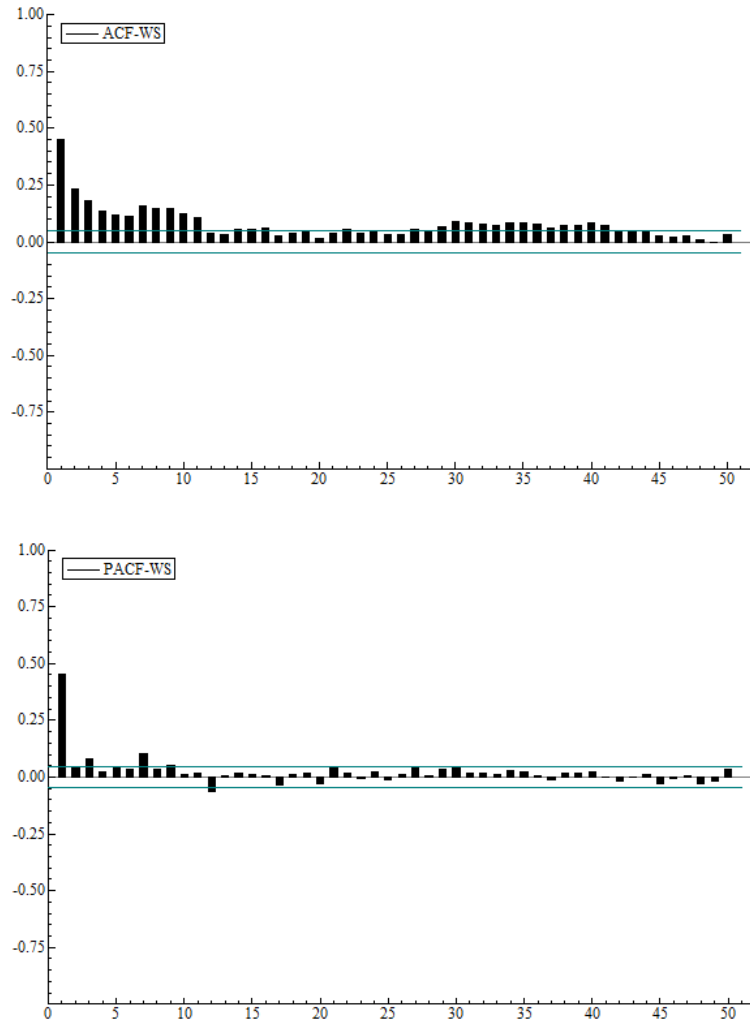
Çalışmada Türkiye' de Bartın ili Amasra ilçesi rüzgâr hızları için uzun hafızanın varlığı araştırılmaktadır. Bu bölümde değişkene ilişkin tanımlayıcı istatistiklere, birim kök testlerine, koşullu değişen varyans modelleri ve uzun hafıza özelliği için ikili uzun hafıza modelleri tahmin sonuçlarına yer verilmiştir. Bulgular, Eviews ve OxMetrics programları yardımıyla elde edilmiştir.

A. Veri ve Tanımlayıcı İstatistikler

Çalışmada kullanılan veri, 2013-2017 dönemine ait Amasra bölgesi için günlük rüzgâr hızı (m/s) verilerinden oluşmakta ve değişken WS ile gösterilmektedir. Veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü' nden elde edilmiştir. Şekil 1' de WS rüzgâr hızı serisinin grafiği ve Şekil 2' de ACF (Otokorelasyon Fonksiyonu) ile PACF (Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu) grafikleri verilmektedir.



Şekil 1. Amasra Bölgesi Rüzgâr Hızları (m/s) (WS) Serisinin Grafiği



Şekil 2. Amasra Bölgesi Rüzgâr Hızları (m/s) (WS) Serisi ACF, PACF Grafikleri

Şekil 1 ve Şekil 2 incelendiğinde serideki oynaklık (volatilite) kümelemelerinin de varlığına işaret eden ortalama etrafındaki iniş çıkışlı eğilimi ve ACF fonksiyonu grafiğinde periyodiklik ile birlikte yavaş bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu özellikler rüzgâr hızı (WS) serisindeki oynaklığın ve uzun hafızanın varlığının incelenmesini gerekli kılmaktadır. Tablo 1’ de WS değişkenine ilişkin tanımlayıcı istatistikler verilmektedir.

Tablo 1. WS Değişkeni için Tanımlayıcı İstatistikler

Gözlem Sayısı	1760
Ortalama	4,3614
Standart Sapma	1,9428
Çarpıklık	1,1566
Basıklık	1,8029
Minimum	0,7
Maksimum	13,663
J-B: p-Değeri	630,74 [0,0000]
ARCH(2)	169,73 [0.0000]**
ARCH(5)	71,400 [0.0000]**
ARCH(10)	39,246 [0.0000]**
Q(5)	572,326[0.0000]**
Q(10)	742,514[0.0000]**
Q(20)	790,799[0.0000]**
Q(50)	971,454[0.0000]**
Q ² (5)	434,463[0.0000]**
Q ² (10)	590,205[0.0000]**
Q ² (20)	636,353[0.0000]**
Q ² (50)	810,233[0.0000]**
Uzun Hafıza (Long Memory) Test İstatistikleri	
Kritik Değerler	
%90: [0.861, 1.747]	
%95: [0.809, 1.862]	
%99: [0.721, 2.098]	
H0: Hurst-Mandelbrot = Otokorelasyon yoktur ve Lo = Uzun Dönem Bağımlılık Yoktur	
WS Serisi hataları için Lo R/S Test İstatistiği	2.56599**
WS Serisi - kareli hataları için Hurst-Mandelbrot R/S Test İstatistiği	3.09217**
WS Serisi - hataları için Lo R/S Test İstatistiği	2.33153**
WS Serisi - kareli hataları için Hurst-Mandelbrot R/S Test İstatistiği	3.09217**

Tablo 1’ de rüzgâr hızı (WS) değişkeni için tanımlayıcı istatistik sonuçlarına göre, çarpıklık ve basıklık istatistikleri serinin normal dağılıma göre asimetric, sağa çarpık ve aşırı basık olduğunu göstermektedir. J-B (Jarque-Bera) istatistiği de serinin normal dağılmadığının göstergesi olarak istatistiksel anlamlıdır. Serinin hata ve kareli hatalarının bağımsızlık testi için farklı gecikme değerlerinde (5-10-20-50) Ljung-Box İstatistikleri (Q ve Q²) elde edilmiştir. İstatistiklere göre; hatalarda ve kareli hatalarda 50. gecikmeye kadar yüksek derecelerde ilişkili olduklarını ve i.i.d. (bağımsız ve aynı dağılıma sahip olma özelliği) süreci göstermediğini söylemek mümkündür. Rüzgâr hızı (WS) serisinin uzun hafıza özelliği ile ilgili başlangıç değerlendirilmesinde uzun dönem bağımlılık özelliğinin ve otokorelasyonun testi Lo R/S Test İstatistiği ve Hurst-Mandelbrot R/S Test İstatistikleri de hatalarda ve kareli hatalardaki uzun hafıza özelliğinin kanıtını sunmaktadır.

Çalışmada rüzgâr hızı (WS) için uzun hafıza özelliğinin analizi ile ilgili olarak öncelikle serinin durağan olup olmadığının belirlenmesi için birim kök testleri uygulanmakta ve sabitli ADF (Augmented Dickey Fuller), PP (Phillips-Perron) ve KPSS (Kwiatkowski, Phillips, Schmidt ve Shin) birim kök test sonuçları Tablo 2’ de verilmektedir.

Tablo 2. Rüzgâr Hızı (WS) Serisinin Birim Kök Test Sonuçları

Test	WS
ADF	-25.70987 [0,0000]**
PP	-29.14217 [0,0000]**
KPSS	0.358969

** ,%5 anlam düzeyinde ADF ve PP testleri için “H₀:Birim Kök” sıfır hipotezinin reddini, KPSS testi için “H₀:Birim Kök yoktur” sıfır hipotezinin reddini ifade etmektedir. % 5 anlam düzeyi için Mc Kinnon Kritik Değeri (-2,86), Kwiatkowski Kritik Değeri (0,463)’ dir. Durağanlık testi için WS serisinin grafiği değerlendirilerek kesim noktasının modele dahil edildiği sabitli model seçilmiştir.

Tablo 2' de birim kök testleri sonuçları incelendiğinde; ADF, PP ve KPSS testleri WS serisinin düzeyde durağan olduğunu göstermektedir. Buna göre durağan rüzgâr hızı-WS serisinin ortalaması ve oynaklığı için uzun hafıza model sonuçlarına yer verilmektedir.

B. Rüzgâr Hızı İçin Model Tahmin Sonuçları

1) ARFIMA (p, ξ , q) Model Tahmin Sonuçları: Amasra bölgesi rüzgâr hızı serisinin ortalamasındaki uzun hafıza özelliğini analiz etmek amacıyla Normal, Student-t, Skewed Student-t ve GED dağılımlı, farklı (p, q) gecikmeli ARFIMA modelleri tahmin edilmektedir. WS serisinin p, q=0,1,2 gecikme değerli ARFIMA (p, ξ ,q) model kombinasyonları Akaike (AIC), Schwarz (SIC) Bilgi Kriterleri ve Log(L) ile karşılaştırılarak seri için en uygun model seçilmektedir. Buna göre tahmin edilen en uygun ARFIMA (p, ξ , q) modeli sonuçları Tablo 3' de sunulmaktadır.

Tablo 3. Rüzgâr Hızı (WS) için ARFIMA(1, ξ , 0) Modeli Tahmin Sonuçları

(p, ξ , q)	ARFIMA (1, ξ , 0)			
	N	ST	GED	SST
μ	4.365401* (0.19904) [0.0000]	3.648380* (0.21055) [0.0000]	3.572287* (0.22303) [0.0000]	4.356374* (0.099893) [0.0000]
ψ_1	0.221505* (0.046248) [0.0000]	0.226903* (0.044389) [0.0000]	0.225123* (0.049126) [0.0000]	0.208440* (0.042482) [0.0000]
ψ_2	-	-	-	-
ξ	0.191200* (0.036632) [0.0000]	0.181822* (0.035105) [0.0000]	0.195238* (0.041576) [0.0000]	0.090794* (0.028727) [0.0016]
θ_1	-	-	-	-
θ_2	-	-	-	-
v	-	5.551800* (0.73135) [0.0000]	1.336494* (0.070733) [0.0000]	9.136494 (1.7793) [0.0000]
ln(ζ)	-	-	-	0.547218* (0.053561) [0.0000]
Log(L)	-3450.49	-3394.27	-3408.06	-3312.76
AIC	3.892890	3.862809	3.878480	3.771318
SIC	3.903457	3.878358	3.894029	3.789976
Çarpıklık	1.0235	1.0301	1.0134	1.1420
Aşırı Basıklık	2.2169	2.2217	2.2091	2.2529
J-B	667.67	673.21	659.12	754.79
Q(5)	3.74455 [0.4416797]	3.43741 [0.4874595]	4.06191 [0.3976923]	41.3584* [0.0000000]
Q(10)	16.6102*** [0.0551819]	16.6576*** [0.0543557]	16.4473*** [0.0581075]	72.5421* [0.0000000]
Q(20)	33.6270** [0.0203283]	33.5573** [0.0207135]	33.8683** [0.0190460]	86.0201* [0.0000000]
Q(50)	50.9407 [0.3971634]	50.6522 [0.4081621]	50.3217 [0.4208994]	119.455* [0.0000001]
Q ² (5)	23.9977* [0.0002173]	23.2445* [0.0003031]	23.7115* [0.0002466]	20.9199* [0.0008388]
Q ² (10)	30.3412* [0.0007532]	31.4432* [0.0004955]	31.3015* [0.0005231]	33.5737* [0.0002180]
Q ² (20)	33.6108** [0.0288811]	34.8970** [0.0206600]	34.7316** [0.0215813]	37.6034* [0.0098969]
Q ² (50)	95.4763* [0.0001136]	93.8154* [0.0001737]	93.0764* [0.0002094]	103.790* [0.0000123]
ARCH(1)	8.2303* [0.0003]	7.9534* [0.0004]	8.1881* [0.0003]	6.7023* [0.0013]
ARCH(5)	4.2152* [0.0008]	4.0596* [0.0011]	4.1395* [0.0010]	3.6778* [0.0026]
ARCH(10)	2.6003* [0.0039]	2.6808* [0.0029]	2.6748* [0.0030]	2.8264* [0.0017]

*, **, *** sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlılığı, (.) standart hatayı ve [.] p-olasılık değerini ifade etmektedir.

Tablo 4. Rüzgâr Hızı (WS) için ARFIMA(0, ξ , 1) Modeli Tahmin Sonuçları

(p, ξ , q)	ARFIMA (0, ξ , 1)			
	N	ST	GED	SST
μ	4.363654* (0.21600) [0.0000]	3.578238* (0.21542) [0.0000]	3.509948* (0.18695) [0.0000]	4.358426* (0.11089) [0.0000]
ψ_1	-	-	-	-
ψ_2	-	-	-	-
ξ	0.213935* (0.029941) [0.0000]	0.207323* (0.028259) [0.0000]	0.219440* (0.029797) [0.0000]	0.114436* (0.022541) [0.0000]
θ_1	0.208830* (0.039039) [0.0000]	0.208407* (0.035353) [0.0000]	0.209238* (0.039379) [0.0000]	0.191603* (0.033445) [0.0000]
θ_2	-	-	-	-
v	-	5.574517* (0.73160) [0.0000]	1.338410* (0.068219) [0.0000]	9.212631 (1.7903) [0.0000]
ln(ζ)	-	-	-	0.551347* (0.055405) [0.0000]
Log(L)	-3448.88	-3393.06	-3406.693	-3311.8
AIC	3.923725	3.861432	3.876924	3.770222
SIC	3.936164	3.876980	3.892472	3.788880
Çarpıklık	1.0223	1.0291	1.0122	1.1390
Aşırı Basıklık	2.1927	2.1987	2.1848	2.2401
J-B	659.16	665.18	650.60	748.57
Q(5)	1.37822 [0.8479721]	1.31824 [0.8582725]	1.60501 [0.8078910]	41.0654* [0.0000000]
Q(10)	13.9692 [0.1234259]	14.2284 [0.1144306]	13.9160 [0.1253465]	68.4517* [0.0000000]
Q(20)	31.2143** [0.0382386]	31.5443** [0.0351504]	31.7218** [0.0335839]	81.3446* [0.0000000]
Q(50)	47.8727 [0.5188311]	47.9906 [0.5140201]	47.6193 [0.5291930]	111.634* [0.0000009]
Q ² (5)	23.5764* [0.0002618]	22.9139* [0.0003506]	23.4213* [0.0002804]	20.8417* [0.0008678]
Q ² (10)	30.2266* [0.0007865]	31.3779* [0.0005081]	31.2774* [0.0005279]	33.5943* [0.0002163]
Q ² (20)	33.3129** [0.0311664]	34.6151* [0.0222525]	34.4884** [0.0230044]	37.5293* [0.0101036]
Q ² (50)	95.1678* [0.0001230]	93.0948* [0.0002084]	92.4555* [0.0002448]	103.751* [0.0000124]
ARCH(1)	7.8077* [0.0004]	7.7198* [0.0005]	7.9410* [0.0004]	6.6572* [0.0013]
ARCH(5)	4.1389* [0.0010]	4.0132* [0.0013]	4.0982* [0.0011]	3.6716* [0.0026]
ARCH(10)	2.5763* [0.0043]	2.6737* [0.0030]	2.6693* [0.0031]	2.8243* [0.0018]

*, **, *** sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlılığı, (.) standart hatayı ve [.] p-olasılık değerini ifade etmektedir.

Tablo 3 ve Tablo 4' deki sonuçlar rüzgâr hızı (WS) için ortalamadaki uzun hafıza özelliğini destekler niteliktedir. Tahmin edilen modeller arasından parametreleri istatistiksel anlamlı bulunan ARFIMA (1, ξ , 0) modeli normal, student-t, GED ve skewed student-t dağılımları için tahmin edilen ortalamadaki kesirli bütünleşme derecesi ξ parametresi %1 istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş ve 0,090794 ile 0,195238 arasında değişmektedir. Benzer biçimde parametreleri anlamlı bulunan ARFIMA (0, ξ , 1) modelinde tahmin edilen ortalamadaki kesirli bütünleşme derecesi ξ ise 0,114436 ile 0,219440 arasında değişmektedir ve %1 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlıdır. Rüzgâr hızı (WS) için istatistiksel anlamlı bulunan her iki modelin tanımsal istatistikleri incelendiğinde serinin pozitif asimetri ve aşırı basıklık özelliğine sahip olduğu görülmekte ve J-B (Jarque-Bera) istatistiği de standartlaştırılmış hataların normal dağılımdan farklı bir dağılıma sahip olduğunu desteklemektedir. Ljung-Box istatistikleri WS serisi için özellikle kareli hatalarda i.i.d. özelliği (bağımsız aynı dağılıma sahip olma) sıfır hipotezini desteklememektedir. Ayrıca ARCH-LM testi sonuçları da hatalardaki ARCH etkilerinin %1 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Bulgulara göre rüzgâr hızı (WS) serisinin yalnızca ortalamasının uzun hafıza özelliğinin varlığının incelenmesi için ARFIMA model tahminlerinin yeterli olmadığını

söylemek mümkündür. Bu amaçla rüzgâr hızı (WS) ortalamasındaki uzun hafıza ile birlikte oynaklıktaki (volatilité) uzun hafıza özelliği de incelenmektedir. Rüzgâr hızı için tahmin edilen çeşitli gecikme değerlerindeki GARCH türü model parametreleri istatistiksel anlamlı bulunmadığı için model sonuçlarına yer verilmemiştir. Tablo 5-7' de WS için oynaklık modelleri ve oynaklıktaki uzun hafıza için FIGARCH Modeli sonuçları gösterilmektedir.

2) *EGARCH (p, q) Model Tahmin Sonuçları:* Bu bölümde rüzgâr hızı (WS) serisinin oynaklığının modellenmesinde Normal, Student-t, GED ve Skewed Student-t dağılımlı, farklı (p, q) gecikmeli EGARCH modelleri tahmin edilmektedir. WS serisinin p, q=0,1,2 gecikme değerli EGARCH (p, q) model kombinasyonları Akaike (AIC), Schwarz (SIC) Bilgi Kriterleri ve Log(L) ile karşılaştırılarak seri için en uygun istatistiksel anlamlı model seçilmektedir. Buna göre tahmin edilen en uygun EGARCH (p, q) modeli sonuçları Tablo 5' de gösterilmektedir.

Tablo 5. Rüzgâr Hızı (WS) Serisi için EGARCH (1,1) Modeli Tahmin Sonuçları

(p, q)	EGARCH (1,1)			
	N	ST	GED	SST
ω	4.036277* (0.053962) [0.0000]	3.938652* (0.057150) [0.0000]	3.927912* (0.059339) [0.0000]	4.303019* (0.060156) [0.0000]
β_0	-0.847121* (0.10242) [0.0000]	-0.845856* (0.10417) [0.0000]	-0.847596* (0.10167) [0.0000]	0.153580 (0.27993) [0.5833]
β_1	0.947921* (0.049207) [0.0000]	0.956253* (0.043503) [0.0000]	0.953123* (0.045118) [0.0000]	0.175106 0.43870 [0.6898]
(Egarch) γ_1	0.309191* (0.052677) [0.0000]	0.252911* (0.051813) [0.0000]	0.290819* (0.052094) [0.0000]	0.000385 (0.036633) [0.9916]
(Egarch) γ_2	0.235552** (0.053931) [0.0000]	0.323881* (0.049607) [0.0000]	0.279383* 0.051687 [0.0000]	0.239423* (0.048839) [0.0000]
ν	-	7.834723 (1.3725) [0.0000]	1.506243* (0.08624) [0.0000]	16.00669* (5.5186) [0.0038]
$\ln(\zeta)$	-	-	-	0.761756* (0.057043) [0.0000]
Log(L)	-3578.42	-3548.32	-3559.48	-3445.56
AIC	4.073203	4.040141	4.052814	3.924501
SIC	4.091861	4.061909	4.074582	3.949379
Çarpıklık	1.15656	0.85629	1.15656	1.15656
Aşırı Basıklık	4.80292	1.3596	4.80292	4.80292
J-B	295.97	350.63	315.07	611.76
Q(5)	394.585* [0.0000]	349.823* [0.0000]	358.487* [0.0000]	470.659* [0.0000]
Q(10)	500.196* [0.0000]	444.338* [0.0000]	454.060* [0.0000]	616.490* [0.0000]
Q(20)	531.691* [0.0000]	471.617* [0.0000]	481.587* [0.0000]	659.779* [0.0000]
Q(50)	653.631* [0.0000]	578.316* [0.0000]	590.705* [0.0000]	812.704* [0.0000]
Q ² (5)	6.84165 [0.0771]	7.24544*** [0.0644]	7.06708*** [0.0697]	15.3582 [0.0015]
Q ² (10)	11.7787 [0.1613]	11.6795 [0.1660]	11.7826 [0.1611]	36.7684 [0.0000]
Q ² (20)	16.9698 [0.5251]	17.6791 [0.4769]	17.5661 [0.4845]	44.0481* [0.0005]
Q ² (50)	53.4909 [0.2716]	52.4047 [0.3070]	51.4877 [0.3389]	111.390* [0.0000]
ARCH(1)	1.3040 [0.2717]	1.6109 [0.2000]	1.5375 [0.2152]	3.9193** [0.0200]
ARCH(5)	1.3272 [0.2497]	1.3784 [0.2294]	1.3495 [0.2407]	2.8358** [0.0148]
ARCH(10)	1.2028 [0.2841]	1.1820 [0.2982]	1.1878 [0.2942]	3.0676* [0.0007]

*, **,*** sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlılığı, (.) standart hatayı ve [.] p-olasılık değerini ifade etmektedir.

Tablo 5' de Normal, Student-t, GED dağılımlı EGARCH(1,1) modeli parametreleri %1 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlı bulunmuştur ve seride kısa dönem asimetrik etkiler değerlendirilmiştir. Amasra bölgesi rüzgâr hızları için EGARCH(1,1) modeli bulgularına göre (Egarch) γ_1 ve (Egarch) γ_2 parametreleri %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlıdır. (Egarch) γ_2 parametresi modelin simetrik etkisini ve büyüklüğünü ifade etmektedir. (Egarch) $\gamma_2 > 0$ olduğundan asimetrik etkiler anlamlıdır, kaldıraç etkisi söz konusudur ve negatif şoklar serinin oynaklığını arttırmaktadır. Bir başka ifade ile negatif şokların etkileri (kötü haber) pozitif şoklara (iyi haber) göre serinin oynaklığı üzerinde daha fazladır. İstatistiksel anlamlı bulunan β_1 parametresi ise rüzgâr hızlarında meydana gelen anormal durumların etkilerini göstermektedir. β_0 parametresi kısa dönem etkileri ifade ederken, β_1 parametresi ne kadar büyükse buna bağlı olarak rüzgâr hızlarını etkileyecek anormal durumların etkisinin de uzun süre kalıcı olacağını söylemek mümkündür.

3) *FIGARCH (p, d, q) Model Tahmin Sonuçları*: Bu bölümde rüzgâr hızı (WS) serisinin oynaklığındaki uzun hafıza sürecinin modellenmesinde Normal, Student-t, GED ve Skewed Student-t dağılımlı, farklı (p, q) gecikmeli FIGARCH modelleri tahmin edilmektedir. WS serisinin p, q=0,1,2 gecikme değerli FIGARCH (p,d,q) model kombinasyonları Akaike (AIC), Schwarz (SIC) Bilgi Kriterleri ve Log(L) ile karşılaştırılarak seri için en uygun istatistiksel anlamlı model seçilmiştir. Buna göre tahmin edilen en uygun FIGARCH (p,d,q) modeli sonuçlarına Tablo 6' da yer verilmektedir.

Tablo 6. Rüzgâr Hızı (WS) Serisi İçin FIGARCH (1, d, 1) Modeli Tahmin Sonuçları

(p, d, q)	FIGARCH (1, d, 1)			
	N	ST	GED	SST
ω	4.124229* (0.066891) [0.0000]	3.973430* (0.059911) [0.0000]	3.961525* (0.063342) [0.0000]	4.286755* (0.053241) [0.0000]
β_0	-0.729893* (0.20496) [0.0004]	0.713726* (0.091908) [0.0000]	0.722095* (0.10131) [0.0000]	0.818578* (0.058289) [0.0000]
β_1	-0.773626* (0.18269) [0.0000]	0.854857* (0.051836) [0.0000]	0.848899* (0.054595) [0.0000]	0.872105* (0.038609) [0.0000]
d	0.157026* (0.038433) [0.0000]	0.388904* (0.091204) [0.0000]	0.354498* (0.10199) [0.0005]	0.151712* (0.044268) [0.0006]
ν	-	6.639128* (0.98415) [0.0000]	1.408229* (0.085019) [0.0000]	17.544251* (6.1894) [0.0046]
$\ln(\zeta)$	-	-	-	0.746506* (0.053254) [0.0000]
Log(L)	-3608.77	-3559.462	-3577.608	-3443.51
AIC	4.106556	4.051661	4.072282	3.921037
SIC	4.122105	4.070319	4.090940	3.942805
Çarpıklık	1.15656	1.0945	1.15656	1.15656
Aşırı Basıklık	4.80292	2.5504	4.80292	4.80292
J-B	642.53	828.41	782.20	593.84
Q(5)	373.213* [0.0000]	314.017* [0.0000]	323.809* [0.0000]	467.943* [0.0000]
Q(10)	478.493* [0.0000]	398.931* [0.0000]	410.794* [0.0000]	605.920* [0.0000]
Q(20)	509.004* [0.0000]	422.730* [0.0000]	435.125* [0.0000]	647.538* [0.0000]
Q(50)	626.057* [0.0000]	522.205* [0.0000]	535.897* [0.0000]	792.694* [0.0000]
Q ² (5)	1.64693 [0.6487]	2.08750 [0.5544]	1.81937 [0.6107]	8.08366 ** [0.0443]
Q ² (10)	6.99571 [0.5370]	5.87396 [0.6613]	6.10086 [0.6359]	23.1813* [0.0031]
Q ² (20)	11.7197 [0.8613]	10.9856 [0.8949]	11.1413 [0.8882]	29.8562** [0.0388]
Q ² (50)	56.0449 [0.1986]	50.2978 [0.3825]	49.2882 [0.4214]	77.7185 * [0.0042]
ARCH(1)	0.040981 [0.9598]	0.38119 [0.6831]	0.26586 [0.7666]	2.7434*** [0.0646]
ARCH(5)	0.32353 [0.8990]	0.42120 [0.8342]	0.37191 [0.8681]	1.5452 [0.1726]
ARCH(10)	0.66791 [0.7551]	0.58633 [0.8263]	0.60661 [0.8094]	2.0388** [0.0264]

*, **, *** sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlılığı, (.) standart hatayı ve [.] p-olasılık değerini ifade etmektedir.

Tablo 6' da FIGARCH (1,d,1) modeli tahmin sonuçları incelendiğinde kesirli bütünleşme uzun hafıza d parametresi sıfırdan farklı ve %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlı bulunmuştur. Ljung-box (Q) istatistikleri serinin i.i.d. özelliğini desteklemektedir. Rüzgâr hızı serisi için dağılımların tahmin sonuçlarının anlamlı olduğunu söylemek mümkündür. Student-t dağılımı modellerde tahmin hatalarının kalın kuyruk karakteristiklerini yakalamaktadır. ν parametresi % 5 anlam düzeyinde istatistiksel anlamlıdır. Buna göre rüzgâr hızları kalın kuyruklu bir olasılık yoğunluğu göstermektedir. Skewed student-t dağılımı için $\ln(\zeta)$ parametresi de %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlıdır ve elde edilen hataların dağılımının asimetrik olduğunu ifade etmektedir. $\ln(\zeta)$ parametresi pozitif olduğundan dağılım sağa çarpıktır. Söz konusu dağılımların normal dağılıma göre seri için daha uygun dağılımlar olduğunu söylemek mümkündür.

4) FIEGARCH (p, d, q) Model Tahmin Sonuçları: Bu bölümde rüzgâr hızı (WS) serisinin oynaklığındaki asimetric uzun hafıza sürecinin değerlendirilmesi için Normal, Student-t, GED ve Skewed Student-t dağılımlı, farklı (p, q) gecikmeli FIEGARCH modelleri tahmin edilmektedir. WS serisinin p, q=0,1,2 gecikme değeri FIEGARCH (p,d,q) model kombinasyonları Akaike (AIC), Schwarz (SIC) bilgi kriterleri ve Log(L) ile karşılaştırılarak seri için en uygun istatistiksel anlamlı model seçilmiştir. Tablo 7' de en uygun FIEGARCH (p,d,q) modeli sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 7. Rüzgâr Hızı (WS) Serisi için FIEGARCH (1, d, 1) Modeli Tahmin Sonuçları

(p, d, q)	FIEGARCH (1, d, 1)			
	N	ST	GED	SST
ω	4.038695* (0.054044) [0.0000]	3.939302* (0.057691) [0.0000]	3.931483* (0.059816) [0.0000]	4.299115* (0.061332) [0.0000]
β_0	0.523786* (0.12898) [0.0001]	0.575671* (0.11444) [0.0000]	0.558825* (0.11719) [0.0000]	0.101522 (0.23634) [0.6676]
β_1	-0.713141* (0.098704) [0.0000]	-0.718594* (0.10368) [0.0000]	-0.724646* (0.091382) [0.0000]	0.157829 (0.34342) [0.6459]
(Egarch) γ_1	0.323964* (0.048821) [0.0000]	0.265899* (0.048993) [0.0000]	0.306078* (0.049021) [0.0000]	0.005852 (0.038241) [0.8784]
(Egarch) γ_2	0.224339* (0.062860) [0.0004]	0.317555* (0.055588) [0.0000]	0.269070* (0.059174) [0.0000]	0.237156* (0.047561) [0.0000]
d	0.229490* (0.049726) [0.0000]	0.253882* (0.051273) [0.0000]	0.238347* (0.048016) [0.0000]	0.037025 (0.031321) [0.2373]
ν	-	7.889379* (1.4140) [0.0000]	1.516764* (0.087661) [0.0000]	15.973644* (5.4740) [0.0036]
$\ln(\zeta)$	-	-	-	0.755817* (0.059887) [0.0000]
Log(L)	-3573.637	-3545.07	-3556.06	-3445.072
AIC	4.068906	4.037584	4.050067	3.925082
SIC	4.090674	4.062462	4.074945	3.953069
Çarpıklık	1.15656	1.15656	1.15656	1.15656
Aşırı Basıklık	4.80292	4.80292	4.80292	4.80292
J-B	288.87	343.75	306.90	612.09
Q(5)	407.293* [0.0000]	359.566* [0.0000]	371.567* [0.0000]	468.242* [0.0000]
Q(10)	519.538* [0.0000]	459.819* [0.0000]	474.191* [0.0000]	613.154* [0.0000]
Q(20)	550.703* [0.0000]	488.386* [0.0000]	502.904* [0.0000]	654.778* [0.0000]
Q(50)	667.623* [0.0000]	591.773* [0.0000]	608.306* [0.0000]	809.178* [0.0000]
Q ² (5)	4.81821 [0.1856]	4.04445 [0.2567]	4.64672 [0.1995]	14.7765* [0.0020]
Q ² (10)	10.1397 [0.2553]	8.83057 [0.3567]	9.93847 [0.2693]	35.6329* [0.0000]
Q ² (20)	14.5117 [0.6951]	13.2940 [0.7738]	14.4520 [0.6991]	42.8869* [0.0008]
Q ² (50)	50.9623 [0.3578]	48.0022 [0.4727]	48.4607 [0.4542]	112.371* [0.0000]
ARCH(1)	1.9839 [0.1378]	1.5038 [0.2226]	1.9252 [0.1462]	3.7663** [0.0233]
ARCH(5)	0.98435 [0.4258]	0.81050 [0.5421]	0.94022 [0.4537]	2.7256** [0.0185]
ARCH(10)	1.0413 [0.4056]	0.91857 [0.5149]	1.0264 [0.4182]	2.9802* [0.0010]

*, **,*** sırasıyla %1, %5 ve %10 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlılığı, (.) standart hatayı ve [.] p-olasılık değerini ifade etmektedir.

Tablo 7’ de şokların koşullu varyans üzerindeki uzun dönem asimetrik etkilerini değerlendiren FIEGARCH (1,d,1) modeli bulgularına göre; (Egarch) γ_2 kaldıraç etki parametresi tüm dağılımlar için %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlıdır ve (Egarch) $\gamma_2 > 0$ olarak tahmin edilmiştir. Bu durum EGARCH (1,1) modelini destekler nitelikte olup şokların oynaklık üzerindeki asimetrik etkilerinin anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Rüzgâr hızı serisinin oynaklığındaki uzun hafıza için kesirli bütünleşme parametresi d Skewed student-t dağılımı dışında diğer tüm dağılımlarda %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlıdır ve dağılımlar için (0.229490 - 0.253882) arasında değer almaktadır. Kesirli bütünleşme parametresi $0 < d < 1$ arasında olduğundan sürecin durağanlığını ifade etmektedir. Tahmin edilen modele ilişkin bulgular serinin oynaklığı üzerinde asimetrik etkilerin varlığı ile birlikte uzun hafızaya ilişkin kanıtlar sunmaktadır.

5) *En Uygun Model Seçimi*: Rüzgâr hızı (WS) serisi için istatistiksel anlamlı bulunan, asimetrik koşullu değişen varyans modellerinden EGARCH(1,1) modeli, serinin ortalamasındaki uzun hafıza sürecini değerlendirmek için tahmin edilen ARFIMA(1,ξ,0) ve ARFIMA(0,ξ,1) modelleri, rüzgâr hızı serisinin koşullu değişen varyansındaki uzun hafıza süreci için şokların etkisinin simetrik kabul edildiği FIGARCH (1,d,1) modeli ve şokların etkisinin asimetrik kabul edildiği FIEGARCH (1,d,1) modeli, seçim kriterlerine göre karşılaştırılmakta ve bulguları Tablo 8’ de sunulmaktadır.

Tablo 8. Rüzgâr Hızı (WS) Serisi için Model Karşılaştırma Sonuçları

Model Seçim Kriterleri	EGARCH(1,1) (ST)	ARFIMA(1,ξ,0) (SST)	ARFIMA(0,ξ,1) (SST)	FIGARCH(1,d,1) (SST)	FIEGARCH(1,d,1) (ST)
Log(L)	-3548,32	-3312,76	-3311,8	-3443,51	-3545,07
AIC	4,040141	3,771318	3,770222	3,921037	4,037584
SIC	4,061909	3,789976	3,788880	3,942805	4,062462
Uzun Hafıza Parametreleri					
ξ	-	0,090794 (0,0016)	0,114436 (0,0000)	-	-
d	-	-	-	0,151712 (0,0006)	0,253882 (0,0000)

Not: (ST): Student-t Dağılımlı, (SST): Çarpık Student-t Dağılımlı model tahminini ifade etmektedir. AIC: Akaike Bilgi Kriteri, SC: Schwarz Bilgi Kriteri. Modellere ilişkin parameter tahminleri, diğer test ve kriterler model tahmin sonuçları tablolarındadır.

Buna göre; Tablo 8’ de verilen tahmin edilen modeller değerlendirildiğinde seçim kriterlerine göre rüzgâr hızı serisinin (WS) ortalaması için en uygun modelin ARFIMA(0,ξ,1) modeli olduğu, rüzgâr hızı serisinin (WS) koşullu varyansı için (EGARCH, FIGARCH ve FIEGARCH) modellerinden FIGARCH(1, d, 1) modelinin en uygun model olduğu görülmektedir. Buna göre; rüzgâr hızı serisinin ortalama ve varyansında uzun hafıza özelliği söz konusudur. Koşullu varyans üzerinde şokların asimetrik etkileri istatistiksel anlamlı bulunmakla birlikte (EGARCH, FIEGARCH modelleri ile) kriterlere göre şokların etkilerinin simetrik varsayıldığı FIGARCH modeli seri için daha uygun bir model olarak seçilmiştir.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye’ de rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek olan bölgeler arasından seçilen Bartın ili Amasra ilçesindeki rüzgâr hızlarının ortalama ve oynaklığındaki uzun hafıza özelliği araştırılarak seri için en uygun model belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Amasra bölgesine ait günlük rüzgâr hızı (m/s) verileri kullanılarak öncelikle seriye ilişkin tanımlayıcı istatistikler elde edilmiştir. Rüzgâr hızları serisinin tanımlayıcı istatistikleri ile birlikte görsel bir değerlendirme olarak orjinal grafiği, ACF ve PACF fonksiyonları incelendiğinde seride oynaklığın ve uzun hafıza özelliğinin kanıtları görülmüştür. Model tahminleri öncesinde durağanlık koşulu için ADF, PP ve KPSS birim kök testleri uygulanmış ve serinin ortalama durağan olduğu belirlenmiştir. Rüzgâr hızı serisinin oynaklığı için ayrıca ortalaması ve koşullu varyansındaki uzun hafıza süreci için tüm modeller Normal, Student-t, Skewed Student-t ve GED dağılımlı p,q=0,1,2 gecikmeli olarak farklı kombinasyonlarda tahmin edilmiştir. Söz konusu modeller arasından parametreleri %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlı olan model sonuçlarına yer verilmiştir. Amasra bölgesi rüzgâr hızları için koşullu değişen varyans modellerinden asimetrik etkileri göz önünde bulunduran EGARCH(1,1) modeli uygun model olarak seçilmiştir. Modelin kaldıraç etki parametresi istatistiksel anlamlı ve (Egarch) $\gamma_2 > 0$ olduğundan asimetrik etkiler söz konusudur ve negatif şoklar serinin oynaklığını daha fazla arttırmaktadır. Rüzgâr hızı serisinin ortalamasındaki uzun hafıza süreci için ise en uygun model Skewed student-t dağılımlı ARFIMA(0,ξ,1) modeli olarak tahmin edilmiştir. Modelin kesirli

bütünleşme parametresi istatistiksel anlamlıdır ve $\xi=0,114436$ olarak elde edilmiştir. Benzer biçimde serinin koşullu değişen varyansındaki (oyunaklılığı) uzun hafıza süreci için en uygun model ise Skewed student-t dağılımlı FIGARCH(1,d,1) modeli olarak elde edilmiştir. Modelin kesirli bütünleşme parametresi $d=0,151712$ ile istatistiksel anlamlı bulunmuştur. Buna göre, rüzgâr hızı serisinin ortalaması ve koşullu varyansındaki uzun hafıza kesirli bütünleşme parametreleri %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel anlamlıdır ve her iki parametre de $(0<\xi<0,5)$, $(0<d<0,5)$ aralığındadır. Sonuç olarak kesirli bütünleşme parametrelerinin değerleri çok yüksek olmasa da rüzgâr hızı serisi durağan fakat uzun hafızalı olup bu durum geçmiş gözlem değerleriyle güçlü bir bağıllığın göstergesidir. Otokorelasyonlar pozitif ve gecikme uzunluğu arttıkça ACF fonksiyonu hiperbolik ve uzun dönemde yavaş olarak azalmaktadır. Bu sebeple uzun hafıza modelleri, klasik ARIMA modelleri gibi kısa hafıza yaklaşımlarına göre serideki yapıyı daha iyi modelleyebilmektedir. Çalışma bulgularına göre, Amasra bölgesi rüzgâr hızları için koşullu varyansla birlikte uzun hafıza sürecinin de değerlendirilmesinin uygun olduğunu ve seri için ARFIMA(0, ξ ,1)-FIGARCH (1,d,1) modelinin en uygun model olarak önerildiğini söylemek mümkündür. Rüzgâr hızlarının doğrusal olmayan kaotik karakteristikleri sebebiyle şüphesiz ki bir bölge için önerilen enerji potansiyel analizleri bir başka bölge için farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada Bartın ili Amasra bölgesinin bir zaman serisi yaklaşımı ile rüzgâr enerjisi potansiyeli analiz edilmiştir. Özellikle Bartın ili Amasra bölgesinin seçilmesinin ilk sebebi rüzgâr hızı potansiyeli açısından iyi bir bölge olmasıdır. Bölgenin seçilmesindeki diğer bir sebep ise kıyıya yakın bir bölge olması dolayısıyla son yıllarda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı' nın yakın dönem stratejilerinde gözönünde bulundurulmuş deniz üstü(off-shore) rüzgâr enerjisi sistemlerinin gelecek çalışmalarına da teorik bir katkı sağlaması düşüncesidir. Ayrıca bulgulara göre; Bartın ili Amasra bölgesi rüzgâr hızlarının ortalama ve varyansındaki uzun hafıza özelliğinin istatistiksel olarak anlamlı bulunması ($\xi=0,114436$ ve $d=0,151712$) değerleri ile $0<d<0,5$ olması uzun hafıza sürecini desteklemektedir. Bir başka ifade ile zaman serisi hem ortalamaya dönmektedir hem de kovaryans durağandır anlamına gelmektedir. Bu durum ise bir bölgede rüzgâr enerjisi kurulumu sonrası o bölgeden elde edilecek elektrik enerjisinin talep tarafına kararlı, güvenilir bir şekilde iletimi ile ilgili ve şebeke yönetimine de katkı sağlayabilecek bir ipucu niteliğinde değerlendirilebilir. Çalışmanın Türkiye'deki rüzgâr hızları ve tahminine yönelik derin öğrenme algoritmalarının, yapay sinir ağları gibi yöntemlerin kullanıldığı çalışmalardan farklı olarak rüzgâr hızlarının ortalama ve varyansındaki kesirli dinamiklerin değerlendirilmesi ile uzun hafıza özelliğinin incelenmesi ve tahmin edilen uygun model performanslarının karşılaştırılması açısından literatüre katkı sunması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Shen, Z. & Ritter, M. (2015). Forecasting volatility of wind power production. *SFB 649 Discussion Paper-026*, 1-32.
- [2] Caporin, M. & Preš, J. (2012). Modelling and forecasting wind speed intensity for weather risk management. *Computational Statistics and Data Analysis*, 56, 3459-3476.
- [3] Bouette, J.C., Chassagneux, J.F., Sibai, D., Terron R., & Charpentier, A. (2006). Wind in Ireland: long memory or seasonal effect?, *Stoch Environ Res Risk Assess*, 20, 141-151.
- [4] Liu, X. & Wang, Y. (2013). Wind speed forecasting based on ARFIMA-EGARCH model. *BTAIJ*, 8(4), 559-562.
- [5] Özen, C., Kaplan, O., Özcan, C. & Dinç, U. (2019). Short Term Wind Speed Forecast By Using Long Short Term Memory. *ATMOS 2019*, İstanbul, 1-7.
- [6] Malinda, M. & Hui, C. J. The Study of the Long Memory in Volatility of Renewable Energy Exchange-Traded Funds (ETFs). *Journal of Economics, Business and Management*, 4(4), 252-257.
- [7] Haddad, M., Nicod, J., Mainassara, Y.B., Rabehasaina, L., Masry, Z. A., & Péra, M. (2019). Wind and solar Forecasting for Renewable Energy System using SARIMA-based Model. *International Conference on Time Series and Forecasting, Sep 2019*, Gran Canaria, Spain, 1-15.
- [8] Emami, P.S. B., Rafei, M. & Shahrabi, H. (2020). Forecasting the wind direction by using time series models with long-term memory (case study: Nayer region). *International Journal of Energy Sector Management*, 1-12.
- [9] Taylor, J.W., McSharry, P. E. & Buizza, R. (2008). Wind Power Density Forecasting Using Ensemble Predictions and Time Series Models. *Series: ECMWF Technical Memoranda*, 553, 1-17.
- [10] Dong, Y., Zhang, L., Liu, Z. & Wang J. (2020). Integrated Forecasting Method for Wind Energy Management: A Case Study in China. *Processes*, 8(35), 1-26.
- [11] Prabha P.P., Vanitha, V. & Resmi R. (2019). Wind Speed Forecasting using Long Short Term Memory Networks. *2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, 1310-1314.

- [12] Balcı, M., Yüzgeç, U. & Dokur, E. (2022). Rüzgâr Hızı Tahmini İçin Ayırıştırılmaya Dayalı Hibrit Yöntemlerin Karşılaştırmalı Bir Çalışması. *International Conference On Emerging Sources In Science May 26-27*, 118-135.
- [13] Altınsoy, M. & Bal, G. (2019). Uzun Dönem Rüzgâr Hızı Tahmininde Yapay Sinir Ağlarının Kullanımı ve Performans İncelemesi. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, 8(1), 21-28.
- [14] Kurban, M. Hocaoglu, F.O. & Mert Kantar, Y. (2007). Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Tahmininde Kullanılan İki Farklı İstatistiksel Dağılımın Karşılaştırmalı Analizi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 103-109.
- [15] Çağlar, A. (2017). Antalya Bölgesi İçin Rüzgâr Karakteristiğinin Weibull Dağılımı Kullanılarak İncelenmesi. *Cumhuriyet Sci. J.*, 38(4), 156-164.
- [16] Görgülü, S. (2019). Atatürk Havalimanı Verileri Kullanılarak Rayleigh Dağılım Yöntemiyle İstanbul'un Rüzgâr Karakteristiğinin Tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 17, 103-108.
- [17] Yanıktepe, B. & Kara, O. (2021). Üç Farklı İstatistiksel Dağılım Yöntemleri Kullanarak Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Tahmin Edilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 359-368.
- [18] Engle, R. F. (1982). Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation. *Econometrica*, 50(4), 987-1007.
- [19] Bollerslev, T. (1986). Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity. *Journal of Econometrics*, 31 (3), 307-327.
- [20] Nelson, D.B. (1991). Conditional Heteroskedasticity in Asset Returns: A New Approach. *Econometrica* (59), 347-370.
- [21] Granger, C.W.J. & Joyeux, R. (1980). An Introduction to Long-Memory Time Series Models and Fractional Differencing. *Journal of Time Series Analysis*, (1), 15-39.
- [22] Hosking, J. R. M. (1981). Fractional Differencing. *Biometrika*, 68 (1), 165-176.
- [23] Baillie, R. T., Bollerslev, T. & Mikkelsen, H. O. (1996). Fractionally Integrated Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 74 (1), 3-30.
- [24] Bollerslev, T. & Mikkelsen, H.O. (1996). Modeling and Pricing Long-Memory in Stock Market Volatility. *Journal of Econometrics*, 73(1), 151-184.
- [25] Türkyılmaz, S. & Balıbey, M. (2014). Türkiye Hisse Senedi Piyasası Getiri ve Oynaklığındaki Uzun Dönem Bağımlılık için Ampirik Bir Analiz. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 16(2), 281-302.

Araştırma Makalesi - Research Article

Process Mining Methodology for Digital Processes under Smart Campus Concept

Akıllı Kampüs Konsepti Altında Dijital Süreçler İçin Süreç Madenciliği Metodolojisi

Onur Doğan^{1,2}, Esra Cengiz Tırpan^{3,4*}

Geliş / Received: 15/08/2022

Revize / Revised: 18/10/2022

Kabul / Accepted: 01/12/2022

ABSTRACT

Digital transformation affects universities as well as many industries. Universities are increasingly using various digital resources and systems to manage their knowledge. The smart campus, on the other hand, supports informed decision-making by integrating these resources and systems. Process mining provides real insights for digital transformation, allowing processes to be examined more transparently. This study aims to examine the proposed project implementation processes related to the smart university with the process mining methodology. For this purpose, 32 completed projects submitted to İzmir Bakırçay University Scientific Research Projects Coordinatorship (BAPK) with the proposed methodology adapted from Deming's continuous improvement cycle were examined. The data are taken from two different pages in the project automation system. According to the research findings, Projects are grouped into three categories: Guided Projects (GDM, 5 projects), Graduate Thesis Projects (TEZ, 5 projects), and Career Start Support Projects (KBP, 22 projects). 40.6% (13 projects) of the applications went directly to the project review stage, while 19 (59.4%) needed procedural correction. Considering the time from the creation of the application of 32 projects to the signing of the contract, it is seen that the arithmetic average of the cycle time is 15.1 weeks, and the median average is 52.5 days. The notable difference between arithmetic and median mean is that very few projects are of long duration. Procedural adjustments affect project evaluation cycle time by an additional 14 days. The carelessness or lack of knowledge of the applicants extends the cycle time of the process from 15 days to 53 days. The total duration of unnecessary waiting time in the process is 17 days. This study primarily proposes that non-digital processes should be digitized as soon as possible.

Keywords- *Process Mining, Smart Campus, Digital Transformation, Process Management*

ÖZ

Dijital dönüşüm, birçok endüstriyi etkilediği gibi üniversiteleri de etkilemektedir. Üniversiteler, sahip olduğu bilgiyi yönetmek için, çeşitli dijital kaynaklardan ve sistemlerden giderek daha fazla faydalanmaktadır. Akıllı kampus ise, bu kaynakları ve sistemleri entegre ederek, bilinçli karar verme sürecine destek olur. Süreç madenciliği, süreçlerin daha şeffaf incelenmesine olanak tanıyarak, dijital dönüşüm için gerçek öngörüler sunar. Bu çalışma, akıllı üniversite ile ilgili önerilen proje uygulama süreçlerini, süreç madenciliği metodolojisi ile incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Deming'in sürekli iyileştirme döngüsünden uyarlanan önerilen metodoloji ile İzmir Bakırçay Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPK)'ye sunulan ve tamamlanmış 32 proje incelenmiştir. Veriler proje otomasyon sisteminde yer alan iki farklı sayfadan alınmıştır. Araştırma bulgularına göre; Projeler, Rehberli Proje (GDM, 5 proje), Lisansüstü Tez Projeleri (TEZ, 5 proje) ve Kariyer Başlangıç Destek Projeleri (KBP, 22 proje) olmak üzere üç kategoride gruplandırılmıştır. 32 projenin başvurusunun oluşturulmasından sözleşmenin imzalanmasına kadar geçen süreye bakıldığında çevrim

¹ Contact: onur.dogan@bakircay.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3543-4012>)

Department of Industrial Engineering, İzmir Bakırçay University, İzmir, Türkiye

² *Department of Mathematics, University of Padua, Padua, Italy*

^{3*} Corresponding author contact: esracengiz01@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7675-5635>)

Management Information Systems Doctoral Program, Graduate School of Business, Sakarya University, Sakarya, Türkiye

⁴*Department of Management Information Systems, Bilecik Seyh Edebali University, Bilecik, Türkiye*

süresinin aritmetik ortalamasının 15,1 hafta, medyan ortalamasının ise 52,5 gün olduğu görülmektedir. Aritmetik ve medyan ortalama arasındaki dikkate değer fark, çok az projenin uzun süreli olmasından kaynaklanmaktadır. Prosedürel düzeltmeler proje değerlendirilmesinin döngü süresini fazladan 14 gün etkilemektedir. Başvuru sahiplerinin dikkatsizliği veya bilgi eksikliği, sürecin döngü süresini 15 günden 53 güne kadar uzatmaktadır. Süreçteki gereksiz bekleme süresinin toplam süresi 17 gündür. Bu çalışma öncelikle, dijital olmayan süreçlerin mümkün olan en kısa sürede dijitalleştirilmesi gerektiğini önermektedir. Başvuruların %40,6'sı (13 proje) doğrudan proje inceleme aşamasına geçerken, 19'u (%59,4) prosedürel düzeltmeye ihtiyaç duymuştur.

Anahtar Kelimeler- Süreç Madenciliği, Akıllı Kampüs, Dijital Dönüşüm, Süreç Yönetimi

I. INTRODUCTION

Institutions, cities, and nations show great interest in smart cities and sustainable development to do better the living standards and life quality of their people in many ways [1]. There are many definitions of smart cities in the literature. Barba-Sánchez et al. [2] defined the use of information technologies for the analysis of local regions as a smart city. Another research argued that this city should do better the life quality of life of the city dwellers and that smart city applications should be developed for this purpose [3]. Richter et al. [4] argued that smart city applications should be used in order to keep the infrastructure of the city productive and information technologies should be used for this. Giffinger et al. [5], information technology can be experienced in various sectors with the use of smart cities can be said. Hollands [6] defended the necessity of a population with creative and innovative thinking power for the formation of those cities and stated that the realization of those cities would occur automatically. Bakıcı et al. [7] defined smart cities as regions with technological infrastructure. All definitions have one thing in common. This point is that the use of information technologies is necessary to realize and develop smart city plans. Smart cities can thus be designed.

The term “smart campus” integrates different information system platforms. Unlike the traditional campus, cloud computing, IoT, and internet technologies link teaching, research, and management of campus and campus resources to create a unified knowledge management platform [8]. With the developments in technology, such as the IoT, universities; can track critical resources, improve access to information, create more innovative plans, and design safer campuses [9]. Based on the various challenges faced by universities and cities, it is stated that smart cities have similarities with smart campuses [10]. Some features such as users, events, and connections on smart campuses are considered a self-sufficient small city [11].

The higher education environment has undergone a continuous and rapid digital transformation. Like many industries, higher education institutions need a particular transformation to survive in this era of the digital revolution [12]. Higher education institutions have a large amount of information about their students, programs, and facilities. Universities are increasingly connected to networks of technical applications, with new digital resources and systems to manage this information [13]. At the same time, universities have a significant role in developing a sustainable society with the responsibility of training science-technology talents, knowledge transformation, and technical innovation [14]. A smart campus is defined by its skill to realize a more informed deciding process by integrating various IT devices and applications. A university should have six intelligence areas to highlight the characteristics of a smart campus. These are iLearning, iManagement, iGovernance, iSocial, iHealth and iGreen [15]. iManagement is concerned with the campus's more physical aspects and general management, such as building management systems, building maintenance systems, fire alarm systems, facial recognition and identification, smart card system, and smart access and control system [16]. For example, an IoT lighting control system can automatically adjust lighting levels in classrooms and offices; a central maintenance system can perform self-ameliorating in the event of plant failure; a fire alarm system can trigger the fire alarm and direct people to the nearest exit point [15]. The management of processes enables organizations to create a competitive advantage by defining and demonstrating the maturity level of the process [17].

Process mining allows for transparency in real processes, providing insights for fact-based digital transformation [18]. Process mining resources make an important contribution to the digital transformation process by maintaining communication and collaboration among the participants [19]. Process mining tools can be used to explore underlying processes, reduce complexity and make them more efficient [20, 21]. Beyond that, process mining helps identify solution strategies and select appropriate measures for strategy implementation. Essentially, the identification of the potential for improvement of efficiency, speed, agility and compliance, which are key success factors, by process mining makes digital transformation possible [21].

Process mining is a discipline that enables organizations to discover, analyze and do better their business processes, supported by many data mining algorithms and techniques [22]. The increasing use of information systems in business process studies is a suitable baseline for process mining because process mining tools exploit formed traces of activities conducted and noted with digital technologies [23]. One of the key benefits of process mining results is that it reveals in detail how a business process works [24]. With process mining, the personnel responsible for the process can be analyzed, bottlenecks can be discovered, staff productivity can be found, and case-based cycle times can be determined [25]. The main goal of process mining is to do better business processes by applying analytical tools.

A. Process Mining

Processes are critical to controlling the operations in companies. They are often complicated due to many reasons. However, processes in companies have a standard feature. They yield data called the event data produced in process event logs. The analysis of event logs enables various possibilities for enhancing processes. Table 4 illustrates a basic event log, including data about *event attributes*. The event log underlying traces are $L = \{\langle a, b, c, d \rangle, \langle c, d, b, a \rangle, \langle b, a, d, c \rangle, \langle d, c, b, a \rangle\}$ and they are represented by 'case IDs' 1, 2, 3, and 4, respectively. We suppose that the set of attributes is fixed and the function *attr* maps pairs of events and attributes to the corresponding values. For each *event* e , the log holds the case ID $case(e)$, the activity name $act(e)$, and the set of attributes described for e , e.g., $attr(e; timestamp)$ or $attr(e; resource)$. For instance, for the event log in Table 1, $case(e_7) = C2$, $act(e_7) = a$, $attr(e_7; timestamp) = 17-09-2022 10:28pm$, and $attr(e_7; resource) = "Gamze"$.

Table 1. Simple event log

Event	CaseID	Activity	Timestamp	Temperature	Resource	Cost	Risk
1	C1	c	17-09-22 9:08	25	Mert	34	Low
2	C2	c	17-09-22 17:03	27	Mine	17	Low
3	C2	a	17-09-22 18:32	28	Mustafa	31	Medium
4	C1	a	17-09-22 7:01	25	Sevgi	44	Low
5	C1	b	17-09-22 7:06	27	Gokhan	42	Low
6	C1	d	17-09-22 9:18	26	Pelin	55	Medium
7	C2	d	17-09-22 17:28	25	Gamze	42	Low
8	C2	b	17-09-22 17:40	25	Pelin	55	Low
9	C3	c	18-09-22 9:18	29	Mert	19	High
10	C4	d	18-09-22 17:03	29	Mustafa	29	High
11	C4	c	18-09-22 17:28	28	Nesrin	15	High
12	C3	b	18-09-22 2:01	27	Sevgi	20	Medium
13	C3	a	18-09-22 7:06	26	Mert	30	High
14	C3	d	18-09-22 9:08	30	Sevgi	31	Medium
15	C4	b	18-09-22 17:40	29	Sevgi	35	High
16	C4	a	18-09-22 18:32	30	Pelin	55	Medium

The input for process discovery is an event log. This study focuses on the control-flow perspective of a process, which means data corresponding to the temporal relation of activities for the sake of understandability. Process discovery algorithms use an event log as input and create a process model as an output. This paper considers the directly-follows graph annotated with the frequencies as a process discovery method. In such a graph, nodes symbolize activities and arcs express a view of causality. Activities a and b are connected if a is frequently followed by b . Mathematical notation of a directly-follow graph is given as follow:

Let L be an event log. The directly-follow graph of L is $G(L) = (A_L \rightarrow_L, A_L^{start}, A_L^{end})$, where

$A_L = \{a \in \sigma \mid \sigma \in L\}$ gives the activity sets in L , and σ indicates the traces, a sequence of activities in the log L ,

$\rightarrow_L = \{(a, b) \in A \times A \mid a \succ_L b\}$ presents the directly-follow relations,

$A_L^{start} = \{a \in A \mid \exists \sigma \in L a = first(\sigma)\}$ and $A_L^{end} = \{a \in A \mid \exists \sigma \in L a = end(\sigma)\}$ show the set of start and end activities, respectively.

Figure 1 depicts the directly-follow graph of event log L given in Table 1.

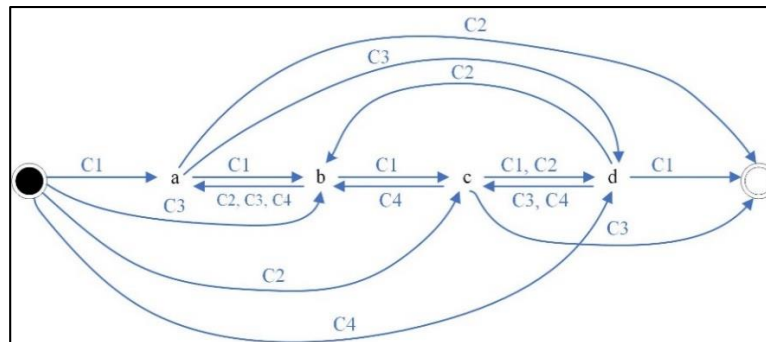


Figure 1. Directly-follow graph of event log L

This study aims to examine the proposed project implementation processes related to the smart university by creating directly-follow process maps. In this way, the number of applications according to faculties and departments, how often the activities in the process are seen, and the critical activities that extend the cycle time will be determined.

The remaining part of the paper is as follows. Section 2 summarizes the literature considering smart university and digital transformation and process mining concepts. Section 3 explains the proposed methodology. It was adopted from Deming's continuous improvement cycle. Section 4 presents a real-world implementation of the proposed methodology. Finally, the study concludes with Section 5.

II. RELATED WORKS

A. Smart University and Digital Transformation

The result of the practice of integrating cloud computing and the internet of things (IoT) is the smart campus [26]. Education in a smart environment supported by smart technologies, making use of smart tools and smart devices, can be considered smart education [27]. Elements such as the cloud computing, wireless networks, radio frequency identification (RFID), mobile terminal, and IoT are fundamental parts of the smart campus [10]. Most colleges and universities use the development models of smart campuses, such as campus common card systems, student information inquiry on phones, and campus-sharing bicycle systems [28]. Lin et al. [29] suggested that it is possible to access campus applications from anywhere via the Internet of Things technologies. Alvarez-Campana et al. [30] advocated the testing of the internet of things by using the technologies at the first stage in universities and then integrating them into cities. Chiochan et al. [31] identified a prototype area in their study at Maejo University. They used sensors to measure moisture in this area. These moisture data obtained with IoT technologies were stored. Jain et al. [32] used automation technologies to provide remote access to universities. They argued that areas without remote access were inefficient.

Higher education all over the world is undergoing digital transformation [33]. Significant investments in technology and infrastructure regarding the irresistible power of digital technologies have been encouraged [34]. In the last few years, many proposals have emerged in the field of digitization and interconnection of educational assets [1]. Cisco initially developed a framework that connects various building domains under a single Internet Protocol (IP) network as part of companies' digital transformation [35]. In 2016, this model was designed for the education sector. This model has components such as campus operations center, smart parking, telepresence in classrooms, and building optimisation/analytics. Xiao [33] found that in the strategic development plans of the top 75 universities in China, digitalization, as perceived by universities, includes instrumentality (e-campus construction and implementation) and modernization (sustainability and efficiency innovations in teaching and learning).

From the related work above, process management under smart campus and digital transformation concepts is still a gap in this field.

B. Process Mining in Universities

Learning management systems (LMS), which use has increased in recent years, strongly impact educational research. LMS stores data on the activities of all students at a certain level of detail [36]. Examples of systems that store event logs are virtual learning environments, student enrollment procedures, Mass Open Online Courses (MOOCs), access to educational material logs, Intelligent Course Systems (ITs) [37]. Examination and

discovery of goings in event logs created by educational environments are provided by educational process mining (EPM). EPM aims to do better the training process by utilizing the information extracted from the records in the model to ease a better understanding of the process [38].

Bogarinet al. [39] analyzed data from 84 undergraduate students who followed an online course using Moodle 2.0 to develop EPM. Ayutaya et al. [40], in their research, discuss a heuristics-driven process mining algorithm. A student enrollment event log consisting of 299 cases and 569 events were used for this research. Ayutaya et al. [40] used EPM tools to examine how students use learning resources, students' compliance with homework, and the relationship between students' behavior and final grades. An LTL-based model checking tool was used to analyze moodle logs. Etinger et al. [41] aimed to discover frequent behavioral patterns in event logs. The discovered process model is the starting point for evaluating the usage behavior of Moodle LMS. Etinger [42] strived to reveal the relationship between user behavior that creates online course usage patterns and students' grades. Doleck et al. [43] applied process mining to the online "modeling and simulation" course at the Faculty of Informatics. He determined students' diagnostic reasoning processes and learner behaviors related to outcomes. The research was conducted at BioWorld, a computer-based learning environment that supports students in solving medical problems and receiving formative feedback. Deeva and Weerdt [44] aimed to discover local patterns in data representing learning processes with process mining techniques. Real-life event logs from JMermaid, an intelligent learning environment, were used to teach information system modeling. Ramaswami et al. [45] evaluated educational data mining methods to increase the predictive accuracy of student academic performance in a course environment at the university. They also integrated process mining features to determine their effectiveness in improving the accuracy of forecasts. Dolak [46], explored using process mining techniques to explore students' navigational paths, activities, and behaviors in LMS Moodle. Data from 701 students following an online course consists of 32 984 events and 33 activities. Salazar-Fernandez et al. [47] used process mining techniques with a curriculum analytics approach to understanding the educational trajectories of higher education students.

Table 2 provides a summary of the related works, including smart university and digital transformation and process mining in universities.

Table 2. Related works

Study	Domain ¹	Purpose
[30]	SUDT	The study describes the main features of the IoT platform offered in the engineering schools of the Universidad Politécnica de Madrid and the technological challenges faced, with a special emphasis on the platform's functionality, services, and potential offerings.
[32]	SUDT	The study presents the automation techniques and a module that works for a room automation and ease of access to appliances with digital control.
[28]	SUDT	Addressing the smart campus construction of the China University of Electronic Science and Technology, it explores the construction of the smart campus and the innovative, practical situation of student studies.
[29]	SUDT	The study proposes CampusTalk, which provides convenient access to cyber and physical devices through the web technology.
[48]	SUDT	The study aimed to evaluate the future scalability of the smart university and its potential to automate other fields and to show a smart university model.
[33]	SUDT	The study examined how the role of digitalization was framed in the strategic development plans of the top 75 universities in China.
[49]	SUDT	The study presents an overview of the content of the multi-component electronic education environment of the master's education in Applied Informatics from the perspective of personnel, technology, and educational resources.
[50]	SUDT	The study focuses on expressing a systematic approach to designing the concept of a smart university and proposes a smart university model.
[51]	SUDT	The study examined the process of managing the digital transformation of the university using analytical tools. It shows that the management decision-making process in a smart university should be based on Big Data-based approaches and technologies
[52]	SUDT	The study aimed to analyze the features of the digital university model to determine the criteria for evaluating the usability of the digital transformation process.
[39]	PM	The study proposes to use clustering to improve educational process mining. To obtain more specific and accurate student behavior models, it is recommended to use data from Moodle's diaries separately for each student group/cluster.
[53]	PM	The study aimed to analyze the navigation path of the university's website to increase its usability and comfort level based on a process mining technique.
[54]	PM	The study suggests analyzing students' careers with process mining techniques. The paths followed by students from enrollment to undergraduate degree were analyzed by process mining technique.

[46]	PM	This study explores using process mining techniques to discover students' activities, navigation paths, and behaviors in LMS Moodle.
[55]	PM	This paper reports on the findings that proposed a novel learning analytics methodology that combines three complimentary techniques (agglomerative hierarchical clustering, epistemic network analysis, and process mining).
[56]	PM	This study aimed to examine the interaction between psychological well-being (PWB) and self-regulated learning (SRL) as students plan and reflect on approaches to achieving their academic goals for nine consecutive weeks.
[47]	PM	The study presents a program-level approach to curriculum analytics. The training trajectories of the courses with a high failure rate were created using process mining techniques.

¹SUDT: Smart University and Digital Transformation, PM: Process Mining in Universities

Previous studies indicated that process mining significantly impacts process management in university processes as a part of smart campus, especially iManagement mentioned before. This study fills the gap in a niche process in universities, the evaluation of scientific research projects, by proposing a new process mining methodology under the smart campus concept.

III. METHODOLOGY

This study uses a framework developed at Izmir Bakircay University [57, 58], which was built on especially the existing information systems of the university (automation, personnel, procurement, web services, etc.). The smart campus framework includes three main stages. (Readers can look at the details from the studies cited above). The last stage supports the framework for the sustainability of the smart campus through real-time data analytics, monitoring, reporting, and performance measurement module.

Figure 2 indicates the process mining methodology for digital processes under the smart campus framework. The proposed methodology follows the Deming's constant improvement cycle, Plan, Do, Check, Act, for implementing process mining. While the Plan step is a common step for any quality improvement research, the remaining steps were equipped with some smart campus ingredients such as real-time data analytics, visualization, recommendation, performance management, and reporting, shown in red and bold.

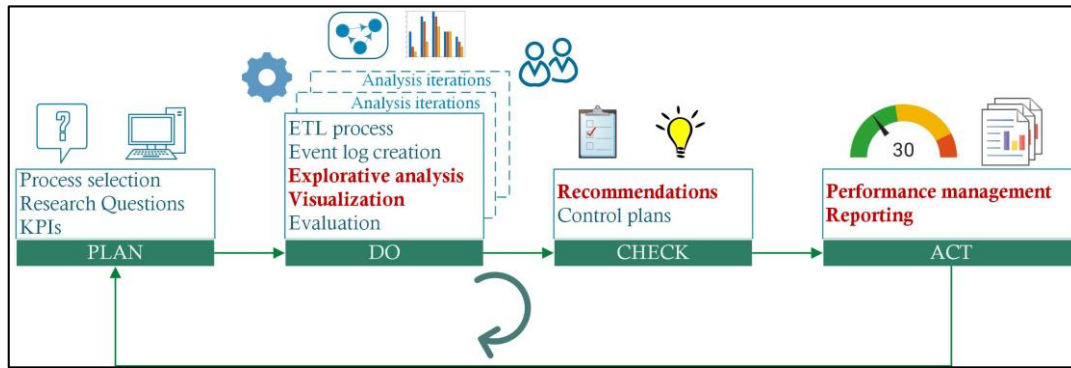


Figure 2. Process mining methodology for smart campus concept

IV. CASE STUDY

B. Plan

The process that will be analyzed using process mining can be determined by either interviewing process owners or prioritizing with some decision-making techniques such as TOPSIS and VIKOR. This study selected the process of evaluation of scientific research projects by interviewing. Research questions (RQs) were defined as follows:

- How does the number of applications change concerning the faculties and departments?
- How frequent are activities in the process executed?
- Are there any critical activities that extend the cycle time?

Key performance indicators (KPIs) were specified as follows:

- The number of loops and self-loops in the process

ii. The duration of unnecessary waiting time

C. Do

The data were extracted from the project automation systems from two different pages. The activities related to the project transactions were obtained from one page, and other attributes such as faculty and department were extracted from another page. Both data from two pages were combined by considering project ID as the primary key. After some preprocessing steps, combined project data was converted into an event log that includes a case ID, timestamp, and activity.

1) *Research Question 1 Descriptive Statistics*: Before the process mining analysis, descriptive statistics were calculated to summarize the event log as explorative analysis. The details of the 32 completed projects between 18.09.2020 – 23.06.2022 have been examined. Projects were grouped into three categories: Guided Project (GDM, 5 projects), Graduate Thesis Projects (TEZ, 5 projects) and Career Start Support Projects (KBP, 22 projects). Table 3 shows the distribution of the projects applied by faculties and departments.

Table 3. Basic statistics of faculties and departments

Faculty of Engineering and Architecture	10	Faculty of Economics and Administrative Sciences	4
Computer Engineering	2	Economics	1
Biomedical Engineering	4	Business	3
Electrical and Electronics Engineering	1		
Industrial Engineering	1	Medical School	9
Fundamental Science	2	Surgical Medical Sciences	3
		Clinical Medical Sciences	3
Faculty of Arts and Sciences	5	Basic Medical Sciences	3
Geography	2		
Psychology	1	Faculty of Health Sciences	4
Sociology	1	Language and Speech Therapy	1
History	1	Nursing	1
		Physical Therapy and Rehabilitation	2

2) *Research Question 2 Frequency Perspective*: Figure 3 shows that the process flow of the applied projects. The thickness of the arrows increases when the number of transitions between two nodes increases. Similarly, the darkness of the colors in the nodes increase when the number of executed activities increases. All processes start with “Project creation” activity by the project owner and go on with submitting the project. These projects are either directly reviewed or requested some revisions in terms of mandatory requirements. 40.6% (13 projects) of the applications went directly to the project review stage, while 19 (59.4%) needed procedural corrections. Seven project applications (21.9%) received more than one correction. After the “Project review” stage completes, projects are evaluated thoroughly by experts considering technical details. While 81% of projects (26 applications) went directly to the contract stage, corrections were requested from six applications. The activity of “Requesting revision” was performed 15 times, although these revisions were requested for only six projects. The reason is that some projects require more than one revision, seven times in total. It means there is a re-work (loop) in the revision step. After some re-works, three out of six projects were accepted. However, reviewers also requested some revisions for the remaining three projects, which caused another loop.

3) *Research Question 3 Performance Perspective*: Figure 4 presents the performance measures of the process. Considering the period from the creation of the application of 32 projects to the signing of the contract, it is seen that the mean duration of the cycle time is 15.1 weeks, and the median average is 52.5 days. The notable difference between arithmetic and median average is that few projects have long duration.

Because applications were made via the website, activity durations are seen instant. The application system records only click timestamps. Therefore, it is noteworthy to observe the duration between activities. Receiving more than one correction between “Waiting for re-edit” and “Re-edited” causes a 33.1 hour-increase in cycle time. These are also activities without added value for the Coordinatorship of Scientific Research Projects (BAPK) personnel. The first procedural corrections made by the project coordinators took an average of 11.6 days. This resulted in an average delay of 13.5 days for 13 project applications not in need of correction. In other words, procedural corrections (starting with the “Waiting for re-edit” activity) affected the cycle time of the project evaluation by extra 14 days. When we look at the root cause of this delay, we see that 4 out of 10 applications that caused the delay (receiving procedural correction) came from medical school. As it was discussed from the frequency perspective, six out of 32 projects need revisions. In the first re-work step among “Requesting revision”,

“Approving revision” and “Receiving revision”, there is an extra 13.1-day duration affecting the cycle time negatively. Fortunately, three out of six projects were accepted after 6.3 days on average. On the other hand, the remaining three projects can be determined as the bottleneck of the project evaluation process with high durations. These three projects required 26 days to receive reviewers' comments. Then they again followed the same steps. But the worst time consumption occurred for the acceptance of these projects due to several reasons. If the owners of these projects completed the required revision before sending reviewers, the mean duration of the cycle time would be 75 days instead of 15 weeks.

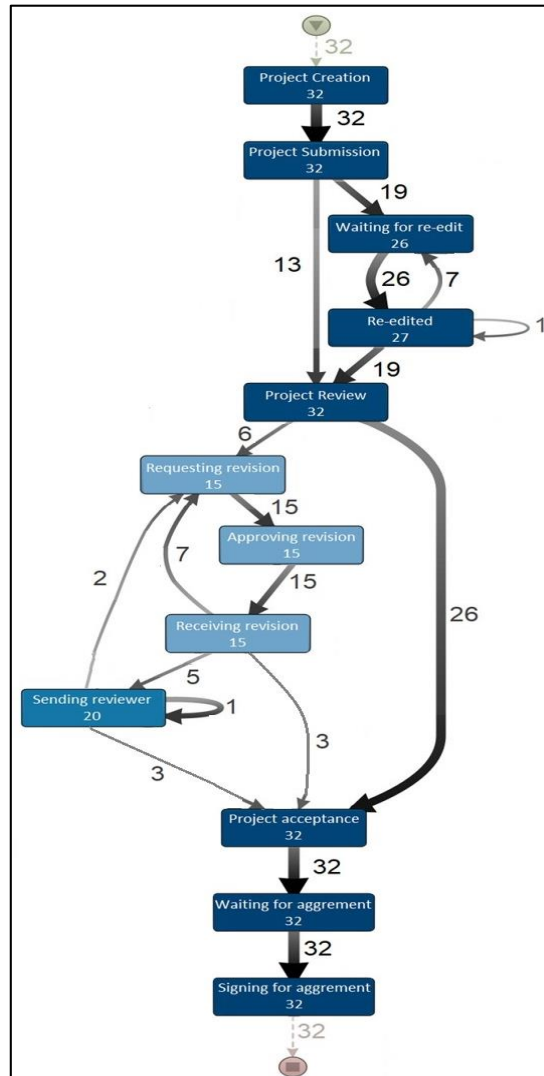


Figure 3. Activity occurrence perspective of process

Figure 5 shows the process flow of the projects sent to the reviewers. Only GDM-coded applications were sent to the reviewers for technical evaluation. It was seen that there was no project sent to the reviewers without procedural correction. In other words, all applications that were sent to reviewers were received at least one procedural correction by BAPK personnel before sending to reviewers. After the reviewers' comments, two projects completed the desired corrections in the first time, while the remaining three projects received more than one correction. The time between sending to the reviewers and waiting for the agreement took an average of 51 days. The average duration of reviewers' evaluation is 26 days. However, a self-loop with 3.6 day-duration shows that reviewers received a procedural correction from the coordinatorship personnel. After accepting the project, the agreements were signed in 39.7 weeks. This duration was 51.6 days when considering all projects.

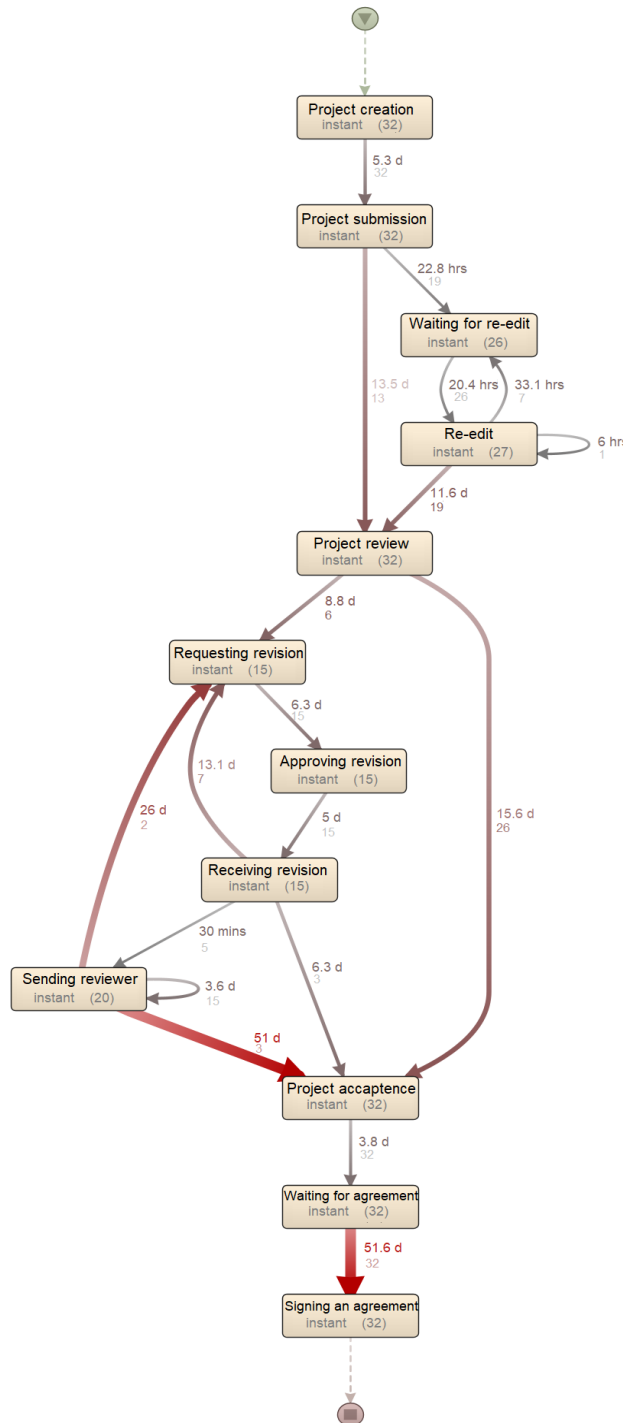


Figure 4. Time perspective of process

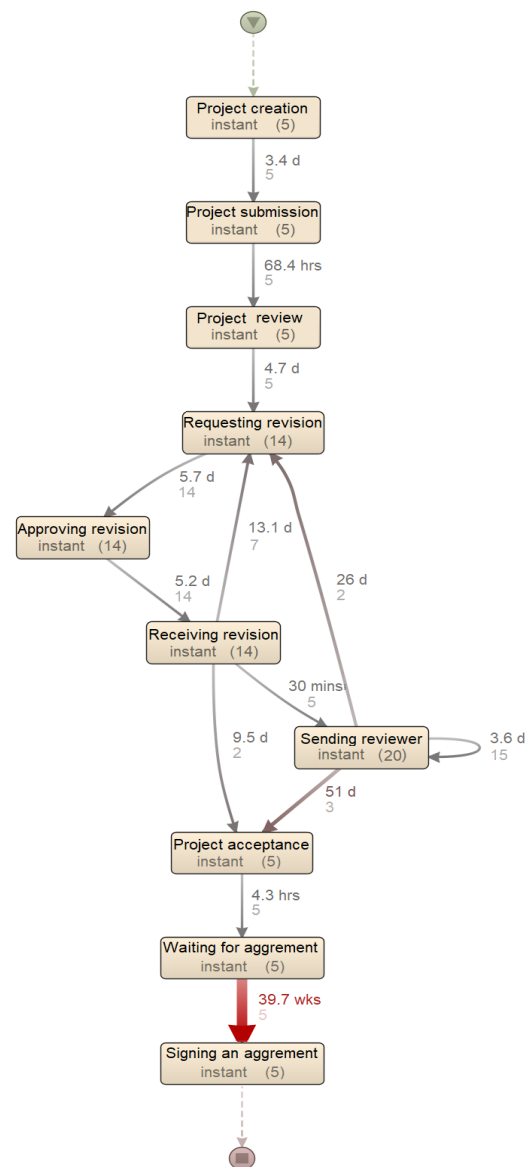


Figure 5. Processes sent to reviewers

D. Check

This sub-section includes process improvement recommendations with a control plan. An ideal process refers to a process that does not include any kind of waste and can be shown by an activity set. In this study, it can be described as follows: Project creation, Project submission, Project review, Project acceptance, Waiting for agreement, Signing an agreement. If all applications conformed to the ideal process, the cycle time could be just

38 and 45 days on median and arithmetic average, respectively. However, the carelessness or insufficient knowledge of the applicants extends the cycle time of the process from 15 to 53 days. It also creates an extra workload for BAPK personnel, which is regarded as a waste.

BAPK personnel should check the estimated project cycle time during the application. If the personnel think the project will probably exceed the average duration, it should be noted and accelerated. Redundant loops are among the most critical factors in extending the average time. The personnel also should avoid these loops while executing the project activities.

E. Act

Performance management and reporting are made considering the KPIs as mentioned earlier. In the process, there are two self-loops for the activities “Re-edited” and “Sending reviewer”. Editing loop (Waiting for re-edited, Re-edited), revision loop (Requesting revision, Approving revision, Receiving revision) and revision from reviewers’ loop (Requesting revision, Approving revision, Receiving revision, Sending reviewer) are the loops that existed in the process. Therefore, the number of loops and self-loops is five. For example, decreasing KPI 1 may be possible by eliminating the self-loop “Re-edited”.

Deviations from the ideal process also show unnecessary waiting time in the process. The total duration of unnecessary waiting time in the process is 17 days. For example, applications that do not need an edition directly go to “Project review” activity. However, these projects wait for the other projects that need editions for the “Project review”. It means that there is an unnecessary waiting time of about six days.

V. CONCLUSION AND DISCUSSION

Along with digital transformation, digital technologies and data-oriented methodologies also serve smart campuses. This study aims to analyze project application processes by the proposed process mining methodology related to the smart university. Process mining was applied in the Coordinatorship of Scientific Research Projects at Izmir Bakircay University.

First of all, this study suggests that non-digital processes should be digitized first as soon as possible. Then many data-based methods can be applicable, such as process mining, data mining and machine learning.

Preventing or reducing procedural correction is an important issue. As a more general preventive action, the parts controlled by BAPK personnel can be prepared as a stimulant in the digital environment if possible. If not, a checklist can reduce the cycle time by an average of 13.5 days (12% of current cycle time).

Another point that will improve the process is reducing the revisions required by reviewers for the second time, which occurred 15.6% of applications. Because sending reviewers requires 26 days on average, more than one “Sending reviewer” activity should be occurred just one.

Although it is expected that after the “Project accepted” activity, the “Signing an agreement” activity should not be too long, 55.4 days lasted to start the project officially. Project coordinators should be reminded to sign an agreement once a week, or due date of less than 30 days can be defined and declared to applicants.

Some processes have digitizing and automating convenience. Future studies can investigate whether the process is reasonable for robotic process automation (RPA). If it is sensible, RPA can reduce cycle time and cost.

REFERENCES

- [1] Ahmed, V., Abu Alnaaj, K., & Saboor, S. (2020). An investigation into stakeholders’ perception of smart campus criteria: the American university of Sharjah as a case study. *Sustainability*, 12(12), 1-24.
- [2] Barba-Sánchez, V., Arias-Antúnez, E., & Orozco-Barbosa, L. (2019). Smart cities as a source for entrepreneurial opportunities: Evidence for Spain. *Technological Forecasting and Social Change*, 148(2019), 1-10.
- [3] Kondepudi, S. N., Ramanarayanan, V., Jain, A., Singh, G. N., Nitin Agarwal, N. K., Kumar, R., ... & Gemma, P. (2014). Smart sustainable cities analysis of definitions. *The ITU-T focus group for smart sustainable cities*.
- [4] Richter, C., Kraus, S., & Syrjä, P. (2015). The Smart City as an opportunity for entrepreneurship. *International Journal of Entrepreneurial Venturing*, 7(3), 211-226.
- [5] Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., & Meijers, E. (2007). City-ranking of European medium-sized cities. *Cent. Reg. Sci. Vienna UT*, 9(1), 1-12.

- [6] Hollands, R. G. (2020). *Will The Real Smart City Please Stand Up? Intelligent, Progressive or Entrepreneurial? The Routledge Companion to Smart Cities 1st ed.* Routledge, 179-199.
- [7] Bakıcı, T., Almirall, E., & Wareham, J. (2013). A smart city initiative: the case of Barcelona. *Journal Of the Knowledge Economy*, 4(2), 135-148.
- [8] Huang, L. S., Su, J. Y., & Pao, T. L. (2019). A context aware smart classroom architecture for smart campuses. *Applied Sciences*, 9(9), 1837.
- [9] Aldowah, H., Rehman, S. U., Ghazal, S., & Umar, I. N. (2017). Internet Of Things in Higher Education: A Study on Future Learning. *The 6th International Conference on Computer Science and Computational Mathematics (ICCSCM 2017)*. 4-5 May 2017, Malaysia, 1-10.
- [10] Muhamad, W., Kurniawan, N. B., & Yazid, S. (2017). Smart Campus Features, Technologies, And Applications: A Systematic Literature Review. *International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*. 23-24 October, Bandung, 384-391.
- [11] Pagliaro, F., Mattoni, B., Gugliermenti, F., Bisegna, F., Azzaro, B., Tomei, F., & Catucci, S. (2016, June). A Roadmap Toward the Development of Sapienza Smart Campus. In *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 7-10 June, Florence, 1-6.
- [12] Huang, C. (2017, December). On Study of Building Smart Campus under Conditions of Cloud Computing And Internet of Things. *1st International Global on Renewable Energy and Development (IGRED 2017)*, 22-25 December, Singapore, 1-6.
- [13] Lane, J. E., & Finsel, B. A. (2014). *Fostering Smarter Colleges and Universities. Building A Smarter University: Big Data, Innovation, and Analytics*, Sunny Press, New York 3-26.
- [14] Tan, H., Chen, S., Shi, Q., & Wang, L. (2014). Development of green campus in China. *Journal of Cleaner Production*, 64, 646-653.
- [15] Ng, J. W., Azarmi, N., Leida, M., Saffre, F., Afzal, A., & Yoo, P. D. (2010). The Intelligent Campus (Icampus): End-To-End Learning Lifecycle of a Knowledge Ecosystem. *Sixth International Conference on Intelligent Environments*, 19-21 July 2010, Malaysia, 332-337.
- [16] Hirsch, B., & Ng, J. W. (2011). Education Beyond the Cloud: Anytime-Anywhere Learning in A Smart Campus Environment. *International Conference for Internet Technology and Secured Transactions*, 11-14 December, Abu Dhabi, 718-723.
- [17] Fantinato, M., Gimenes, I. M. D. S., & de Toledo, M. B. F. (2009). *Product Line in The Business Process Management Domain. In Applied Software Product Line Engineering*, Auerbach Publications, New York, 519-552.
- [18] Reinkemeyer, L. (2020). *Business View: Towards A Digital Enabled Organization. In Process Mining in Action*, Springer, Cham, 197-206.
- [19] Dogan, O. (2020). Discovering customer paths from location data with process mining. *European Journal of Engineering Science and Technology*, 3(1), 139-145.
- [20] Lillig, G. (2020). *Telekom: Process Mining in Shared Services. In Process Mining in Action*, Springer, Cham, 169-178.
- [21] Geyer-Klingenberg, J., Nakladal, J., Baldauf, F., & Veit, F. (2018). Process Mining and Robotic Process Automation: A Perfect Match. *16th International Conference on Business Process Management*, 9-14 September, Sydney, 124-131.
- [22] Dogan, O., & Öztaysi, B. (2018). In-store behavioral analytics technology selection using fuzzy decision making. *Journal of Enterprise Information Management*, 31, 612-630.
- [23] Grisold, T., Mendling, J., Otto, M., & vom Brocke, J. (2020). Adoption, use and management of process mining in practice. *Business Process Management Journal*, 27(2), 369-387.
- [24] Aguirre, S., Parra, C., & Sepúlveda, M. (2017). Methodological proposal for process mining projects. *International Journal of Business Process Integration and Management*, 8(2), 102-113.
- [25] Van Der Aalst, W. M., Reijers, H. A., Weijters, A. J., van Dongen, B. F., De Medeiros, A. A., Song, M., & Verbeek, H. M. W. (2007). Business process mining: An industrial application. *Information Systems*, 32(5), 713-732.
- [26] Dogan, O., & Gurcan, O. F. (2022). *Applications Of Big Data and Green Iot-Enabling Technologies For Smart Cities. In Research Anthology on Big Data Analytics, Architectures, And Applications*, IGI Global, 1090-1109.
- [27] Coccoli, M., Guercio, A., Maresca, P., & Stanganelli, L. (2014). Smarter universities: A vision for the fast-changing digital era. *Journal of Visual Languages & Computing*, 25(6), 1003-1011.

- [28] Liu, M., & Li, L. (2018). The Construction of Smart Campus In Universities And The Practical Innovation Of Student Work. *2018 International Conference on Information Management & Management Science (IMMS2018)*, 25-27 August, China, 154-157.
- [29] Lin, Y. B., Chen, L. K., Shieh, M. Z., Lin, Y. W., & Yen, T. H. (2018). CampusTalk: IoT devices and their interesting features on campus applications. *IEEE Access*, 6, 26036-26046.
- [30] Alvarez-Campana, M., López, G., Vázquez, E., Villagrà, V. A., & Berrocal, J. (2017). Smart CEI moncloa: An iot-based platform for people flow and environmental monitoring on a Smart University Campus. *Sensors*, 17(12), 2856.
- [31] Chieochan, O., Saokaew, A., & Boonchieng, E. (2017). IOT For Smart Farm: A Case Study of The Lingzhi Mushroom Farm at Maejo University. *14th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, 12-14 July, Thailand, 1-6.
- [32] Jain, M., Kaushik, N., & Jayavel, K. (2017). Building Automation and Energy Control Using Iot-Smart Campus. *2nd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCCT)*, 23-24 February, India, 353-359.
- [33] Xiao, J. (2019). Digital transformation in higher education: critiquing the five-year development plans (2016-2020) of 75 Chinese universities. *Distance Education*, 40(4), 515-533.
- [34] Flavin, M. (2016). Disruptive conduct: the impact of disruptive technologies on social relations in higher education. *Innovations in Education and Teaching International*, 53(1), 3-15.
- [35] T. Shakib (2006). *Cisco Digital Ceiling: Enhanced Learning Through Technology and Digitization*. <https://blogs.cisco.com/digital/cisco-digital-ceiling-enhanced-learning-through-technology-and-digitization>, (28 July 2022).
- [36] Romero, C., Cerezo, R., Bogarín, A., & Sánchez- Santillán, M. (2016). *Educational Process Mining: A Tutorial and Case Study Using Moodle Data Sets*. *Data Mining and Learning Analytics: Applications In Educational Research*, Wiley, 1-28.
- [37] A. Sypsas & K. Dimitris (2022). Reviewing process mining applications and techniques in education, *International Journal of Artificial Intelligence and Applications* 13(2022) 83–102.
- [38] Trcka, N., & Pechenizkiy, M. (2009). From Local Patterns to Global Models: Towards Domain Driven Educational Process Mining. *Ninth international conference on intelligent systems design and applications*, 30 November- 02 December, Pisa, 1114-1119.
- [39] Bogarín, A., Romero, C., Cerezo, R., & Sánchez-Santillán, M. (2014). Clustering For Improving Educational Process Mining. *Fourth International Conference on Learning Analytics and Knowledge*, 24-28 March, USA, 11-15.
- [40] Ayutaya, N. S. N., Palungsuntikul, P., & Premchaiswadi, W. (2012). Heuristic Mining: Adaptive Process Simplification in Education. *Tenth International Conference on ICT And Knowledge Engineering* 21-23 November, Thailand, 221-227.
- [41] Etinger, D., Orehovački, T., & Babić, S. (2018). Applying Process Mining Techniques to Learning Management Systems for Educational Process Model Discovery and Analysis. *International Conference on Intelligent Human Systems Integration*, Springer, Cham, 420-425.
- [42] Etinger, D. (2020). Discovering And Mapping LMS Course Usage Patterns to Learning Outcomes. In *International Conference on Intelligent Human Systems Integration*, Springer, Cham, 486-491.
- [43] Doleck, T., Basnet, R. B., Poitras, E. G., & Lajoie, S. P. (2015). Mining learner–system interaction data: implications for modeling learner behaviors and improving overlay models. *Journal of Computers in Education*, 2(4), 421-447.
- [44] Deeva, G., & Weerd, J. D. (2018). Understanding Automated Feedback in Learning Processes By Mining Local Patterns. In *International Conference on Business Process Management*, Springer, Cham, 56-68.
- [45] Ramaswami, G., Susnjak, T., Mathrani, A., Lim, J., & Garcia, P. (2019). Using educational data mining techniques to increase the prediction accuracy of student academic performance. *Information and Learning Sciences*, 120(7/8), 451-467.
- [46] Dolak, R. (2019). Using process mining techniques to discover student’s activities, navigation paths, and behavior in LMS Moodle. *International Conference on Innovative Technologies and Learning (ICTL '19)*, 2-5 December, Norway, 129-138.
- [47] Salazar-Fernandez, J. P., Sepúlveda, M., Muñoz-Gama, J., & Nussbaum, M. (2021). Curricular analytics to characterize educational trajectories in high-failure rate courses that lead to late dropout. *Applied Sciences*, 11(4), 1436.

- [48] Downes, S., & Campbell, C. (2018, March). Smart University Utilising the Concept of the Internet of Things (IOT). *UKSim-AMSS 20th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)*, 27-29 March, UK, 145-150.
- [49] Bagdasarian, I. S., Stupina, A. A., Goryacheva, O. E., & Shmeleva, Z. N. (2020). The University Digital Transformation as A Tool for Human Capital Development. *1st International Scientific Conference*, 8-9 October, Russian Federation, 1-5.
- [50] Pham, T. V., Nguyen, A. T. T., Ngo, T. D., Le, D. H., Le, K. C., Nguyen, T. H., & Le, H. Q. (2020). Proposed Smart University Model as A Sustainable Living Lab for University Digital Transformation. *5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 27-28 November, Vietnam, 472-479. IEEE.
- [51] Alexander, N., Olga, V., Anna, G., Yana, M., & Andrey, V. (2021). The managing the University Digital Transformation based on Big Data. *International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 20-24 September, Russian Federation, 1-5.
- [52] Giang, N. T. H., Hai, P. T. T., Tu, N. T. T., & Tan, P. X. (2021). Exploring the readiness for digital transformation in a higher education institution towards industrial revolution 4.0. *International Journal of Engineering Pedagogy*, 11(2), 4-24.
- [53] Han, K. H., Hwang, B., & Jeon, J. (2015). A navigation pattern analysis of university department's websites using a processing mining approach. *Innovations in Education and Teaching International*, 52(5), 485-498.
- [54] Cameranesi, M., Diamantini, C., Genga, L., & Potena, D. (2017). Students' Careers Analysis: A Process Mining Approach. *7th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics*, 19 – 22 June, Italy, 1-7.
- [55] Uzir, N. A. A., Gašević, D., Jovanović, J., Matcha, W., Lim, L. A., & Fudge, A. (2020). Analytics of Time Management and Learning Strategies for Effective Online Learning in Blended Environments. *Tenth International Conference on Learning Analytics & Knowledge*, 23-27 March, Cyberspace, 392-401.
- [56] Davis, S. K., & Hadwin, A. F. (2021). Exploring differences in psychological well-being and self-regulated learning in university student success. *Frontline Learning Research*, 9(1), 30-43.
- [57] Kostepen, Z. N., Akkol, E., Dogan, O., Bitim, S., & Hiziroglu, A. (2020). A Framework for Sustainable and Data-driven Smart Campus. *22nd International Conference on Enterprise Information Systems*, 5-7 May, 746-753.
- [58] Dogan, O., Bitim, S., & Hiziroglu, K. (2021). A v-model software development application for sustainable and smart campus analytics domain. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 4(1), 111-119.

Araştırma Makalesi - Research Article

Aktif Tabakaya Ag Nanopartikül Katkısının Organik Güneş Hücrelerinin Fotovoltaik Verimine Etkisi

The Effect of Ag Nanoparticle Doping to Active Layer on Photovoltaic Efficiency of Organic Solar Cell

Semih Yurtdaş^{1*}, Muhittin Ünal², Cem Tozlu³

Geliş / Received: 23/08/2022

Revize / Revised: 02/11/2022

Kabul / Accepted: 29/11/2022

ÖZ

Organik güneş hücreleri alternatif enerji kaynaklarından bir tanesidir. Bu teknolojinin ticarileşebilmesinin önündeki tek engel düşük verimlilik değerleridir. Bu çalışmada evrik yapıdaki organik güneş hücrelerinin verimi Ag nanopartiküllerin (np) plazmonik etkilerinden yararlanarak artırılmıştır. Aygıt konfigürasyonu ITO/ZnO/poli(3-hekziltiofen-2,5-diil) (P3HT): (6,6)-fenil C61 bütirik asit metil ester (PCBM)/MoO₃/Ag şeklindedir. Ag np'ler poliol yöntemi ile sentezlenmiş ve X-Işını difraktometresi (XRD) UV-Vis spektrofotometre ve alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopu (FESEM) ile karakterize edilmiştir. Daha sonrasında Ag, kütlece %0,125-0,25-0,5 oranlarında P3HT:PCBM'e katılmıştır. Referans hücrede verim değeri %3,21 iken %0,25 Ag katkılı aygıtta yaklaşık %7'lik bir verim artışı ile %3,43 değerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Ag, Organik Güneş Hücreleri, Katılama

ABSTRACT

Organic solar cells are one of the alternative energy sources. The only barrier to commercialization of this technology is its low efficiency values. In this study, the efficiency of inverted organic solar cells was increased by utilizing the plasmonic effects of Ag nanoparticles (np). The device configuration is ITO/ZnO/poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT):(6,6)-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM)/MoO₃/Ag. Ag np's were synthesized by polyol method and characterized by X-Ray diffractometry (XRD), Uv-Vis spectrophotometer and field emission scanning electron microscopy (FESEM). Afterwards, Ag was added to P3HT:PCBM at the ratios of 0.125-0.25-0.5% by mass. While the efficiency value was 3.21% in the reference cell, it reached 3.43% with an increase of approximately 7% in the 0.25% Ag added device.

Keywords- Ag, Organic Solar Cells, Doping

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: syurtdas@kmu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5556-2196>)

²İletişim: muhittinnunal@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2431-6870>)

³İletişim: cem.tozlu@ikcu.com (<https://orcid.org/0000-0003-4192-5512>)

¹Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir, Türkiye

I. GİRİŞ

Geçmişten günümüze dünyadaki enerji ihtiyacı artış eğilimindedir. Artan nüfus ve enerji ihtiyacını karşılamak toplumun yaşadığı en büyük zorluklardan birisidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, tüketilemez bir enerji kaynağı olduğu için bu ihtiyacı karşılama potansiyeline sahiptir.

Güneşten gelen foton enerjisini doğrudan elektrige çeviren aygıtlara fotovoltaik güneş hücresi adı verilmektedir. Fotovoltaik güneş hücreleri arasında ise en yaygın olarak kullanılan silisyum tabanlı güneş hücreleridir.

Dünya genelinde fotovoltaik üretiminde kristal silisyum güneş hücreleri büyük bir paya sahiptir [1]. Ancak silisyum tabanlı güneş hücrelerinde hammadde ve üretim süreci yüksek maliyetlere sahiptir. Bu sorunun önüne geçmek için silisyum tabanlı güneş hücrelerine alternatif olarak ince film, boya duyarlı, organik ve perovskit güneş hücreleri gibi yeni nesil güneş hücreleri araştırılmaktadır [2-5].

Perovskit güneş hücreleri diğer yeni nesil güneş hücreleri arasında en yüksek verime sahip olsa da neme karşı hassastır ve düşük kararlılığa sahiptir [6]. Boya duyarlı güneş hücrelerinde redoks tepkimesinin ana bileşeni olan sıvı elektrolitin uçucu olması ve soğurucu tabaka olan boyanın kimyasal yapısını bozduğu için stabil bir yapısı yoktur [7]. Şimdiye kadar silisyum tabanlı güneş hücrelerine alternatif olarak en iyi aday, daha düşük maliyet, uzun vadede stabil olması gibi özellikler ile organik güneş hücreleridir. Ayrıca esnek yüzeylere uygulanabilir olması, çözelti metodu ile basitçe hazırlanabilmesi, düşük maliyete sahip olması ve düşük sıcaklıklarda üretilmesi gibi artılarıyla da iyi bir alternatiftir [8-11]. Fakat organik güneş hücrelerinin verimi, silisyum tabanlı güneş hücrelerine göre nispeten düşüktür. Bu durumun en temel nedeni ise organik yarı iletkenlerin yük taşıyıcı mobilitesinin düşük olmasıdır [12]. Mobilitenin düşük olması da organik aktif tabakanın kalınlığını sınırlandırır ve düşük optiksel absorpsiyon ile sonuçlanır [13]. Bu nedenle organik yarı iletkenlerin absorpsiyonunun artırılması bir problem olmaya devam etmektedir. Stuart ve Hall bir fotodedektör çalışmasında Ag nanopartikül (np) kullanarak fotoakımı yaklaşık 20 kat arttırarak bu problemin çözümünde ilk adımı atmışlardır. Bu sonuçlar metal np'lerin lokalize yüzey plazmonik etki ile ışığı dağıtabildiğinin bir göstergesidir [14]. Np'lerin boyutu, şekli ve türü ışığın dağılmasında önemli bir role sahiptir. Au ve Ag metal np'ler bunlar arasında en önemlileridir [15-16]. Literatür incelendiğinde organik güneş hücrelerinde metal np'ler ışık tutucu/dağıtıcı olarak uygulanarak optik absorpsiyon özelliklerinin geliştirildiği görülmüştür. Örneğin; ITO/poli(3-4-etilen dioksitiyofen):poli(stirensülfoat) (PEDOT:PSS)/Ag np:P₃HT:PCBM/Al konfigürasyonuna sahip geleneksel yapıdaki bir güneş hücresinde kullanılan Ag np ile verim değeri %3,3'den %3,4'e yükselmiştir [17]. 10 nm boyuta sahip Au np kullanılan geleneksel yapıdaki çalışmada akım yoğunluğu (J_{sc}) değeri 8,27 mA/cm²'den 9,86 mA/cm²'ye yükselmiştir [18]. 14 nm boyuta sahip Au np ile yapılan ITO/ZnO/P3HT:PCBM:Au np/Ag konfigürasyonuna sahip devrik yapıdaki bir çalışmada J_{sc} değeri 7,23 mA/cm²'den 8,71 mA/cm² değerine artış gösterirken verim değeri ise %1,95'ten %2,44'e çıkmıştır [19].

Bu çalışmada kullanılan aygıt yapısı, evrik yapı diye adlandırılan elektron taşıyıcı tabakanın aktif tabakanın altında, boşluk taşıyıcı tabakanın ise aktif tabakanın üstünde olduğu yapıdır. Ters durumun geçerli olduğu yapılar geleneksel yapıdaki organik güneş hücreleri adı verilir. Geleneksel yapıdaki aygıtlarda boşluk taşıyıcı tabaka olarak sıklıkla PEDOT:PSS, üst kontak olarak ise Ca ve Al gibi metaller kullanılmaktadır [20-21]. Gerek PEDOT:PSS'in asidik yapısı [22], gerekse Ca ve Al'un düşük iş fonksiyonundan [23] dolayı O₂ ile kolayca yükseltgenbilmeleri aygıtların uzun vadede kararlılıklarını olumsuz yönde etkilemektedirler. Bu sorunların üzerinden gelmek için evrik yapıdaki güneş hücreleri geliştirilmiştir.

Bu çalışmada evrik yapıdaki organik güneş hücresinin foton soğurucu tabakası olan P3HT:PCBM'e Ag np katılarak, aygıtın fotovoltaik parametreleri incelenmiştir.

II. MATERYAL METOD

A. Materyal

Gerekli tüm kimyasallar herhangi bir saflaştırma işlemine tabi tutulmadan kullanılmıştır. Alt taş olarak kullanılan, indiyum katkı kalay oksit (ITO) kaplı camlar Kintech firmasından temin edilmiştir. Elektron taşıyıcı olarak kullanılacak olan ZnO sentezi için Zn(CH₃COO)₂.2H₂O (%98-101) ve 2-Metoksietanol Alfa Aesar, mono etanol amin (MEA) (%99,5) ise Aldrich firmasından alınmıştır. Aktif tabakayı oluşturan poli(3-hekziltiofen-2,5-diil) (P3HT) (%93) ve (6,6)-fenil C61 bütirik asit metil ester (PCBM) (%99,5) Lum-Tech. firmasından temin

edilmiştir. Boşluk taşıyıcı tabakasını oluşturan MoO₃ (%99,8) Sigma-Aldrich, üst kontak olan Ag (%99,9) ise Alfa Aesar firmasından sağlanmıştır.

B. Metod

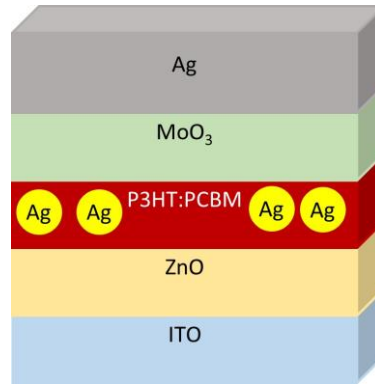
ZnO sentezi için öncelikle çinko asetat dihidrat 2-metoksi etanol içerisinde eklenir ve sıcaklık uygulanarak karıştırılır. Ardından MEA eklenir. MEA ve çinko asetat dihidrat molar oranları 1:1 tutulur. 60 °C sıcaklıkta 2 sa karıştırıldıktan sonra reaksiyon bitirilir ve 1 gün yaşlandırılır. ITO yüzeyi üzerine 2000 rpm hızında 30 sn süresince döner kaplama sistemi yardımı ile kaplanır. 150 °C sıcaklıkta 30 dakika tavlama yapılır [24].

Aktif tabakaya katılacak olan Ag np'ler poliol yöntemine göre sentezlenmiştir [25].

Aygıtların aktif tabakasını oluşturan P3HT:PCBM karışımı klorobenzen içerisinde ağırlıkça 1:1 oranlarında karıştırılarak hazırlanır. Ag np katkısı ise kütlece %0,125-0,25-0,5 oranlarında olacak şekilde eklenir. Katkılı veya katkısız aktif tabakalar inert atmosfer içerisinde, ZnO kaplanmış filmlerin üzerine 1250 rpm'de 40 sn boyunca döner kaplama sistemi yardımı ile kaplanır. 120 °C sıcaklıkta 25 dakika tavlama yapılır.

MoO₃ ve Ag, fiziksel buhar biriktirme cihazında yaklaşık 10⁻⁶ torr basınçta sırasıyla 8 ve 80 nm kalınlıklarında kaplanarak aygıtlar oluşturulur. Üretilen aygıtların aktif alanı 0,07 cm²'dir.

Elde edilen aygıtın şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



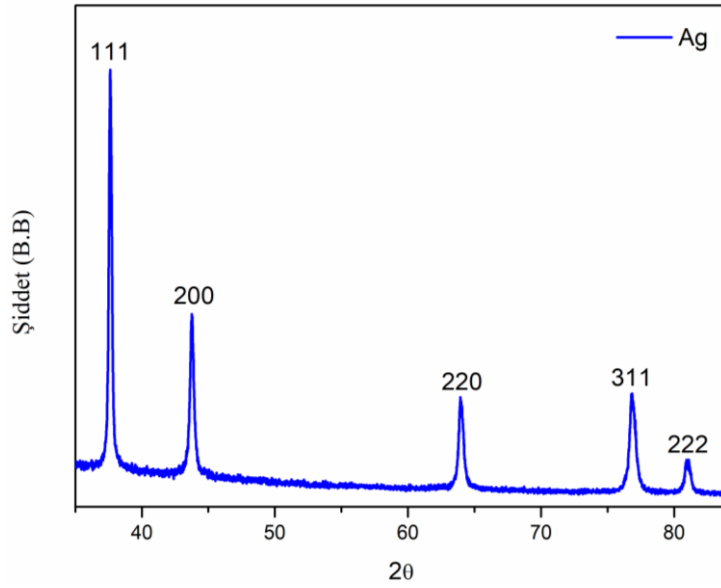
Şekil 1. Aygıtın Şematik Gösterimi

C. Karakterizasyon

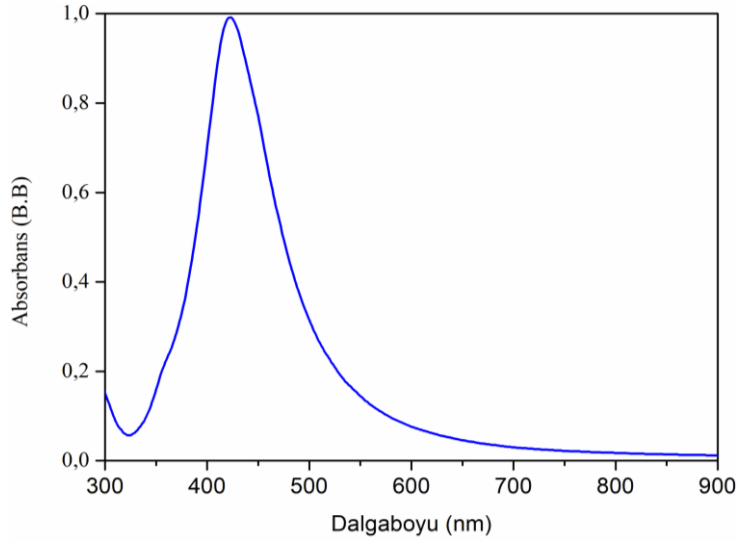
Sentezlenen Ag np'ler UV-Vis spektrofotometre (Hach DR5000), X-Işını difraktometresi (XRD) (Bruker D8 Advance), ve alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) (Hitachi SU-5000) ile karakterize edilmiştir. Yapılan aygıtların elektriksel parametreleri güneş simülatörü (1000 W, OAİ Trisol Sınıf AAA) ve akım-gerilim kaynak ölçer cihazı (Keithley 2400) ile belirlenmiştir. Ölçümler; 100 mW/cm², A.M 1,5 G ve oda sıcaklığı koşullarında glovebox içerisinde alınmıştır. Üretilen aygıtların elektriksel parametreleri Tablo 1'de ve J-V grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.

III. SONUÇLAR

Sentezlenen Ag np'lerin arzu edilen kristal yapıda olup olmadıklarını belirlemek için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kırınım deseni Şekil 2'de verilmiş olup sonuç incelendiğinde 01-087-0720 PDF kart numarasına sahip kübik kristal yapısındaki Ag ile iyi bir şekilde eşleştiği belirlenmiştir. Kırınım deseninde belirlenen pikler 38,2, 44,4, 64,6, 77,6 ve 81,7 derecelerinde oluşmuş olup hkl Miller indisleri sırasıyla 111, 200, 220, 311 ve 222 şeklindedir.

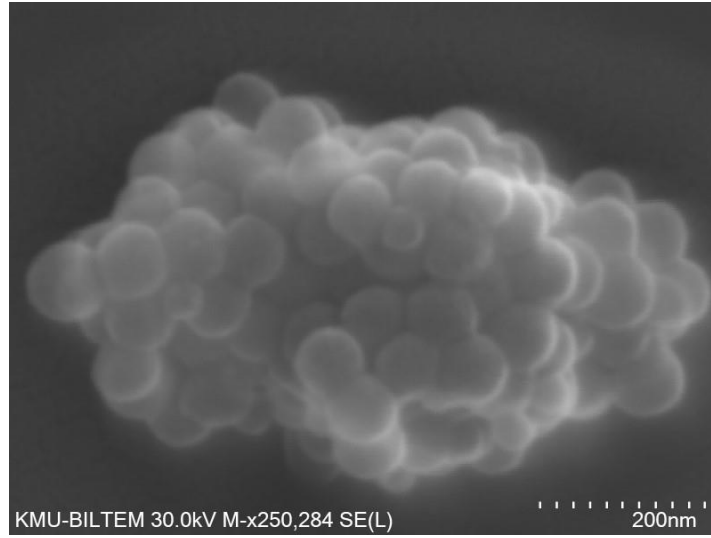


Şekil 2. Ag Np'lerin XRD Sonucu



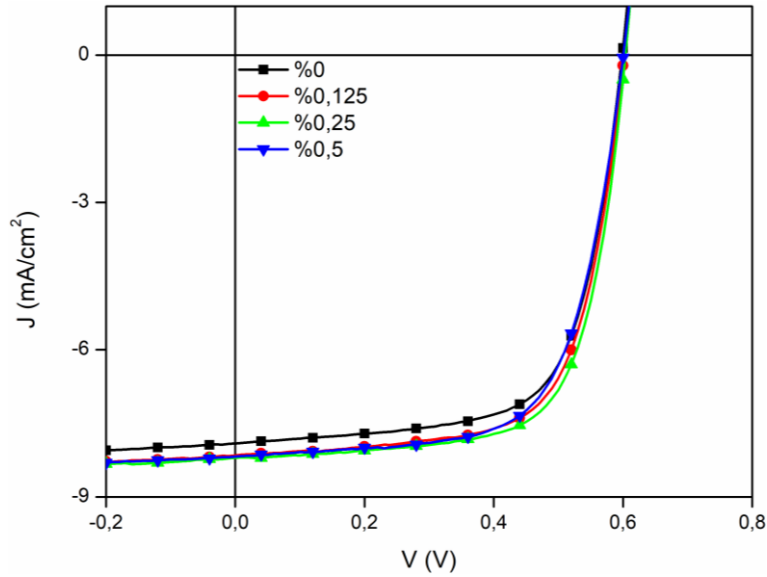
Şekil 3. Ag Np'lerin Absorbans-Dalgaboyu Grafiği

Arzu edilen kristal yapıda sentezlenebildiği belirlenen Ag np'lerin 300-900 nm dalga boyu aralığında absorpsiyon ölçümü gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde Ag np'lerin 422 nm civarında bir absorpsiyon piki sergilediği görülmektedir. Literatür incelendiğinde 420 nm civarında absorpsiyon piki veren Ag np'lerin boyutunun yaklaşık olarak 50 nm olduğu bildirilmiştir [26]. Hem bu boyuttan emin olmak hem de partiküllerin şekli hakkında bilgi sahibi olmak için FESEM analizi gerçekleştirilmiştir. FESEM görüntüsü Şekil 4'te verilmiş olup, yaklaşık 50 nm çapına sahip küresel şekilde np'ler sentezlendiği tespit edilmiştir. Böylece plazmonik etkilerinden yararlanabileceğimiz fiziksel özelliklere sahip np'ler elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 4. Ag Np'lerin FESEM Görüntüsü

Arzu edilen kristal yapıda, geometride ve boyutta sentezlenebildiği belirlenen Ag np'ler ile aktif tabakaya kütlece farklı oranlarda katkılama yapılarak aygıtlar üretilmiştir.



Şekil 5. Üretilen Aygıtların J-V Grafikleri

Tablo 1 incelendiğinde Ag np katkısı içermeyen referans aygıtta akım yoğunluğu değerinin 7,91 mA/cm² olduğu, verim değerinin ise %3,21 olduğu görülmektedir. Tüm aygıtlarda görülen 600 mV'luk açık devre gerilim (V_{oc}) değeri P3HT:PCBM kullanılan hücrelerde ideal bir değerdir [27]. Dolum faktörü (FF) aygıtın ideallığının bir ölçüsüdür. P3HT:PCBM kullanılan hücrelerde tecrübelerimize göre %60-70 arası FF değeri başarılı aygıtların üretildiğinin göstergesidir. Daha düşük bir FF ölçümü elde edildiyse hücrede iğne deliği adı verilen bazı kusurların çokluğundan veya yapıda oluşan başka birtakım olumsuzluklardan bahsedilebilir. Aktif tabakaya Ag np katkılı olduğunda plazmonik etkilerden dolayı beklenildiği üzere verim artışı sağlanmıştır. Katkı miktarı olarak kütlece %0,125-0,25-0,5 denenmiş ve sırasıyla %3,34-3,43-3,27 verim değerleri elde edilmiştir. Akım yoğunlukları ise %0,125-0,25-0,5 katkılı aygıtlar için sırasıyla 8,16-8,20-8,17 mA/cm² olarak bulunmuştur. Her ne kadar tüm aygıtlarda referans hücreye göre daha yüksek akım yoğunluğu ve verim elde edilmiş olsa da en yüksek verime %0,25 katkı miktarı ile ulaşılmıştır. %0,25 katkı miktarından sonra verim değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak katkı miktarı arttıkça yapıda Ag np kümelenmelerinin artabileceği ve P3HT:PCBM yapısında bozukluklara sebep olabileceği ön görülmüştür. %0,25 ile %0,5 katkılı

aygıtların FF değerleri kendi aralarında karşılaştırıldığında katkı miktarı arttığında aygıtların ideallikten uzaklaştığı görülmektedir.

Tablo 1. Üretilen aygıtların elektriksel parametreleri

Ag Katkı Miktarı	Elektriksel Parametreler			
	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF (%)	η (%)
%0	7,91	600	67,6	3,21
%0,125	8,16	600	68,2	3,34
%0,25	8,20	600	69,8	3,43
%0,5	8,17	600	66,8	3,27

IV. SONUÇ VE TARTIŞMA

Poliol yöntemi ile sentezlenen Ag np'lerin XRD, UV-Vis ve FESEM ile karakterize edildikten sonra arzu edilen kristal yapı, geometri ve boyutlarda sentezlenebildiği belirlenmiştir. Yaklaşık 50 nm boyutlarında küresel şekildeki kübik kristal yapısına sahip Ag np'ler ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO₃/Ag yapısındaki evrik güneş hücrelerinin aktif tabakasına kütülecce %0,125-0,25-0,5 olacak şekilde katılanmıştır. Plazmonik etkilerden dolayı akım yoğunluğunda artış görülmüş ve en yüksek verime %0,25 katkılı aygıtta ulaşılmıştır. Akım yoğunluğu değeri 7,91 mA/cm²'den 8,20 mA/cm² değerine, verim değeri ise yaklaşık %7'lik bir artış ile %3,21'den %3,43'e çıkmıştır. İleriki çalışmalarda P3HT:PCBM yerine daha yüksek verim elde edilebilen donör ve akseptör çiftleri kullanılarak ticarileşme açısından daha rekabetçi aygıtlar üretilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Shin, D. Y., Lim, J. R., Shin, W. G., Lee, C. G. & Kang, G. H. (2021). Layup-Only Modulization for Low-Stress Fabrication of a Silicon Solar Module with 100 µm Thin Silicon Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 221, 110903.
- [2] Aberle, A. G. (2009). Thin-Film Solar Cells. *Thin Solid Films*, 517, 4706-4710.
- [3] Cho, E. J., Cha, J. K., Fu, G., Cho, H. S., Lee, H. W. & Kim, S. H. (2022). Selective Sensitization Strategy for High-Performance Panchromatic Dye-Sensitized Solar Cells Incorporated with Ruthenium-Based Double Dye. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 115, 272-278.
- [4] Liao, X., Li, Q., Ye, J., Li, Z., Ren, J., Zhang, K., Xu, Y., Cai, Y. P., Liu, S. & Huang, F. (2023). Solid-Liquid Convertible Fluorinated Terthiophene as Additives in Mediating Morphology and Performance of Organic Solar Cells. *Chemical Engineering Journal*, 453, 139489.
- [5] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y. & Miyasaka, T. (2009). Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of The American Chemical Society Communications*, 131, 6050-6051.
- [6] Raman, R. K., Thangavelu, S. A. G., Venkataraj, S. & Krishnamoorthy, A. (2021) Materials, Methods and Strategies for Encapsulation of Perovskite Solar Cells: From Past to Present. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111608.
- [7] Wu, J., Lan, Z., Lin, J., Huang, M., Huang, Y., Fan, L. & Luo, G. (2015). Electrolytes in Dye-Sensitized Solar Cells. *Chemical Reviews*, 115 (5), 2136-2173.
- [8] Fukuda, K., Yu, K. & Someya, T. (2020). The Future of Flexible Organic Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 2000765, 1-10.
- [9] Brabec, J. C. & Durrant, R. J. (2008). Solution-Processed Organic Solar Cells. *MRS Bulletin*, 33, 670-675.
- [10] Zilberberg, K., Gharbi, H., Behrendt, A., Trost, S. & Riedl, T. (2012). Low-Temperature, Solution Processed MoO_x for Efficient and Stable Organic Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4, 1164-1168.
- [11] Seo, J. H., Um, H. D., Shukla, A., Hwang, I., Park, J., Kang, Y. C., Kim, C. S., Song, M. & Seo, K. (2015). Low Temperature Solution-Processed Flexible Organic Solar Cells with PFN/AgNWs Cathode. *Nano Energy*, 16, 122-129.
- [12] Mandoc, M. M., Koster, L. J. & Blom P. W. (2007). Optimum Charge Carrier Mobility in Organic Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 133504 (90), 1-3.
- [13] Atwater, H. A. & Polman, A. (2010). Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices. *Nature Materials*, 9, 205-213.

- [14] Stuart, H. R. & Hall, D. G. (1998). Island Size Effects in Nanoparticle-Enhanced Photodetectors. *Applied Physics Letters*, 73, 3815-3817.
- [15] Liang, A., Liu, Q., Wen, G. & Jiang, Z. (2012). The Surface-Plasmon-Resonance Effect of Nanogold/Silver and its Analytical Applications. *Trends in Analytical Chemistry*, 37, 32-47.
- [16] Fan, X., Zheng, W. & Singh, D. J. (2014). Light Scattering and Surface Plasmons on Small Spherical Particles. *Light: Science & Applications*, 3, 1-14.
- [17] Xue, M., Li, L., Villers, B. J. T. D., Shen, H., Zhu, J., Yu, Z., Stieg, A. Z., Pei, Q., Schwartz, B. J. & Wang, K. L. (2011). Charge-Carrier Dynamics in Hybrid Plasmonic Organic Solar Cells with Ag Nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 98 (253302), 1-3.
- [18] Paci, B., Genorosi, A., Albertini, V. R., Spyropoulos, G. D., Stratakis, E. & Kymakis, E. (2012). Enhancement of Photo/Thermal Stability of Organic Bulk Heterojunction Photovoltaic Devices via Gold Nanoparticles Doping of the Active Layer. *Nanoscale*, 4, 7453-7459.
- [19] Huang, Y. F., Zhang, Z. L., Kang, K. B., Zhao, M., Wen, T., Liu Y. X., Zhai, X. P., Lv, S. K., Wang, Q., Qiu, W. Y. & Qiu, D. (2013). Mitigation of Metal-Mediated Losses by Coating Au Nanoparticles with Dielectric Layer in Plasmonic Solar Cells. *RSC Advances*, 3, 16080-16088.
- [20] Li, G., Shrotriya, V., Huang, J., Yao, Y., Moriarty, T., Emery, K. & Yang, Y. (2005). High-Efficiency Solution Processable Polymer Photovoltaic Cells by Self-Organization of Polymer Blends. *Nature Materials*, 4, 864-868.
- [21] Erray, M., Hanine, M. & El Amrani, A. (2020). Study of P-Type Doping Effect on P3HT: ICBA Based Organic Photovoltaic Solar Cell Performance. *Optik*, 202 (163543), 1-7.
- [22] Cameron, J. & Skabara, P. J. (2020). The damaging effects of the acidity in PEDOT:PSS on semiconductor device performance and solutions based on non-acidic alternatives. *Materials Horizons*, 7, 1759-1772.
- [23] Li, J., Guo, C., Bai, Yu., Liu, W., Chen, Y, He, J., Li, D., Yang, X., Qiu, Q., Chen, T., Yu, J., Huang, Y. & Yu, J. (2022). One-Step Formation of Low Work-Function, Transparent and Conductive MgF₂/O₂ Electron Extraction for Silicon Solar Cells. *Advanced Science*, 9, 2202400.
- [24] Liang, Z., Zhang, Q., Wiranwetchayan, O., Xi, J., Yang, Z., Park, K., Li, C. & Cao, G. (2012), Effects of the Morphology of a ZnO Buffer Layer on the Photovoltaic Performance of Inverted Polymer Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 22 (10), 2194-2201.
- [25] Zhao, T., Sun, R., Yu, S., Zhang, Z., Zhou, L., Huang, H. & Du, R. (2010). Size-Controlled Preparation of Silver Nanoparticles by a Modified Polyol Method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 366 (1-3), 197-202.
- [26] Agnihotri, S., Mukherji, S. & Mukherji S. (2014). Size-Controlled Silver Nanoparticles Synthesized over the Range 5–100 nm Using the Same Protocol and their Antibacterial Efficacy. *RSC Advances*, 4, 3974-3983.
- [27] Sun, Y., Cui, C., Wang, H. & Li, Y. (2011). Efficiency Enhancement of Polymer Solar Cells Based on Poly(3-Hexylthiophene)/Indene-C₇₀ Bisadduct via Methylthiophene Additive. *Advanced Energy Materials*, 1, 1058-1061.

Araştırma Makalesi - Research Article

The Efficacy Investigation for Some Markers Detecting Yellow Rust Resistance Genes in Bread Wheat Varieties

Ekmeklik Buğday Çeşitlerinde Sarı Pas Direnç Genlerini Tespit Eden Bazı Markörlerin Etkinliğinin İncelenmesi

Gülçin Akgören Palabıyık^{1*}, İsmail Poyraz²

Geliş / Received: 27/08/2022

Revize / Revised: 30/11/2022

Kabul / Accepted: 01/12/2022

ABSTRACT

Yellow rust is (*Puccinia striiformis* Westend. f. sp. tritici) is among the supreme diseases causing serious losses in wheat production. The chemical fungicides are commonly used in this disease-fighting. However, chemical control is not economical and also causes environmental pollution. Therefore, the use of resistant wheat varieties in production has critical importance. The resistance against yellow rust disease is expressed with *Yr* genes. In the breeding studies, knowing which parents include resistance genes provides a great advantage in the development of new resistant varieties. This study aims to determine the efficiency of markers used to detect resistance genes against yellow rust disease. The efficiency of molecular markers (Xgwm582, RgaYr10a, Xgwm413, Xgwm11, Wmc44, Barc101, Cfa2149, Sun104, Xgwm273) that are identified for nine genes (*Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr26*, *Yr29*, *Yr36*, *Yr48*, *Yr51*, and *YrCH52*) providing resistance against yellow rust disease was investigated using PCR method. Twenty bread wheat varieties were used as material. Resistance gene profiles determined using PCR-based molecular markers and data obtained from registration information and field resistance data in the literature were analysed comparatively. As a result of the analysis, the efficiency/productivity of the markers defined for different resistance genes in detecting the resistance gene profile of wheat varieties was determined. Moreover, resistance gene profiles of varieties that are known resistance states in the field and sensitive varieties were compared. Genes that are prominent in providing resistance and detected with markers were determined and the efficiency of these genes was evaluated according to their homozygous/heterozygous states. It was concluded that the efficacy of markers such as RgaYr10a, Xgwm413, Barc101, and Cfa2149, which gave positive results in all wheat varieties, was low.

Keywords- Yellow Rust, Resistance Genes, Bread Wheat, Molecular Markers, Efficacy

ÖZ

Sarı pas, (*Puccinia striiformis* Westend. f. sp. tritici) buğday üretiminde ciddi kayıplara neden olan en önemli buğday hastalıkları arasında yer almaktadır. Hastalıkla mücadelede kimyasal fungusitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kimyasal mücadele ekonomik olmadığı gibi çevre kirliliğine de neden olmaktadır. Bu sebeple üretimde dayanıklı buğday çeşitlerin kullanılması kritik bir öneme sahiptir. Sarı pas hastalığına karşı dayanıklılık, *Yr* genleri ile ifade edilmektedir. İslah çalışmalarında kullanılacak ebeveynlerin hangi dayanıklılık genine sahip olduğunu bilmek, yeni dirençli çeşitlerin geliştirilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır. Bu çalışma, sarı pas hastalığına karşı direnç genlerinin saptanmasında kullanılan belirteçlerin etkinliğini belirlemeyi

^{1*}Corresponding author contact: gulcin.akgoren@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5354-2346>)

Pharmacy Services Program, Bilecik Seyh Edebali University, Pazaryeri Vocational School, Bilecik, Turkey

²Contact: ismail.poyraz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3651-5885>)

Molecular Biology and Genetics Department, Bilecik Seyh Edebali University, Faculty of Science, Bilecik, Turkey

amaçlamaktadır. PZR yöntemiyle sarı pas hastalığına karşı direnci sağlayan dokuz gen (*Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr26*, *Yr29*, *Yr36*, *Yr48*, *Yr51* ve *YrCH52*) için tanımlanmış moleküler markörlerin (*Xgwm582*, *RgaYr10a*, *Xgwm413*, *Xgwm11*, *Wmc44*, *Barc101*, *Cfa2149*, *Sun104*, *Xgwm273*) etkinliği araştırılmıştır. Materyal olarak, yirmi ekmeçlik buğday çeşidi kullanılmıştır. PCR tabanlı moleküler markörler kullanılarak belirlenen direnç gen profilleri ile tescil bilgisi ve literatürde geçen tarla dayanıklılık verileri karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda farklı direnç genleri için tanımlanmış markörlerin, buğday çeşitlerinin direnç gen profilini tespit etmedeki etkinlik durumları belirlenmiştir. Ayrıca, tarladaki dayanıklılığı bilinen çeşitlerle hassas çeşitlerin direnç gen profilleri karşılaştırılmış, direnci sağlamada öne çıkan ve markörlerle tespit edilen genler belirlenmiş ve bu genlerin homozigot/heterozigot durumlarına göre verimlilikleri değerlendirilmiştir. Tüm buğday çeşitlerinde pozitif sonuç veren *RgaYr10a*, *Xgwm413*, *Barc101* ve *Cfa2149* gibi markörlerin etkinliğinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Sarı Pas, Direnç Genleri, Ekmeçlik Buğday, Moleküler Markörler, Verimlilik*

I. INTRODUCTION

Wheat is among the top three grains in crop production in the World [1, 2]. However, wheat production is limited by biotic and abiotic factors. Wheat yellow rust disease (*Puccinia striiformis* Westend. f. sp. tritici) is one of the most important diseases affecting wheat production negatively. Because the disease limits the area of leaf photosynthesis, significant yield and quality losses occur. Environmental conditions, pathogen virulence, and host genotype affect the severity of yield loss [3]. Bhardwaj et al. [4] reported that the yield loss caused by yellow rust disease can reach over 50%.

Although fungicides are widely used in the disease control, disease-resistant genotypes in crop production should be preferred as an environmentally friendly practice [5-7]. Various breeding methods are applied in the development of resistant varieties. The Cobb scale, which provides information about the host response and the type of infection, is generally used to assess the disease reaction in the traditional breeding method. [8]. However, marker assisted selection (MAS), which is significantly shortened the process of obtaining new resistant varieties, can be used effectively in breeding studies. Molecular markers can determine the linkage of resistance genes with gene and/or gene regions. Plant varieties carrying two or more genes in the homozygous and/or heterozygous states are powerful tools to facilitate the identification of these genes in the MAS studies [13]. It can give information about homozygous/heterozygous states. Homozygous/heterozygous distinction with molecular markers is of great importance in the early selection of plants. Varieties carrying homozygous genes are very valuable [14]. This provides a great advantage in accelerating breeding studies [15]. Simple sequence repeats (SSR) markers are often preferred in the detection of resistance genes by marker-assisted selection. Because SSRs provide highly informative markers because they are co-dominant and generally highly polymorphic [10]. Resistance genes in yellow rust disease are expressed as *Yr* genes. More than 78 yellow rust resistance genes have been identified worldwide [11]. Identification of *Yr* genes with molecular markers will help to identify parents to be selected as a source of resistance the development of gene-specific DNA markers is important in the identification of resistance genes in varieties [12]. In this study, the efficacy of nine markers defining yellow rust resistance genes was tested on twenty wheat varieties.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Plant Material

Seeds of twenty commercial wheat varieties and disease reaction data (Table 1) used in the study were provided by Transitional Zone Agricultural Research Institute (Eskisehir, Turkey). Seeds were germinated in flowerpots under laboratory conditions for DNA isolation.

Table 1. Wheat Varieties, Place of Registration and Disease Reaction

No	Variety	Place of Registration	Disease Reaction*
1	Altay 2000	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
2	Sertak 52	Transitional Zone Agricultural Research Institute	Unknown
3	Kırgız 95	Transitional Zone Agricultural Research Institute	S
4	Bolal 2973	Transitional Zone Agricultural Research Institute	MR
5	Demir 2000	Field Crops Central Research Institute	R
6	Kutluk 94	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
7	Kıraç 66	Transitional Zone Agricultural Research Institute	MS
8	Harmankaya 99	Transitional Zone Agricultural Research Institute	MS
9	Müfitbey	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
10	Nacıbey	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
11	Pehlivan	Trakya Agricultural Research Institute	MR
12	Tosunbey	Field Crops Central Research Institute	MR
13	Alpu 01	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
14	Soyer 02	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
15	Yayla 305	Transitional Zone Agricultural Research Institute	Unknown
16	4-11	Field Crops Central Research Institute	Unknown
17	Sönmez 01	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
18	Bezostaja-1	Transitional Zone Agricultural Research Institute	MR
19	Sultan95	Transitional Zone Agricultural Research Institute	R
20	PI178383	Turkey	Unknown

* Disease reactions are the data of the Institute where the varieties are registered. The modified Cobb Scales; R (resistant), MR (moderately resistant), MS (moderately susceptible), S (susceptible) [8, 16].

B. DNA Extraction, PCR Amplification, Electrophoresis and Gel Visualization

Total genomic DNA was extracted from plant leaves ground with liquid nitrogen using the cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) method as described by Doyle and Doyle methods [17].

PCR amplification for microsatellite primers was carried out in a total reaction volume of 25 µl containing 10 ng of template DNA, 1X Taq polymerase reaction buffer, 2 mM MgCl₂, 0.1mM each of dNTPs (dATP, dCTP, dGTP, and dTTP), 0.2 mM primer and 1 U of Taq DNA polymerase (Fermentas). Amplifications were performed in a Techne TC Plus thermocycler (Techne Inc.) programmed as follows: 3 min denaturation at 94 °C and 35 cycles of 1 min. each denaturation at 94 °C, 1 min annealing at 50-60 °C for SSR amplification, and a 2 min extension at 72 °C, followed by a final extension at 72 °C for 7 min. Primer sequence information was obtained from the Grain Genes database (Table 2) [18].

Table 2. List Of Primers Along with Their Gene, Sequence, Expected Product Size

Primer	Linked Yr Gene	Sequence (F/R)	Expected product size	References
Xgwm582	Yr9	AAGCACTACGAAAATATGAC TCTTAAGGGGTGTTATCATA	150	[19]
RgaYr10a	Yr10	ATCAAGAGCCGCATCAAGG CCAAAGCCAACAATAGAGACC	233	[20]
Xgwm413	Yr15	TGCTTGCTAGATTGCTTGGG GATCGTCTCGTCCTTGGA	96	[19, 21]
Xgwm11	Yr26	GGATAGTCAGACAATTCCTGTG GTGAATTGTGTCTTGTATGCTTCC	200	[19]
Wmc44	Yr29	GGTCTTCTGGGCTTTGATCCTG TGTTGCTAGGGACCCGTAGTGG	242	[21, 22, 23]
Barc101	Yr36	GCTCCTCTCACGATCACGCAAAG GCGAGTCGATCACACTATGAGCCAATG	123 (116,138,160,165)	[22]
Cfa2149	Yr48	CTTGGAGCTCGGGTAGTAGC AAGGCAGCTCAATCGGAGTA	231	[22]
Sun104	Yr51	TGCTATGTGCGTGATGATGA TTACATGCTCCAGCGACTTG	225(+)	[21, 24]
Xgwm273	YrCH52	ATTGGACGGACAGATGCTTT AGCAGTGAGGAAGGGGATC	170, 180, 190, 200	[19]

Amplification products were separated on 1.3% agarose gel containing ethidium bromide (0.5 µg/ml) using 100 bp DNA ladder (Solis Bio Dyne, Estonia). Gels were visualized under UV light and digitally

photographed with Gel Logic 212 Pro imaging system (Carestream, USA). The polymorphism information content (PIC) was calculated according to the formula:

$$PIC = 1 - \sum_i^n p_i^2 \quad (1)$$

III. RESULTS AND DISCUSSION

Rust diseases in wheat cause destructive results all over the world. It was reported that yellow rust disease caused a widespread epidemic from 1936 to 1963 in Turkey. In addition, it caused regional epidemics from 1975 to 1984, a yield loss of up to 62.5% in 1991, serious yield losses in Central Anatolia in 1998, and epidemics in Central Anatolia and Transition Regions from 2009 to 2010 [25, 26]. Fungicides are widely used in the fight against yellow rust. In 2019, according to the data from the Turkish Statistical Institute (2021), a total of 51,297 tons of pesticides were used in Turkey. The amount of fungicides is 19,698 tons in these used pesticides. However, because pesticide use causes damage to the environment, it is recommended to use resistant varieties in sustainable agriculture and breeding [3, 5, 27]. Molecular markers defined for resistance genes are used to identify resistant varieties for breeding studies. Resistance to yellow rust disease in wheat is defined by *Yr* genes called. Many genes or DNA sites have been identified to provide resistance against the different yellow rust disease races in studies carried out until today. More than seventy resistance genes have been characterized using molecular studies [28]. It has been reported that DNA amplification fragments obtained using PCR markers identifying these genes may be a specific indicator of disease resistance [29, 30, 31, 32, 33]. Determination of resistance gene regions in wheat contributed greatly to the development of markers and the rapid identification of resistant varieties using molecular methods. Resistance to rust diseases emerges in two forms race-specific and non-race-specific. The race-specific resistance is controlled by a single gene. When a racial change in the pathogen organism, the resistance is lost. When non-racial resistance is provided by multiple genes, stronger resistance to race changes occurs [34]. As a result of the amplification of microsatellite loci by PCR method and their execution in gel electrophoresis, bands formed by spreading according to molecular weights of heterozygous and homozygous individuals can be visualized on the gel. While PCR products of heterozygous individuals are seen as two bands on the gel, PCR products of homozygous individuals are displayed as a single band [13, 35].

In this study, the effectiveness of molecular markers used in detecting the presence of *Yr* resistance genes in bread wheat varieties was evaluated. It was analysed comparatively PCR results (Figure 1) obtained using molecular markers with the literature information including the field observations. Identified markers for nine *Yr* genes (*Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr26*, *Yr29*, *Yr36*, *Yr48*, *Yr51*, *YrCH52*) were tested on twenty bread wheat varieties.

Nine SSRs markers were used to study variation at *Yr* loci in twenty wheat lines. DNA markers Xgwm582, *Yr10* marker Xgwm413, Xgwm11, Wmc44, Barc101, Cfa2149, Sun104, and Xgwm273 gave the expected results (Table 2). PR (Polymorphism rates) and PIC (Polymorphism Information Content) values were calculated for all primers. Because four primers (RgaYr10a, Xgwm413, Barc101, and Cfa2149) include only a monomorphic band (homozygote character), their PR and PIC values were obtained as zero. PR values of the other five primers (Xgwm582, Xgwm11, Wmc44, Sun104, and Xgwm273) include different two bands (heterozygote character) were less than 50% and found inefficient. PIC values for these primers were determined respectively Xgwm582 (0,09), Xgwm11 (0,36), Wmc44 (0,22), Sun104 (0,31) and Xgwm273 (0,27).

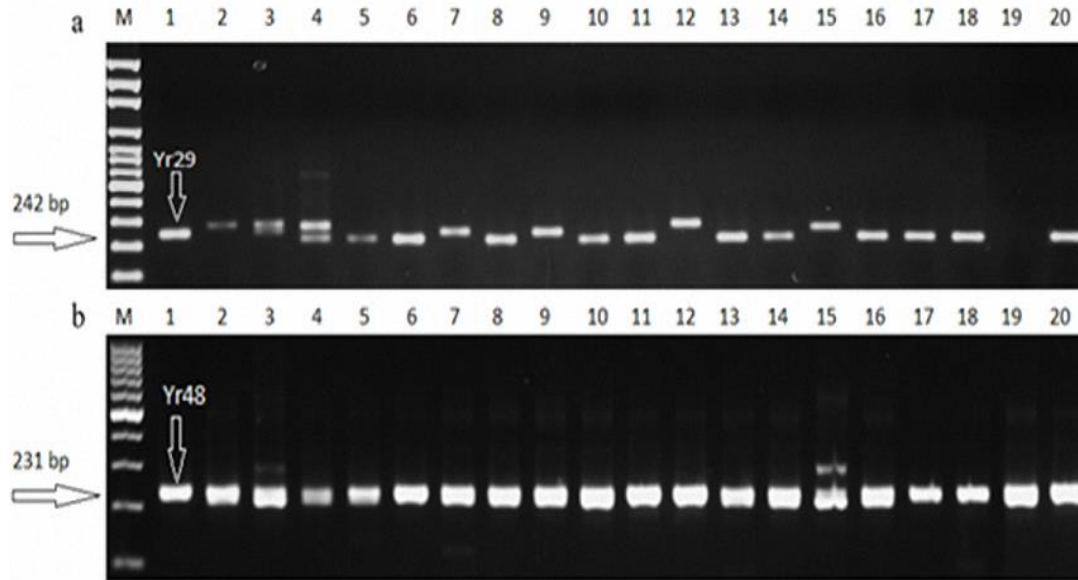


Figure 1. PCR Amplified Products of (A) Marker (100 Bp DNA Ladder) Wmc44 for *Yr29* (242 Bp) and (B) Marker Cfa2149 for Detecting *Yr48* (231 Bp) Gene in Wheat Varieties.

The disease reaction may differ depending on the genotype-environment interaction. This reaction is under the influence of pathogen virulence and external factors. Some pure lines may be resistant in some environments and susceptible in others [36].

Ay (2013) determined the disease rates of some wheat varieties. While he evaluated the obtained results, he also considered the relative humidity reported between the years 2009-2010. Since the relative humidity average in 2010 is more than in 2009, he has asserted that 2010 has more favourable conditions for the rust epidemic. Depending on this result, Ay (2013) reported that Kırğız-95 and Bolal-2973 showed moderately sensitive and sensitive reactions in 2010 compared to 2009, respectively [31]. We observed that Kırğız-95 and Bolal-2973 varieties have a positive band product of 242 bp in our screening with the Wmc44 marker.

It was observed that the tested markers (RgaYr10a, Xgwm413, Barc101, Cfa2149) for *Yr10*, *Yr15*, *Yr36*, and *Yr48* of these genes yielded products in all varieties (Table 3). As a result, it is possible to talk about the presence of resistance genes in all of the varieties of wheat. However, the presence of these genes in varieties that react sensitively under field conditions can be explained by the fact that the resistance is controlled by more than one gene or gene pair or the markers lose their effectiveness [34].

Table 3. PCR Amplification Results and Disease Reactions in the Literature

Wheat varieties	Gene/ markers	Yr9	Yr10	Yr15	Yr26	Yr29	Yr36	Yr48	Yr51	Yr52	2009 Field Resistance *	2010 Field Resistance
Altay 2000		+	+	+		+	+	+			Immune	Immune
Sertak 52		+	+	+			+	+			Unknown	Unknown
Kırgız 95		+	+	+	+		+	+			Resistant	M. Susceptible
Bolal 2973		+	+	+			+	+			Immune	Susceptible
Demir 2000		+	+	+		+	+	+			Resistant	Immune
Kutluk94		+	+	+		+	+	+			Immune	M. Resistant
Kıraç 66		+	+	+			+	+			Immune	Immune
Harmankaya 99		+	+	+		+	+	+			M. Resistant	Immune
Müfitbey		+	+	+			+	+	+	+	Immune	Immune
Nacibey		+	+	+		+	+	+	+	+	Unknown	Unknown
Pehlivan		+	+	+	+	+	+	+			M. Resistant	Immune
Tosunbey		+	+	+	+		+	+			Immune	Immune
Alpu 01		+	+	+		+	+	+	-		Immune	Immune
Soyer 02		+	+	+		+	+	+	+		Resistant	Immune
Yayla 305		+	+	+	+		+	+			Immune	Immune
4-11		+	+	+		+	+	+			Unknown	Unknown
Sönmez 01		+	+	+	+	+	+	+			Resistant	Immune
Bezostaja-1		+	+	+	+	+	+	+			Resistant	Immune
Sultan95			+	+	+		+	+	+	+	Resistant	Immune
PI178383		+	+	+	+	+	+	+	+	+	Unknown	Unknown

* 2009-2010 Filed Resistance [31], Immune (I), Resistant (R), Moderately Resistant (MR), Moderately Susceptible (MS), Susceptible (S) [27].

It was procured yields by the *Yr9* gene marker in all wheat varieties used in the study apart from Sultan 95 variety. It obtained a monomorphic band at 150 bp for primer Xgwm582. The product size for this marker is consistent with the results obtained by Çabuk et al. (2011). The same result was obtained for the PI178383 variety used in their studies [19]. The results of both studies confirm each other.

PI178383 variety stands out as the variety that yields products for all markers among the varieties used in the study. The yellow rust resistance locus *Yr10* on chromosome 1B originates from PI178383 which is a local variety obtained by selection from Şemdinli's region and is known to carry three minor genes.

It was known that wheat varieties containing genes determined by *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr26*, *Yr36*, and *Yr48* markers (Table 3) showed generally resistant reactions over the years [31]. It was strikingly that Tosunbey and Yayla305 varieties, which are known to be resistant in the field according to different years, contain the *Yr29* gene as well as some other *Yr* genes. Müfitbey is a variety known to be resistant throughout the years in the field and remarks among the other wheat varieties used in the study. According to the obtained results, we think that the Müfitbey, Nacibey, and PI178383 varieties may be used as a parent in the breeding studies aimed at yellow rust resistance.

Pathogenicity of wheat yellow rust disease; varies from year to year and from region to region, depending on the susceptibility of the varieties, the race of the pathogen, and environmental conditions, especially humidity and precipitation [11]. There are differences in the disease reactions depending on the years in Kırgız95 and Bolal2973 varieties. While both varieties showed resistant (immune) reactions in 2009 year, they showed sensitive reactions in the next year (Table 1, 3). In our study, while the Xgwm11 marker associated with the *Yr26* gene didn't form bands in the sensitively reacted Bolal variety, produced a band product in the Kırgız variety that has got a moderately sensitive reaction. This argument can be explained by the race change of the pathogen and the loss of effectiveness of the marker. Therefore, it is important to investigate the presence of more *Yr* genes, to detect markers that lose their effectiveness, and to take this into account in resistance breeding studies against possible epidemics.

Yr29 gene was detected in Altay2000, Demir2000, Kutluk94, Harmankaya99, Nacibey, Pehlivan, Alpu01, Soyer02, 4-11, Sönmez01, Bezostaja-1, and PI178383 varieties. When the studies about these wheat varieties and their characteristics consider, it is seen that they are resistant in the field. The absence of this gene in susceptible varieties has indicated that the *Yr29* gene is an important gene in controlling resistance and that the Wmc44 marker defining this gene is effective. When the Sun104 marker activity for the *Yr51* gene was evaluated, the detection of

this gene only in resistant-reacting varieties reveals that the gene and its marker can still be used effectively. Similarly, the *YrCH52* gene was detected only in resistant-reacting varieties, and it appeared that the activity of its marker (Xgwm273) continues.

PI178383 variety is frequently used as a resistant variety in breeding studies against yellow rust disease [19, 37]. This variety obtained positive band products for all markers as a result of the study. As a result, we can assert that the PI178383 variety acts as a control group in terms of resistance. We observed that PI178383, Müfitbey, and Nacibey varieties that have the resistant reaction formed positive band products for most markers (Table2-3). We predict that these varieties will be beneficial to use in aquaculture and breeding studies against yellow rust epidemics in the long term. We recommend including Wmc44, Sun104, and Xgwm273 markers, respectively, in screening the *Yr29*, *Yr51*, and *YrCH52* genes to control the resistance status of the wheat varieties.

As a result, the co-existence of *Yr29*, *Yr51*, and *YrCH52* genes apart from other genes which are mutual in PI178383, Müfitbey, and Nacibey varieties which show effective resistance in the field, also reveals the effectiveness of the markers that define these genes. Our results showed that PI178383, Müfitbey, and Nacibey varieties will be beneficial to be used in breeding studies against yellow rust epidemics in the long term. We think that *Yr29*, *Yr51*, and *YrCH52* genes will have a critical role in determining resistance in genotypes in marker-assisted selection studies against yellow rust disease. Therefore, we suggest that these genes should be given priority when determining parent candidates in breeding studies.

Knowing and confirming the genes which establish resistance in varieties is very important. The obtained results from this study are very valuable in terms of creating new strategies against racial changes and accelerating breeding studies. If we evaluate results from a general point of view, we understand that the studies at the DNA level to be made with molecular markers should be used together with the field conditions. In this way, it may be possible to prevent possible pandemics by following the race change of the pathogen.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Bilecik Seyh Edebali University Scientific Research Projects Coordinatorship for the support of project number 2020-01.BSEÜ.25-02 for this study.

REFERENCES

- [1] Neupane, D., Adhikari, P., Bhattarai, D., Rana, B., Ahmed, Z., Sharma, U., & Adhikari, D. (2022). Does Climate Change Affect The Yield of The Top Three Cereals and Food Security in The World?. *Earth*, 3(1), 45-71.
- [2] Wang, J., Vanga, S. K., Saxena, R., Orsat, V., & Raghavan, V. (2018). Effect of Climate Change on The Yield of Cereal Crops: A review. *Climate*, 6(2), 41.
- [3] Akan, K., (2019). Sarı Pas (*Puccinia striiformis* f. sp. tritici) Hastalığına Dayanıklı Makarnalık Buğday Hatlarının Geliştirilmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 6(4), 661–670.
- [4] Bhardwaj, S. C., Singh, G. P., Gangwar, O. P., Prasad, P., & Kumar, S. (2019). Status of Wheat Rust Research and Progress in Rust Management-Indian Context. *Agronomy*, 9(12), 892.
- [5] Kuraparthi, V., Chhuneja, P., Dhaliwal, H. S., Kaur, S., Bowden, R. L., & Gill, B. S. (2007). Characterization and Mapping of Cryptic Alien Introgression from *Aegilops Genuculata* with New Leaf Rust and Stripe Rust Resistance Genes *Lr57* and *Yr40* in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 114(8), 1379-1389.
- [6] Kiss, L., & Veres, S. (2017). Study of Yellow Rust Infection on Various Winter Wheat Genotypes. *Columella: Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 4(2), 27-32.
- [7] Ren, R. S., Wang, M. N., Chen, X. M., & Zhang, Z. J. (2012). Characterization and Molecular Mapping of *Yr52* for High-Temperature Adult-Plant Resistance to Stripe Rust in Spring Wheat Germplasm PI183527. *Theoretical and Applied Genetics*. 125(5), 847– 857.
- [8] Peterson, R. F., Campbell, A. B., & Hannah, A. E. (1948). A Diagrammatic Scale for Estimating Rust Intensity on Leaves and Stems of Cereals. *Canadian journal of research*, 26(5), 496-500.
- [9] Walli, M. H., Al-Jubouri, Z., Madumarov, M. M., Margaryta, M., & Aldibe, A. A. A. (2022). Genetic and Environment Diversity to Improve Wheat (*Triticum* spp.) Productivity: A review. *Research on Crops*, 23(2), 295-306.
- [10] Hasan, N., Choudhary, S., Naaz, N., Sharma, N., & Laskar, R. A. (2021). Recent Advancements in Molecular Marker-assisted Selection and Applications in Plant Breeding Programmes. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1), 1-26.

- [11] Chen, X. M. (2005). Epidemiology and Control of Stripe Rust (*Puccinia striiformis* f. sp. Tritici) on Wheat. *Canadian journal of plant pathology*, 27(3), 314-337.
- [12] Babu, P., Baranwal, D. K., Pal, D., Bharti, H., Joshi, P., Thiyagarajan, B., Gaikwad, K. B., Bhardwaj, S. C., Singh, G. P., & Singh, A. (2020). Application of Genomics Tools in Wheat Breeding to Attain Durable Rust Resistance. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-18.
- [13] Cristina, D., Turcu, A. G., Marinciu, C. M., Serban, G., Galit, I., Contescu, E. L., Manda, V., & Cîcua, M. (2021). DNA Markers-assisted Selection to Pyramid Rust Resistance Genes in Wheat Breeding Lines. *Seria Agronomie*, 64(1), 15-20.
- [14] Das, B. K., Saini, A., Bhagwat, S. G., & Jawali, N. (2006). Development of SCAR Markers for Identification of Stem Rust Resistance Gene *Sr31* in the Homozygous or Heterozygous Condition in Bread Wheat. *Plant Breeding*, 125(6), 544-549.
- [15] Yao, F., Zhang, X., Ye, X., Li, J., Long, L., Yu, C., Li, J., Wang, Y., Wu, Y., Wangi J., Jiang, Q., Li, J., Wei, Y., Zheng, Y., & Chen, G. (2019). Characterization of Molecular Diversity and Genome-Wide Association Study of Stripe Rust Resistance at the Adult Plant Stage in Northern Chinese Wheat Landraces. *BMC genetics*, 20(1), 1-16.
- [16] Akin, B., Zencirci, N., & Özseven. İ. (2008). Field Resistance of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes from Different Countries to Leaf Rust (*Puccinia triticina*). *Turkish Journal of Agriculture Forestry*, 32(6), 479-486.
- [17] Doyle, J. J., & Doyle, J. L., (1987). Isolation of Plant DNA from Fresh Tissue. *Focus*, 12, 13-15.
- [18] Grain Genes A Database for Triticeae and Avena. <https://wheat.pw.usda.gov> (29.11.2022).
- [19] Cabuk, E., Aydın, Y., & Uncuoglu, A. A. (2011) Assessing Wheat (*Triticum aestivum*) Genotypes for “Yr” Resistance Genes Using Conserved Regions and Simple-Sequence Motifs, *Genetics and Molecular Research*, 10(4), 3463-3471.
- [20] Yuan, C., Wu, J., Yan, B., Hao, Q., Zhang, C., Lyu, B., Ni, F., Caplan, A., Wu, J., & Fu, D. (2018). Remapping of the Stripe Rust Resistance Gene *Yr10* in Common Wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 131(6), 1253-1262.
- [21] Zheng, S., Li, Y., Lu, L., Liu, Z., Zhang, C., Ao, D., Lirong, L., Zhang, C., Liu, R., Luo, C. Wu, Y., & Zhang, L. (2017). Evaluating the Contribution of Yr Genes to Stripe Rust Resistance Breeding Through Marker-Assisted Detection in Wheat, *Euphytica*. 213(2), 1-16.
- [22] Rani, R., Singh, R., & Yadav, N. R. (2019). Evaluating Stripe Rust Resistance in Indian Wheat Genotypes and Breeding Lines Using Molecular Markers. *Comptes Rendus Biologies*, 342(5-6), 154-174.
- [23] Rosewarne, G. M., Singh, R. P., Huerta-Espino, J., William, H. M., Bouchet, S., Cloutier, S., McFadden, H., & Lagudah, E. S. (2006). Leaf Tip Necrosis, Molecular Markers and B1- proteasome Subunits Associated with the Slow Rusting Resistance Genes *Lr46/Yr29*, *Theoretical and Applied Genetics*. 112, 500-508.
- [24] Randhawa, H. S., Asif, M., Pozniak, C., Clarke, J. M., Graf, R. J., Fox, S. L., Humphreys, D. G., Knox, R. E., Depauw, R. M., Singh, A. K., Cuthbert, R. D., Hucl, P., & Spaner, D. (2013). Application of Molecular Markers to Wheat Breeding In Canada, *Plant Breeding*, 132(5), 458-471.
- [25] Çat, A., Tekin, M., Çatal, M., Akan K., & Akar, T. (2017). Wheat Stripe Rust and Breeding Studies for Resistance to The Disease. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 30(2), 97-105.
- [26] Wellings, C. R. (2011). Global Status of Stripe Rust: A Review of Historical and Current Threats. *Euphytica*, 179(1), 129-141.
- [27] Akan, K., Mert, Z., Çetin, L., Salantur, A., Yazar, S., Dönmez, E., Özdemir, B., Yalçın, S., Özer, Y., & Wanyera, R. (2012). Bazı Buğday Genotiplerinin Lokal Sarı Pas ve Kara Pas Irklarıyla Ug99 Kara Pas Irkına Reaksiyonlarının Belirlenmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 22-31.
- [28] Peng, F. Y., & Rong, R. C. (2017). Prediction and Analysis of Three Gene Families Related to Leaf Rust (*Puccinia triticina*) Resistance in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *BMC plant biology*, 17(1), 1-17.
- [29] Elyasi-Gomari S., & Lesovaya G. M. (2009). Harmfulness of Wheat Leaf Rust in The Eastern Part of Forest-Steppe of Ukraine. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 42, 659-665.
- [30] Herrera-Foessel, S. A., Sing R.P., Huerta-Espino, J., Rosewarne, G. M., Periyannan, S. K., Viccars, L, Calvo-Salazar, V., Lan, C. X., & Lagudah, E. S. (2012). *Lr68*: A New Gene Conferring Slow Rusting Resistance to Leaf Rust in Wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 124, 1475-1486.
- [31] Ay, H., (2003). Çukurova Koşullarında Pas Hastalıklarının Bazı Ekmeklik Buğday Çeşitlerine Etkisi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 6 (1), 50-55.
- [32] Khan, H., Bhardwaj, S. C., Gangwar, O. P., Prasad, P., Kashyap, P. L., Savadi, S., Kumar, S., & Rathore R., (2017). Identifying Some Additional Rust Resistance Genes in Indian Wheat Varieties Using Robust Markers. *Cereal Research Communications*, 45(4), 633-646.

- [33] Kiel, A., Weigt, D., Karpinska, M., Kurasiakpopowska, D., Niemann, J., Tomkowiak, A., Mikolajczyk, S., & Nawracala, J., (2020). An Analysis of the Functionality of Molecular Markers Related to The *Lr19* Gene Conditioning Resistance to Wheat Leaf Rust. *Zemdirbyste-Agriculture*, 107(1), 63-70.
- [34] Waqar, A., Khattak, S. H., Begum, S., Rehman, T., Shehzad, A., Ajmal, W., Zia, S.S., Siddiqi I., & Ali, G. M. (2018). Stripe rust: A Review of the Disease, *Yr* Genes and Its Molecular Markers. *Sarhad Journal of Agriculture*, 34(1), 188-201.
- [35] Cobo, N., Wanjugi, H., Lagudah, E., & Dubcovsky, J. (2019). A High- resolution Map of Wheat QYr. ucw-1BL, an Adult Plant Stripe Rust Resistance Locus in the Same Chromosomal Region as *Yr29*. *The plant genome*, 12(1), 1-15.
- [36] Akcura, M., Akan, K., & Hocaoglu, O. (2017). Biplot Analysis of Leaf Rust Resistance in Pure Lines Selected from Eastern Anatolian Bread Wheat Landraces of Turkey. *Turkish Journal of Field Crops*, 22(2), 227-234.
- [37] Wang, L., Ma, J., Zhou, R., Wang, X., & Jia, J. (2002). Molecular Tagging of the Yellow Rust Resistance Gene *Yr10* in Common Wheat, PI178383 (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 124(1), 71-73.

Araştırma Makalesi - Research Article

Insecticidal Activity of Prodigiosin Pigment on *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae)

Prodigiosin Pigmentinin *Tenebrio molitor* (Coleoptera:Tenebrionidae) Üzerindeki İnsektisidal Aktivitesi

Ardahan Eski^{1*}, Tayyibe Özdemir²

Geliş / Received: 09/09/2022

Revize / Revised: 08/11/2022

Kabul / Accepted: 15/12/2022

ABSTRACT

Microorganisms and their metabolites have the potential to provide a sustainable alternative to chemical insecticides. *Serratia marcescens* is an entomopathogenic bacterium that produces hydrolytic enzymes and toxins. It also produces a red pigment called prodigiosin, which has a variety of biological properties. In this study, the prodigiosin pigment was extracted from *S. marcescens* Se9 isolate with acidified ethanol and concentrated using a rotary evaporator. The insecticidal potential on larval and adult stages of *Tenebrio molitor* was then investigated. It was found that the mortality rate of larvae exposed to the lowest concentration (125 ppm) of crude pigment was 5%, while the mortality rate of larvae exposed to the highest concentration (2000 ppm) was 68%. The LC₅₀ value of the crude pigment for the larval stage was determined to be 924 ppm. On the other hand, even at the highest pigment concentration (2000 ppm), only 30% mortality was observed in adults. The LC₅₀ value of the crude pigment for the adult stage was determined to be 4570 ppm. It was determined that the pigment had a toxic effect on the pest, but the larval stage was more sensitive than the adult stage. The study showed that prodigiosin pigment appears to be a promising biocontrol agent for use against *T. molitor*.

Keywords- *Serratia marcescens*, Bacterial pigment, Prodigiosin, Biocontrol

ÖZ

Mikroorganizmalar ve metabolitleri, kimyasal insektisitlere sürdürülebilir bir alternatif sağlama potansiyeline sahiptir. *Serratia marcescens* hidrolitik enzimler ve toksinler üreten entomopatojenik bir bakteridir. Ayrıca, çeşitli biyolojik özelliklere sahip olan, prodigiosin adı verilen kırmızı bir pigment üretir. Bu çalışmada, prodigiosin pigmenti, asitleştirilmiş etanol ile *S. marcescens* Se9 izolatından ekstrakte edildi ve bir döner buharlaştırıcı kullanılarak konsantrasyon edildi. Daha sonra *Tenebrio molitor*'un larva ve ergin evreleri üzerindeki insektisidal potansiyeli araştırıldı. Ham pigmentin en düşük konsantrasyonuna (125 ppm) maruz kalan larvaların ölüm oranının %5, en yüksek konsantrasyona (2000 ppm) maruz kalan larvaların ölüm oranının ise %68 olduğu tespit edildi. Larva evresi için ham pigmentin LC₅₀ değeri 924 ppm olarak belirlendi. Öte yandan, en yüksek pigment konsantrasyonunda (2000 ppm) bile erginlerde sadece %30 ölüm gözlemlendi. Ham pigmentin ergin evresi için LC₅₀ değeri 457 ppm olarak belirlendi. Pigmentin zararlı üzerinde toksik etkisinin olduğu ancak larva döneminin ergin döneme göre daha duyarlı olduğu belirlendi. Çalışma, prodigiosin pigmentinin, *T. molitor*'a karşı kullanım için umut verici bir biyokontrol ajanı olabileceğini gösterdi.

Anahtar Kelimeler- *Serratia Marcescens*, Bakteriyal Pigment, Prodigiosin, Biyokontrol

^{1*}Corresponding author contact: ardahan.eski@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9621-2854>)
Program of Biomedical Equipment Technology, Vocational School, Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik, Turkey
²Contact: tayyibeozdemir2610@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-1548-9449>)
Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Science, Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik, Turkey

I. INTRODUCTION

Growers are trying to obtain maximum yield from limited cropland to meet the food needs of the world's growing population. On the other hand, they are struggling with pests that cause yield losses in agricultural production in order to achieve sustainable nutrition.

The yellow mealworm, *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae), is a important pest of stored products such as flours, starches and pastas [1]. It not only eats the product but also contaminates it with body fragments and faeces, leading to a decline in food quality [2]. Currently, the main approaches to controlling this pest are based on conventional chemical insecticides. However, their unconscious, overuse has led to the development of resistant populations, the elimination of their natural enemies, and the outbreak of secondary pests. These are limited their application. Therefore, an environmentally friendly alternative is needed to overcome these limitations and achieve high yield. Microorganisms and their products could be the best choice to replace the wide use of conventional chemical insecticides.

Serratia marcescens (Enterobacteriaceae: Serratia) is one of the most important microbial control agents, controlling a variety of economically important pests. The bacterium is commonly found in various insects such as *Antheraea pernyi* (Lepidoptera: Saturniidae) [3], *Phyllophaga blanchardi* (Coleoptera: Scarabaeidae) [4], *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) [5], *Curculio dieckmanni* (Coleoptera: Curculionidae) [6]. The primary metabolite chitinases plays an important role in the insecticidal activities of *S. marcescens* by hydrolyzing the body wall and peritrophic membrane structure of the insects [7]. On the other hand, *Serratia marcescens* produces a red pigment called prodigiosin as a secondary metabolite that has biological properties such as antibacterial [8], antifungal [9], antimalarial [10], nematocidal [11], immunosuppressive [12], and anticancer [13] properties. It also showed insecticidal activity on insects. Larvicidal effect on *Aedes aegypti* and *Anopheles stephensi* has been previously reported [14], [15]. In addition, insecticidal potential has been reported on adults of *Periplaneta americana* [16], nymphs of *Diaphorina citri* [17] and larvae of *Helicoverpa armigera* and *Spodoptera litura* [18] Studies on the insecticidal potential of prodigiosin on insect pests were limited in these studies.

Thus, the objective of the present study was to extract a crude prodigiosin pigment from a native *Serratia marcescens* Se9 isolate and determine its insecticidal potential on the larvae and adults of *Tenebrio molitor*. This is also the first study on the efficacy of prodigiosin on *Tenebrio molitor*.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Culture of *Serratia marcescens*

Serratia marcescens Se9, a red pigmented bacterium isolated from larvae of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) in a previous study, was used [5]. A loopful of bacterial suspension from a glycerol stock culture was spread onto nutrient agar plate and incubated at 30 °C for 24 hours. Then a single colony was transferred to a fresh nutrient agar. It was used for further studies after ensuring that the culture was pure.

B. Production and extraction of prodigiosin

A 24-h-old culture of *S. marcescens* Se9 was inoculated in 250 ml of nutrient broth medium and incubated for 48 h at 30 °C under static conditions. The pigmented culture was then centrifuged at 10,000 rpm for 15 minutes at 4°C, and the supernatant was discarded. Extraction of prodigiosin from the cells was carried out as described by Suryawanshi et al. [15] with a slight modification. The pellet was resuspended in acidified ethanol (4.0 mL 1 N HCl - 96.0 mL ethanol) and vortexed vigorously for 5 minutes. The suspension was centrifuged at 10,000 rpm for 15 minutes, and the supernatant containing the prodigiosin was carefully transferred to a sterile Falcon tube (50 mL). This procedure was repeated until the pellet was colorless. The solvent was removed under vacuum in a rotary evaporator (Bibby Scientific Ltd, Staffordshire, UK) at 50 °C with chiller temperature set at below 10 °C until the dried red pigment was obtained. After the crude pigment was collected and quantified on a dry weight basis, it was stored at 4 °C until used for the bioassay.

C. Insect rearing

Tenebrio molitor used in the bioassay were obtained from a local pet shop. To confirm that the insect was *T. molitor*, larvae were examined under a stereomicroscope to reveal characteristic features such as the evenly divided linear grooves extending the entire length of the abdomen and four tarsal segments on the hind legs [19]. The larvae were kept in disinfected plastic boxes (50×30×10 cm) and maintained at 25 ± 1 °C, 70 ± 5% relative

humidity (RH) with a light/dark 12:12 h photoperiod. The larvae were fed *ad libitum* with whole grain flour (90%) and instant dry yeast (10%). In addition, a piece of fresh-cut potato were placed in the boxes for providing the necessary water to insects [20].

D. Bioassays

Twenty mg of the dry pigment was resuspended in 10 ml of sterile 96% (v/v) ethanol and filtered through a 0.20 µm sterile syringe filter (Minisart, Sartorius, Germany). Five different concentrations of the pigment (2000, 1000, 500, 250, 125 ppm) were then prepared by 1:2 dilution and insecticidal activity was tested on both larvae (14th instar stage) and adults (newly hatched) of *Tenebrio molitor* by leaf disk feeding assay [21]. Disks 5 cm in diameter cut from cabbage leaves were dipped in the concentrations prepared from the pigment for 5 seconds and then allowed to dry for 30 minutes to evaporate the ethanol. The disks used in the control group were dipped into sterile ethanol. The treated and control disks were placed individually in Petri dishes. At each concentration, twenty 14th instar larvae were placed on a treated leaf disk in Petri dish. The experiments were performed triplicate for each concentration and control group. The experiment was conducted at 25 °C and 60% relative humidity with a light/dark 12:12 h photoperiod. Mortality was recorded daily for 5 days. Experiments were also performed with adults as described above.

E. Data analysis

Mortality data were corrected with Abbott's formula [22]. The Kaplan–Meier method was used to plot cumulative survival curves. Log-rank (Mantel-Cox) test was used to assess difference in survival between each concentrations. Probit regression analysis was performed to determine prodigiosin concentration required to kill 50% and 90% of the pest (LC₅₀ and LC₉₀) was calculated. All the analyses were conducted using SPSS Statistics 25 software package (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

III. RESULTS

The pigment prodigiosin was extracted from *Serratia marcescens* Se9 grown in nutrient broth medium using acidified ethanol as solvent. After evaporation of the solvent by a rotary evaporator, the crude pigment was obtained. Different concentrations from 2000 to 125 ppm (1:2 dilution) were prepared from the crude pigment and tested on the larvae and adults of *T. molitor*. It was found that the mortality rate of larvae exposed to the lowest concentration (125 ppm) of the crude pigment was 5%, while the mortality rate of larvae exposed to the highest concentration (2000 ppm) was 68%. In addition, at a concentration of 1000 ppm, a mortality of 73% was observed. Log-rank analysis showed that the larvae of *T. molitor* exposed to 2000, 1000 and 500 ppm of pigment concentration were statistically different from the control group (Table 1). However, there were no significant differences in mortality between 250, 125 ppm and the control group.

Table 1. Log-Rank (Mantel–Cox) analysis result of *Tenebrio molitor* larvae exposed to different concentrations of crude prodigiosin pigment

Concentrations (ppm)	2000		1000		500		250		125		Control	
	X ²	p	X ²	p	X ²	p	X ²	p	X ²	p	X ²	p
2000			0.003	0.959	43.197	0.000	83.953	0.000	87.411	0.000	96.919	0.000
1000	0.003	0.959			48.227	0.000	92.810	0.000	96.849	0.000	106.79	0.000
500	43.197	0.000	48.227	0.000			10.954	0.001	11.476	0.001	17.826	0.000
250	83.953	0.000	92.810	0.000	10.954	0.001			0.001	0.978	1.364	0.243
125	87.411	0.000	96.849	0.000	11.476	0.001	0.001	0.978			1.330	0.249
Control	96.919	0.000	106.799	.0000	17.826	0.000	1.364	0.243	1.330	0.249		

X²: Chi-square, p: significance

Figure 1A illustrated the survival curves of the larvae in the control group and the infected group. The control group had the highest survival rate, while the larvae exposed to the pigment at a concentration of 1000 ppm had the lowest survival rate. The LC₅₀ value of the crude pigment for the larval stage was determined to be 924 ppm (Table 3). On the other hand, even at the highest pigment concentration (2000 ppm), only 30% mortality was observed in adults. While there was a statistical difference in mortality between the 2000, 1000, 500 ppm concentrations and the control group, there was no difference in mortality between the 250, 125 ppm concentrations and the control group (Table 2). Figure 1B illustrated the survival curves of the control group and the infected adult groups. The control group had the highest survival rate, while adults exposed to the pigment at

a concentration of 2000 ppm had the lowest survival rate. The LC₅₀ value of the crude pigment for the adult stage was determined to be 4573 ppm (Table 3).

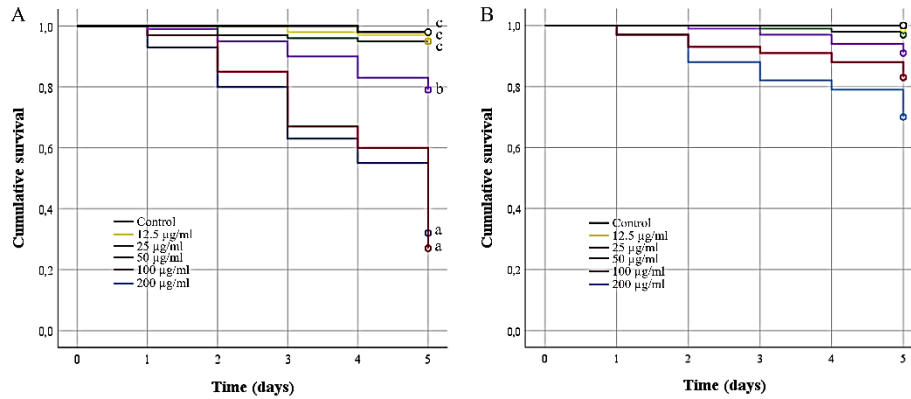


Figure 1. Kaplan-Meier survival diagram for larvae (A) and adult (B) of *Tenebrio molitor* exposed to crude prodigiosin pigment at five different concentrations. The lowercase letters represented the significant differences between concentrations.

Table 2. Log-Rank (Mantel-Cox) analysis result of *Tenebrio molitor* adults exposed to different concentrations of crude prodigiosin pigment

Concentrations (ppm)	2000		1000		500		250		125		Control	
	X ²	p	X ²	p	X ²	p	X ²	p	X ²	p	X ²	p
2000			4.598	0.032	14.458	0.000	26.652	0.000	32.316	0.000	35.235	0.000
1000	4.598	0.032			2.960	0.085	10.953	0.001	15.702	0.000	18.503	0.000
500	14.458	0.000	2.960	0.085			3.182	0.074	6.763	0.009	9.378	0.002
250	26.652	0.000	10.953	0.001	3.182	0.074			1.028	0.311	3.030	0.082
125	32.316	0.000	15.702	0.000	6.763	0.009	1.028	0.311			1.000	0.317
Control	35.235	0.000	18.503	0.000	9.378	0.002	3.030	0.082	1.000	0.317		

X²: Chi-square, p: significance

Table 3. Median lethal concentration (LC₅₀) of crude prodigiosin pigment on different life stages of *Tenebrio molitor*.

Life stage	LC ₅₀ (ppm)	95% CI		Slope ± SE	LC ₉₀ (ppm)	df	X ²
		Lower bound	Upper bound				
Larvae	924	414	5738	2.14 ± 0.18	3494	3	28.1
Adult	4573	2946	9872	1.42 ± 0.22	34384	3	0.2

CI: confidence limits, SE: standard error, df: degree of freedom, X²: chi-square.

IV. DISCUSSION

The pathogenicity and virulence of various microorganisms and their products have been evaluated for biological control of *T. molitor*. Specially, the efficacy of entomopathogenic microorganisms *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* and *Bacillus thuringiensis* on different developmental stages of *T. molitor* has been reported [23]–[26]. However, there is no study on the efficacy of bacterial pigments against *T. molitor*.

In this study, the insecticidal activity of the prodigiosin pigment produced by a native *S. marcescens*, which is reported to have many biological properties, was tested for the first time on larvae and adults of *Tenebrio molitor*. The larval stage was more susceptible to the prodigiosin pigment than the adult stage. The LC₅₀ value for the larval stage was about five times lower than for the adult stage. However, compared to previous studies, the LC₅₀ values were high. Liang et al [27] tested the prodigiosin pigment extracted from *Serratia marcescens* TKU011 on *Drosophila melanogaster* larvae, and the lethal concentration that caused 50% larval mortality was reported to be 230 ppm. Similarly, the larvicidal effect of prodigiosin extracted from *S. marcescens* NMCC46 on mosquitoes revealed LC₅₀ values of 103.95 and 105.52 ppm against third instar larvae of *A. aegypti* and *An. stephensi*, respectively [14]. In our study, the LC₅₀ values for larval and adult stages of *T. molitor* were 924 and 4573 ppm, respectively. In contrast, Zhou et al [28] reported that the red pigment prodigiosin is not a major virulence factor for entomopathogenic *Serratia marcescens*. They tested the pathogenicity of pigmented *S.*

marcescens and its non-pigmented mutant strain against larvae of *Bombyx mori* and found that the LC₅₀ values were similar, but the larvae that died from the pigmented bacteria turned red.

The difference in LC₅₀ values between these studies can be explained by the immune response of the insects to prodigiosin. Inhibition of immune system enzymes such as protease phosphatase, acid phosphatase and acetylcholine esterase has been reported when prodigiosin was exposed to insects [15]. It also leads to a drop in pH in the insect's midgut, which can result in reduced nutrient uptake and lead to the insect's death. However, resistant insects can overcome this situation by a detoxification mechanism through high activity of esterases. Therefore, the susceptibility of insects to the pigment prodigiosin may vary.

Kaplan-Meier analysis showed that the survival rate of both larvae and adults in the control groups was similar to that of insects treated with 125 and 250 ppm prodigiosin (Tables 1 and 2). However, the survival rate of insects treated with the concentration of 500 ppm decreased significantly, reaching 31.7% in larvae and 70% in adults at the concentration of 2000 µg/ml. A similar trend was reported by Patil et al. [14] that increased concentration of the pigment prodigiosin resulted in lower survival rate in larvae of *A. aegypti* and *A. stephensi*. Furthermore, at a concentration of 500 ppm, they observed complete mortality on the larvae of *A. aegypti* within 48 hours. In contrast, the survival rate of *T. molitor* larvae at 200 µg/ml concentration was 31.7% within 5 days.

V. CONCLUSION

The study exhibited that the prodigiosin pigment produced by *S. marcescens* has insecticidal potential for *Tenebrio molitor*. The larvae of the insect are more susceptible to prodigiosin pigment than the adult stage. The pigment appears to be a promising biological control agent for the integrated management of *T. molitor* larvae. It can be used alone or together with other biological control agents. However, the synergistic effect with other biological control agents should be determined.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was financially supported by the research project support programme for undergraduate students (2209-A, Project no: 1919B012102186), TUBITAK.

REFERENCES

- [1] Kavallieratos, N. G., Michail, E. J., Boukouvala, M. C., Nika, E. P., & Skourti, A. (2019). Efficacy Of Pirimiphos-Methyl, Deltamethrin, Spinosad And Silicosec Against Adults And Larvae Of *Tenebrio molitor* L. On Wheat, Barley And Maize. *Journal of Stored Products Research*, 83, 161–167.
- [2] Plata-Rueda, A., Martínez, L. C., Santos, M. H. Dos, Fernandes, F. L., Wilcken, C. F., Soares, M. A., Serrão, J. E., & Zanuncio, J. C. (2017). Insecticidal Activity Of Garlic Essential Oil And Their Constituents Against The Mealworm Beetle, *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Scientific Reports*, 7, 1–11.
- [3] Zhao, L. N., Ma, Y., Yang, X., Iqbal, A., Ruan, C. C., & Zang, L. S. (2020). Identification Of *Serratia marcescens* Isolated From *Antheraea pernyi* Eggs And Determination Of Bacterial Pathogenicity And Transmission Pathway. *Journal of Invertebrate Pathology*, 169, 107297.
- [4] Pineda-Castellanos, M. L., Rodríguez-Segura, Z., Villalobos, F. J., Hernández, L., Lina, L., & Eugenia Nuñez-Valdez, M. (2015). Pathogenicity Of Isolates Of *Serratia marcescens* Towards Larvae Of The Scarab *Phyllophaga blanchardi* (Coleoptera). *Pathogens (Basel, Switzerland)*, 4(2), 210–228.
- [5] Eski, A., Demir, İ., Güllü, M., & Demirbağ, Z. (2018). Biodiversity And Pathogenicity Of Bacteria Associated With The Gut Microbiota Of Beet Armyworm, *Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae). *Microbial Pathogenesis*, 121, 350–358.
- [6] Zhang, P., Zhao, Q., Ma, X., & Ma, L. (2021). Pathogenicity Of *Serratia marcescens* To Hazelnut Weevil (*Curculio Dieckmanni*). *Journal of Forestry Research*, 32(1), 409–417.
- [7] Aggarwal, C., Paul, S., Tripathi, V., Paul, B., & Khan, M. A. (2017). Characterization Of Putative Virulence Factors Of *Serratia marcescens* strain SEN For Pathogenesis In *Spodoptera litura*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 143, 115–123.
- [8] Lapenda, J. C., Silva, P. A., Vicalvi, M. C., Sena, K. X. F. R., & Nascimento, S. C. (2015). Antimicrobial Activity Of Prodigiosin Isolated From *Serratia marcescens* UFPEDA 398. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(2), 399–406.
- [9] John Jimtha, C., Jishma, P., Sreelekha, S., Chithra, S., & Radhakrishnan, E. (2017). Antifungal Properties Of Prodigiosin Producing Rhizospheric *Serratia* sp. *Rhizosphere*, 3, 105–108.
- [10] Papireddy, K., Smilkstein, M., Kelly, J. X., Shweta, Salem, S. M., Alhamadsheh, M., Haynes, S. W., Challis, G. L., & Reynolds, K. A. (2011). Antimalarial Activity Of Natural And Synthetic Prodiginines. *Journal of*

- Medicinal Chemistry*, 54(15), 5296–5306.
- [11] Gomez Valdez, L., Rondan Dueñas, J. C., Andrade, A. J., Del Valle, E. E., Doucet, M. E., & Lax, P. (2022). In Vitro And In Vivo Nematicidal Activity Of Prodigiosin Against The Plant-Parasitic Nematode *Nacobbus celatus*. *Biocontrol Science and Technology*, 32(6), 741–751..
- [12] D'Alessio, R., Bargiotti, A., Carlini, O., Colotta, F., Ferrari, M., Gnocchi, P., Isetta, A., Mongelli, N., Motta, P., Rossi, A., Rossi, M., Tibolla, M., & Vanotti, E. (2000). Synthesis And Immunosuppressive Activity Of Novel Prodigiosin Derivatives. *Journal of Medicinal Chemistry*, 43(13), 2557–2565.
- [13] Li, D., Liu, J., Wang, X., Kong, D., Du, W., Li, H., Hse, C. Y., Shupe, T., Zhou, D., & Zhao, K. (2018). Biological Potential And Mechanism Of Prodigiosin From *Serratia marcescens* subsp. *lawsoniana* In Human Choriocarcinoma And Prostate Cancer Cell Lines. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(11).
- [14] Patil, C. D., Patil, S. V., Salunke, B. K., & Salunkhe, R. B. (2011). Prodigiosin Produced By *Serratia marcescens* NMCC46 As A Mosquito Larvicidal Agent Against *Aedes aegypti* And *Anopheles stephensi*. *Parasitology Research*, 109(4), 1179–1187.
- [15] Suryawanshi, R. K., Patil, C. D., Borase, H. P., Narkhede, C. P., Salunke, B. K., & Patil, S. V. (2015). Mosquito Larvicidal And Pupaecidal Potential Of Prodigiosin From *Serratia marcescens* And Understanding Its Mechanism Of Action. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 123, 49–55.
- [16] Sagar, B. S. V., Deepak, B. S., Tejaswini, G. S., Aparna, Y., & Sarada, J. (2019). Evaluation Of Prodigiosin Pigment For Antimicrobial And Insecticidal Activities On Selected Bacterial Pathogens & Household Pests. *International Journal of Scientific Research in Biological Sciences*, 6(1), 96–102.
- [17] Hu, W., Zheng, R., Liao, Y., Kuang, F., Yang, Z., Chen, T., & Zhang, N. (2021). Evaluating The Biological Potential Of Prodigiosin From *Serratia marcescens* KH-001 Against Asian Citrus Psyllid. *Journal of Economic Entomology*, 114(3), 1219–1225.
- [18] Patil, N. G., Kadam, M. S., Patil, V. R., & Chincholkar, S. B. (2013). Insecticidal Properties Of Water Diffusible Prodigiosin Produced By *Serratia nematodiphila* 213c. *Current Trends in Biotechnology and Pharmacy*, 7(3), 773–781.
- [19] M. J. Brendell. (1975). *Handbooks For The Identification Of British Insects. Coleoptera: Tenebrionidae*. In: *Handbooks For The Identification Of British Insects* Royal Entomological Society Of London. London, United Kingdom, 22.
- [20] Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., Boukouvala, M. C., Mavroforos, M. E., & Kontodimas, D. C. (2015). Efficacy Of Alpha-Cypermethrin And Thiamethoxam Against *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) And *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) On Concrete. *Journal of Stored Products Research*, 62, 101–107.
- [21] Du Rand, N., & Laing, M. D. (2011). Determination Of Insecticidal Toxicity Of Three Species Of Entomopathogenic Spore-Forming Bacterial Isolates Against *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). *African Journal of Microbiology Research*, 5(16), 2222–2228.
- [22] Abbott, W. S. (1925). A Method Of Computing The Effectiveness Of An Insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265–267.
- [23] Adatia, A., Johnson, D., & Entz, S. (2010). Pathogenicity Of Two New Isolates Of *Metarhizium anisopliae* From Canadian Soil To *Melanoplus bivittatus* (Orthoptera: Acrididae) And *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *The Canadian Entomologist*, 142(2), 128–134.
- [24] Da Silva, S. M. B., Silva-Werneck, J. O., Falcão, R., Gomes, A. C., Fragoso, R. R., Quezado, M. T., Neto, O. B. O., Aguiar, J. B., De Sá, M. F. G., Bravo, A., & Monnerat, R. G. (2004). Characterization Of Novel Brazilian *Bacillus thuringiensis* Strains Active Against *Spodoptera frugiperda* And Other Insect Pests. *Journal of Applied Entomology*, 128(2), 102–107.
- [25] Reay, S. D., Brownbridge, M., Gicquel, B., Cummings, N. J., & Nelson, T. L. (2010). Isolation And Characterization Of Endophytic *Beauveria* Spp. (Ascomycota: Hypocreales) From *Pinus radiata* In New Zealand Forests. *Biological Control*, 54(1), 52–60.
- [26] Eski, A., & Gezgin, M. M., (2022). Susceptibility Of Different Life Stages Of *Tenebrio Molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) To Indigenous Entomopathogenic Fungi. *Journal of Stored Products Research*, 98, 102008.
- [27] Liang, T. W., Chen, S. Y., Chen, Y. C., Chen, C. H., Yen, Y. H., & Wang, S. L. (2013). Enhancement Of Prodigiosin Production By *Serratia Marcescens* TKU011 And Its Insecticidal Activity Relative To Food Colorants. *Journal of Food Science*, 78(11), M1743–M1751.
- [28] Zhou, W., Li, J. H., Chen, J., Liu, X. Y., Xiang, T. T., Zhang, L., & Wan, Y. J. (2016). The Red Pigment Prodigiosin Is Not An Essential Virulence Factor In Entomopathogenic *Serratia Marcescens*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 136, 92–94.

Araştırma Makalesi - Research Article

Ses Emisyonu Yarık Boyutlarının Hafif Agregalı Kâgir Blokların Ses Yutum Özelliklerine Etkisi

Effect of Sound Emission Slit Dimensions on Sound Absorption Properties of Lightweight Aggregate Masonry Blocks

Lütfullah Gündüz¹, Şevket Onur Kalkan^{2*}

Geliş / Received: 02/03/2022

Revize / Revised: 14/12/2022

Kabul / Accepted: 14/12/2022

ÖZ

Ses yalıtımı, ses dalgalarının bir malzemeden içeri girmesini önlemek için bir tür önlemdir. İyi ölçüde ses emici malzemelerin hafif, gevşek ve gözenekli yapıda ürünler oldukları bilinmektedir. Bu çalışmada, hafif agregalı ve boşluklu beton blokların ses yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesi için yeni bir tasarım yaklaşımı sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, pomza ve volkanik tüf beton blok üretiminde hafif agrega olarak kullanılmıştır. Özel tasarıma sahip alternatif ses emici ortamların oluşturulduğu kâgir blok örneklerinin akustik özellikleri model örnekler üzerinde analiz edilmiştir. Özellikle, tasarımında Helmholtz rezonatör formunun oluşturulduğu ve 3 ayrı alternatif ses absorpsiyon için yarık genişliklerinin (12 mm, 16 mm, 20 mm genişliğinde) kâgir blok elemanın ses yutum performansına olan etkileri incelenmiştir. Hafif beton blokların geometrik tasarımı, üç sıra boşluklu olarak tasarlanmış ve ses yutma kapasitesini artırmak için kenardaki bir sıra boşluğu kapatan beton yüzey boşluk hizasında üç farklı genişliklerde yarılarak bu kenardaki boşluklar açık boşluk haline getirilmiştir. Ayrı bir seri olarak, kâgir blokların ses yutma kapasitesini artırma amaçlı, polyester elyaf keçe takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu tasarım formlarına ait teknik bulgular da karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Çalışma bulgularına göre, blok tasarımındaki yarık genişliği büyüdükçe, Helmholtz rezonatör formundaki boşluk hacimlerine alınan ses miktarının arttığı ve dolayısıyla daha fazla ses soğurma işlevi gördüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, polietilen elyaf keçe takviyesi ile birlikte 16 mm yarık tasarımlı blokta 1.67 katlık, 20 mm yarık tasarımlı blokta ise 1.74 katlık ilave bir ses emicilik performansı sağlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler- *Hafif Agregalı, Kâgir Blok Tasarımı, Akustik, Ses Yutum, Ses Yalıtımı*

ABSTRACT

Sound insulation is a kind of measure to prevent sound waves from penetrating through a material. Good sound absorbing materials are known to be lightweight, loose, and porous products. In this study, a new design approach is presented to improve the sound insulation properties of lightweight aggregate concrete blocks. Within the scope of the study, pumice, and volcanic tuff were used as lightweight aggregates in the production of concrete blocks. The acoustic properties of the masonry block specimens, in which alternative sound absorbing environments with special design are created, were analyzed on the model specimens. In particular, the effects of 3 different slit widths (12 mm, 16 mm, 20 mm wide) on the sound absorption performance of the masonry block element, in which the Helmholtz resonator form was created in its design, were investigated. The geometry of the lightweight concrete blocks is designed with three rows of gaps, and on the outer facing of the block, 4 sound slits were created at 80%

¹İletişim: lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2487-467X>)

İnşaat Mühendisliği, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişimi: sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0250-8134>)

İnşaat Mühendisliği, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir, Türkiye

of the block height to increase the sound absorption capacity, and the gaps on these sides are turned into open gaps. In addition, the technical findings of the design forms of polyester fiber felt used as reinforcement material to increase the sound absorption capacity of the block were also discussed comparatively. According to the study findings, it has been determined that as the slit width in the block design gets larger, the amount of sound received into the cavity volumes in the form of Helmholtz resonator increases, and therefore it functions more as a sound absorber. In addition, with the polyethylene fiber felt reinforcement, an additional sound absorbing performance of 1.67 times is provided in the 16 mm slit block and 1.74 times in the 20 mm slit design block.

Keywords- Lightweight Aggregate, Masonry Block Design, Acoustic, Sound Absorption, Sound Insulation

I.GİRİŞ

İnşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılan elemanlarda yalıtım performansı denilince günümüzde ısı, su ve yangın yalıtımı kadar önemli bir diğer unsur akustik konfor ve ses yalıtımıdır. Ses yalıtımı, insan sağlığına olumsuz etkileri olan gürültünün zararlarını en aza indirmek için binalarda ve işyerlerinde sesin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla yapılan yalıtım türüdür. İçinde yaşadığımız tüm fiziki mekanlarda akustik konforun belirli prensipler dahilinde aranması, insan sağlığı ve psikolojisi açısından son derece önem kazanmaktadır. Bir binada akustik konforun sağlanmasında en önemli etkenlerin başında kullanılan her türev malzemenin ses yalıtımına yönelik parametrik değerleri ve performans göstergeleri gelmektedir [1-3]. Bu bağlamda, bir binada üstün derecelerde bir akustik konfor ortamı sağlanması arzu edildiğinde, binanın planlama ve projelendirilmesi önemli olduğu kadar, seçilecek malzemelerin detaylı akustik konfor özelliklerinin de etüt edilmesi ve akustik performans açısından birbiri ile uyumlu malzemelerin seçilmesi de bir o kadar önemlidir. Yapı malzemelerinin akustik konfor değerlendirmelerinde en önemli parametrelerin başında malzemenin ses yutma karakteristiğinin belirlenmesi gelmektedir. Bu özelliğin belirlenmesi için malzemenin farklı frekans değerlerinde ses yutum katsayı değerlerinin bilinmesi veya tanımlanması gerekmektedir [1-6]. Ancak, taşıyıcı ve/veya taşıyıcı olmayan duvar örgülerinde kullanılan kâgir blok elemanların ses yutum karakteristikleri üzerine literatürde yeterli düzeyde teknik bulgulara rastlanılamamaktadır. Özellikle iç mekânda akustik konfor koşullarının iyileştirilmesi projelerinde duvarı oluşturan kâgir birimlerin akustik amaçlı tasarımlarının geliştirilmesi önem arz eden bir durumdur. Literatürde akustik amaçlı farklı tasarım ve bileşenlerden oluşan bir dizi kâgir blok elemanının teknik performansları araştırmacılar veya kâgir blok üreticileri tarafından incelenmiştir [7-12]. Kâgir blok elemanlarının ses yutum performanslarının gelişimi, blok tasarım şekillerine bağlı olduğu kadar, bloğun üretiminde kullanılan agrega malzemelerin karakteristiği ile de doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada, hafif agrega olarak kullanılan pomza ve volkanik tuf agregalı özel tasarıma sahip alternatif ses emici ortamların oluşturulduğu kâgir blok örneklerinin akustik özelliklerini tecrübe etmek amacıyla model örnekler üzerinde yapılan incelemelerle analiz edilmiştir. Özellikle tasarımında Helmholtz rezonatör formunun oluşturulduğu ve 3 ayrı alternatif ses emisyon yarık genişliklerinin kâgir blok elemanının ses yutum performansına olan etkileri incelenmiş olup, ayrıca bloğun ses emisyonunu artırmak için polyester elyaf keçenin ilave takviye malzemesi olarak kullanılmış tasarım formlarına ait teknik bulgular da karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, hafif agregalı kâgir blok elemanlarının tasarımında elde edilecek blok harcı için pomza agrega ve volkanik tuf malzemeler, iki farklı agrega türü olarak değerlendirilmiştir. Blok harcı karışımlarında ana agrega malzeme olarak Nevşehir bölgesindeki ocaklardan temin edilen işlenmemiş doğal formdaki pomza agrega kullanılmıştır. Pomza agrega laboratuvar ortamında birincil bir çeneli kırıcıda kırılarak sınıflandırma işlemine tabi tutulmuştur. Hafif agregalı harç örneklerinin hazırlanması amacıyla pomza iki ayrı boyut fraksiyonu 2-4 mm ve 4-12 mm aralıklarına sınıflandırılarak kullanılmıştır. İki farklı boyut aralığındaki pomza agregaların etüv kurusu birim hacim kütle değerleri sırasıyla, 710 kg/m^3 ve 640 kg/m^3 'tür. Hafif agregalı kâgir blok örneklerinin hazırlanmasında ince agrega ve/veya dolgu materyali olarak ise volkanik tuf malzeme, Aksaray bölgesinden normal piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. Volkanik tuf malzeme ağırlıkça %34'ü 1 mm boyutun altında olacak formda 0-2 mm boyutuna sınıflandırılmış olup, etüv kurusu birim hacim kütle değeri ortalama 930 kg/m^3 'dür. Blok harcı hazırlanmasında CEM I 42.5R Portland çimento (özellik ağırlık değeri 3.15 g/cm^3) kullanılmış olup, su olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

B. Hafif Beton Tasarımı ve Örneklerin Hazırlanması

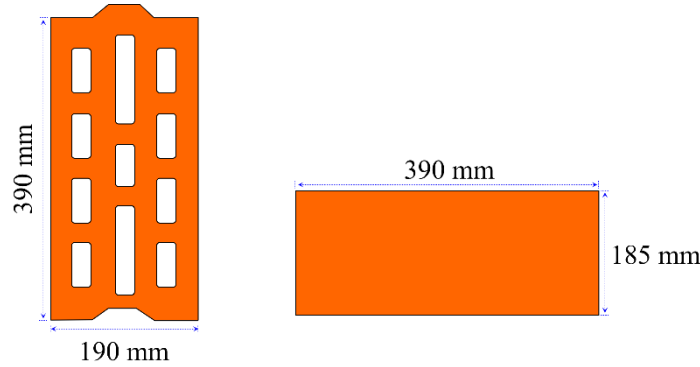
Pomza ve volkanik tüf agregalı kâgir blok harcı elde edilmesinde kullanılan hafif beton karışım tasarımı Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Hafif beton karışım tasarımı

Malzeme	Reçete ağırlıkça (%)	Reçete hacimce (%)
2-4 mm Pomza	21.34	22.35
4-12 mm Pomza	45.53	53.64
0-2 mm Volkanik Tüf	16.54	13.41
Çimento	16.59	10.60

Karışımında yer alan bağlayıcı eleman çimento da dahil tüm malzemeler öncelikle bir mikser ortamında karıştırılarak homojen bir kuru formda agrega karışımı elde edilmiştir. Daha sonra karışıma su/katı oranı 0.43 olacak şekilde su ilave edilerek 5 dakika karıştırmaya devam edilmiş ve düşük slump’lu kâgir blok üretimini mümkün kılacak bir kıvamda getirilmiştir. Bu çalışmada, kuru kıvam karışımı için sınır olarak 30 mm çökme değeri kullanılmıştır. Karıştırma işlemi sonrası kuru karışım kıvamındaki taze yaş harcın birim hacim kütle değeri 1242 kg/m^3 olup, priz almış kuru birim hacim kütle değeri ise 886 kg/m^3 ’tür. Çalışmada kullanılan tüm kâgir blok örneklerinin tasarımında bu karışım standart ve sabit değer olarak kullanılmıştır.

Hafif agregalı kâgir blok üretimi için normal piyasa koşullarında yaygın olarak görülen blok tasarımlarından farklı olarak 3 sıra boşluklu (4+3+4) 11 boşluk hacimli 190 mm x 390 mm x 185 mm (Genişlik, Uzunluk, Yükseklik) anma boyutlu bir blok formu referans blok tasarımı olarak ele alınmıştır (Şekil 1). Bu tasarımdaki blok elemanın alt tabanı kapalı formda olup, hacimsel boşluk oranı %21.44 ve üst yüzey alansal doluluk oranı da %26.22’dir. Bu tasarıma sahip blok elemanı için Çizelge 1’de belirtilen karışımlarda kalıplama, presleme ve 28 gün doğal ortam kürlenmesi süreçlerini kapsayan blok üretimi yapıldığında elde edilen kâgir bloğun kuru birim ağırlığı ortalama 9.55 kg ve brüt kuru birim hacim kütle ise 696 kg/m^3 ’tür. Bu geometrik form ve ağırlık değerlerine sahip blok tasarımları bu çalışma kapsamında kâgir blok test örnekleri olarak değerlendirilmiştir.

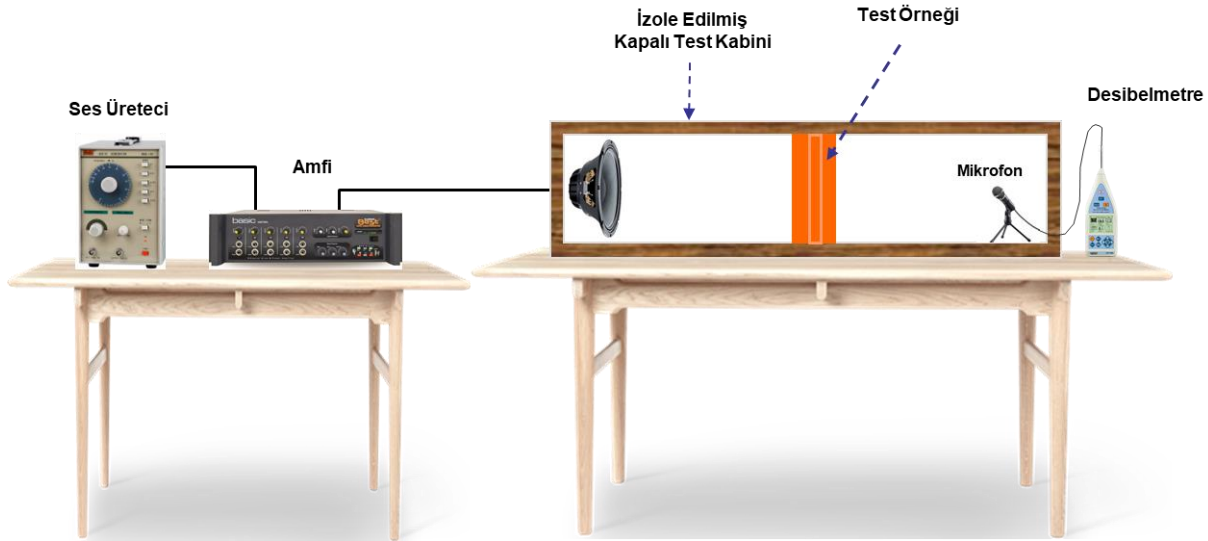


Şekil 1. Kâgir blok elemanı örneğinin genel geometrik formu (Referans blok elemanı)

C. Ses Yutum Katsayısı Analizi

Ses yutum katsayısının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ölçme yöntemi Empedans Tüp Yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntem TS EN ISO 10534-1 ve TS EN ISO 10534-2 standartlarında [13,14] öngörülen prensiplere göre ölçümler seçenekli olarak yapılabilir. Bu standartlardan TS EN ISO 10534-1’de ses yutum katsayısı ve empedansın tayini, duran dalga oranını kullanma metodu ile tanımlanırken, TS EN ISO 10534-2’de ise ses yutum katsayısı ve empedansın tayini aktarım fonksiyonu metoduna göre belirlenmektedir. Harç kombinasyonları için çoğunlukla tercih edilen metodoloji, duran dalga oranını kullanma metodu olarak bilinmektedir. Ancak, birebir boyutta ve boşluklu tasarıma da sahip olan bir kâgir blok örneği gerek boyutu ve gerekse heterojen yapısı sebebiyle bu yöntemlere uygun test numunesi hazırlanması mümkün olamamaktadır. Bu nedenle bu tür yapı elemanları için alternatif analiz yöntemleri uygulamak gerekmektedir. Bu çalışmada literatürde farklı tasarım bileşenlerine sahip malzemelerin ses yutum katsayı değerlerini belirlemeye yönelik standart dışı ve

yakınsak deneysel bir yöntem olarak da öngörölmüş “desibel düşüşü” yöntemi [15,16], kâgir blok tasarımlarının ses yutum katsayısı değerlerinin belirlenmesinde bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımda, oluşturulan izole edilmiş bir ses kabini içerisinde kabini ikiye ayıran bir bölme birim yer alıp, bu bölme birim üzerinde ses ölçümü yapılacak malzemenin yerleştirilmesi için uygun açıklıkta bir boş alan yer almaktadır (Şekil 2). Kabinin bir tarafında ses kaynağı, diğer tarafında ise ses analizörü bulunmaktadır. Öncelikle ses kaynağı ölçümü yapılacak önceden belirlenmiş bir frekansa ayarlanarak aktif hale getirilir ve kabinin diğer bölümündeki ses analizörü ile açıklıktan gelen ses basınç seviyesi (SBS) desibel (dB) cinsinden bu frekans değerindeki referans fon ölçüm değeri ($R_{i,ref}$) olarak kaydedilir. Sonrasında, hazırlanmış test örneği ara bölmede oluşturulmuş boşluk alana ses sızdırmaz bir konumda yerleştirilir ve ses kaynağı fon ölçümünde kullanılmış eşdeğer frekans değerinde tekrar çalıştırılarak, test örneğinin bu frekans değerindeki test fon ölçüm değeri ($R_{i,test}$) olarak kaydedilir. Referans fon ölçüm değeri ile test fon ölçüm değeri arasındaki ses basınç seviyesi farkı, ölçümü yapılan bu frekans değeri için Desibel Düşüşü (ΔR) olarak tanımlanır. Desibel düşüşü ($\Delta R = R_{i,ref} - R_{i,test}$) dB cinsinden hesaplanır. Belirlenen desibel düşüş değeri, Eşitlik 1 ve 2’de belirtilen [15,16] ampirik formül ile test örneğinin bu frekans değerindeki ses azaltma katsayısı olarak hesaplanır. Bu yaklaşıma göre hesaplanan değer, test örneğin ses yutum katsayısı (α) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Ses ölçüm düzeneğinin sembolik görünümü

$$\alpha = 1 - 10^{-\Delta R/20} \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - 10^{-[(R_{i,ref} - R_{i,test})/20]} \quad (2)$$

Burada; α , test örneğinin ses yutum (azaltma) katsayısı; ΔR , iki fon ölçümü arasındaki desibel düşüş değerini (dB) göstermektedir.

Test örneğinin 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz aralığında her bir frekans değeri için sırasıyla tekrarlamalı olarak fon ölçümleri ve hesaplamalar yapılmıştır. Bu metodolojiye göre hafif agregalı kâgir blok örnekleri için 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz aralığında belirlenen yutum katsayısı değerlerinden ASTM C423 standardında öngörülen Gürültü Azaltma Katsayısı (NRC) değeri 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekanslarındaki ses yutum katsayılarının ortalaması olarak hesaplanmıştır (Eşitlik 3) [17,18].

$$NRC = (\alpha_{250 \text{ Hz}} + \alpha_{500 \text{ Hz}} + \alpha_{1000 \text{ Hz}} + \alpha_{2000 \text{ Hz}})/4 \quad (3)$$

Gürültü azaltma katsayısının (NRC) tanımında dikkate alınan frekans bantları, gürültü kontrolü açısından önemli olan frekans bantlarını kapsamaktadır. Bu nedenle, NRC değeri bilinen iki malzemeden, daha büyük değere sahip olanın, genelde daha iyi ses yutumu sağladığı söylenebilir. NRC değerinin “0” değeri, malzemenin mükemmel yansıtıcılık özelliğini temsil ederken, NRC’nin “1” değeri ise, malzemenin mükemmel ses soğuruculuk özelliğini temsil eder. NRC derecelendirmeleri, ses yutucu bir malzemeyle temas eden ve iç mekâna geri yansıtılmayan sesin yüzdesi olarak yorumlanabilmektedir. Örneğin, NRC=0.65’lik bir Gürültü Azaltma Katsayısı, ses dalgalarının %65’inin malzeme tarafından emildiğini, %35’lik kısmının ise yansıtıldığını gösterir. Malzemeler ses emicilik davranışlarına göre sınıflandırılabilir.

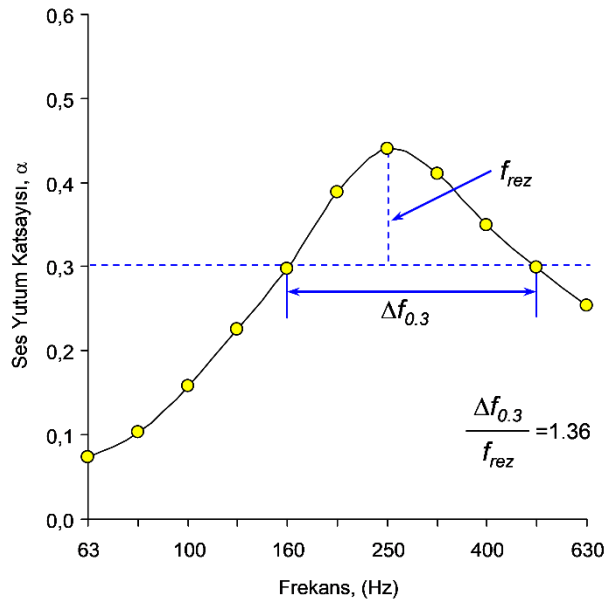
III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

A. Standart Kâgir Blok Formunun Akustik Özellikleri

Tasarımında akustik amaçlı Helmholtz rezonatörü oluşturulmamış dış kenar hatlı kapılı formda hafif agregalı 3 sıra boşluklu kâgir blok elemanı tasarımı bu çalışmada referans kâgir blok örneği olarak tanımlanmıştır. Referans kâgir blok elemanı örneklerinin 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı (absorpsiyon katsayısı) değişimi desibel düşüşü yöntemine göre analiz edilmiştir. Analiz bulguları örnek bir değerlendirme olarak Tablo 2’de verilmiştir. Blok örneğinin ses yutum performansının daha detay irdelenmesi amacıyla absorpsiyon spektrumu ve frekans bant genişliği ilişkisi rezonans bölgesi bağlamında Şekil 3’te gösterilmiştir.

Tablo 2.Referans kâgir blok elemanı örneği için desibel düşüşü yöntemine göre bulgular.

Frekans (Hz)	Referans Fon Ölçümü $R_{i,ref}$ (dB)	Test Fon Ölçümü $R_{i,test}$ (dB)	Fon Ölçümleri Farkı $\Delta R = R_{i,ref} - R_{i,test}$	$\alpha = 1 - 10^{-(\Delta R/20)}$ Ses Yutum Katsayısı
63	84.2	83.5	0.66	0.07
80	85.3	84.4	0.94	0.10
100	87.1	85.6	1.50	0.16
125	89.3	87.1	2.21	0.23
160	87.4	84.3	3.06	0.30
200	85.8	81.5	4.28	0.39
250	89.8	84.8	5.04	0.44
315	90.2	85.6	4.58	0.41
400	83.6	79.9	3.74	0.35
500	88.6	85.5	3.10	0.30
630	89.2	86.7	2.55	0.25
800	92.2	89.8	2.40	0.24
1000	92.7	90.1	2.57	0.26
1250	94.1	91.2	2.90	0.28
1600	92.7	89.5	3.20	0.31
2000	87.9	84.6	3.31	0.32
2500	88.8	85.5	3.29	0.32
3150	82.3	79.3	2.97	0.29
4000	90.1	87.6	2.46	0.25
5000	93.4	91.1	2.30	0.23
6300	94.8	92.5	2.30	0.23

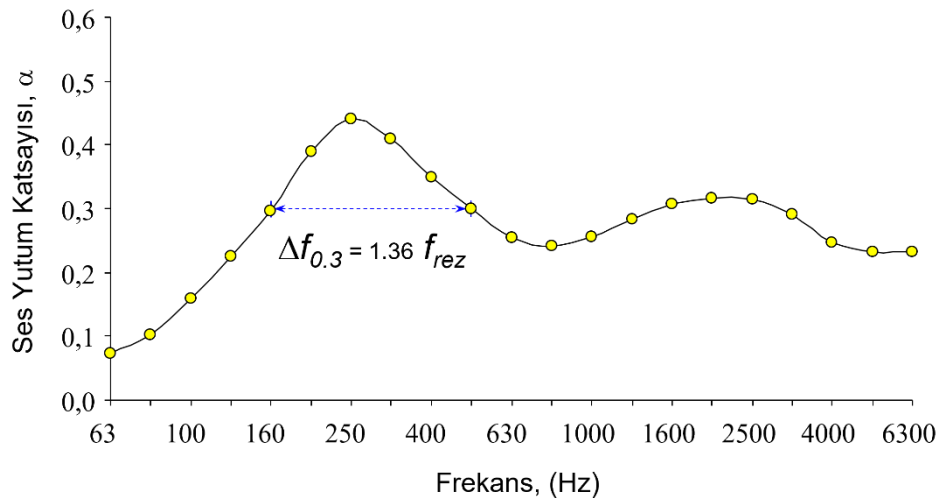


Şekil 3. Referans blok için rezonans bölgesi analizi

Düşük frekans bölgelerinde referans blok elemanının ses yutum katsayısı 0.07 – 0.44 aralığında değişmektedir. Referans blok örneğinin kütle ağırlığı (m^2 ağırlığı) 135.3 kg/m^2 ve ses azaltım indisi (ses geçiş kaybı) bağlamında belirlenen kritik frekans değeri ise 117 Hz'dir. Ancak, ses yutum katsayısı performansında 250 Hz frekans değerinde $\alpha=0.44$ 'lük değer ile tepe noktasını oluşturmaktadır. 250 Hz frekans değerinden sonra 800 Hz değerine kadar lineer bir eğilimle ses yutum katsayısının azalarak 0.24 değerine kadar düştüğü görülmektedir. 800 Hz frekans değerinin üzerindeki yüksek ses frekans bölgesinde ise α değeri 0.26 – 0.32 aralığında değişim göstermektedir. Bu bulgu, hafif agregalı referans blok örneğinin özellikle düşük frekans bölgesinde ses yutumu açısından daha etkin bir performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır. Referans blok örneğinin tasarım formu itibarıyla mükemmel akustik emiciliği bant genişliğinin 160 Hz ile 500 Hz frekans aralığında olduğu dikkat çekmektedir. Frekans – ses yutum katsayısı ilişkisi grafiksel olarak Şekil 4'de gösterilmiştir.

Frekans (Hz)	Ses Yutum Katsayısı
63	0,07
80	0,10
100	0,16
125	0,23
160	0,30
200	0,39
250	0,44
315	0,41
400	0,35
500	0,30
630	0,25
800	0,24
1000	0,26
1250	0,28
1600	0,31
2000	0,32
2500	0,32
3150	0,29
4000	0,25
5000	0,23
6300	0,23

NRC= 0,33



Şekil 4. Kâgir blok elemanı örneklerinin ses yutum katsayısı analizi (kontrol değerleri)

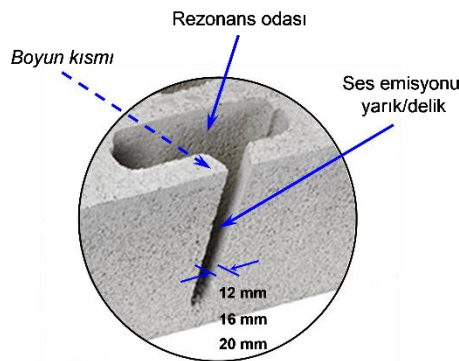
Rezonans bölgesinde görüldüğü gibi blok örneğinin $\alpha=0.30$ 'luk ses yutum değerlerini sağlayan bölge aralığında ses emicilik performansının maksimum değerlere ulaşmaktadır. Bu frekans bant aralığında oluşan

maksimum ses yutum değerine karşılık gelen frekans değeri “rezonans frekansı (f_{rez})” olarak tanımlanabilmektedir. Hafif agregalı kâgir blok elemanın ses yutma performansının irdelenmesinde bu absorpsiyon bant genişliği ($\Delta f_{0.3}$) ile rezonans frekansı (f_{rez}) arasında oluşturulan orantısal ilişki ($\Delta f_{0.3}/f_{rez}$), bu çalışmada akustik tasarımları farklı olan diğer blok örneklerinin değerlendirmelerinde bir karşılaştırma kriteri olarak ele alınmıştır. Bu parametre bağlamında, referans kâgir blok örneğinin değeri $\Delta f_{0.3}= 1.36f_{rez}$ ’dir. Diğer bir deyişle $\alpha=0.3$ ses yutum değeri sağlanması için rezonans bölgesinde etkin frekans bant genişliği, rezonans frekans değerinin %36 fazlasıdır (Şekil 4). Hafif agregalı kâgir blok elemanlarında bu oransal değer ne kadar büyükse, düşük frekans bölgesinde ses emicilik özelliğinin de o ölçekte gelişmiş olduğu öngörülebilir.

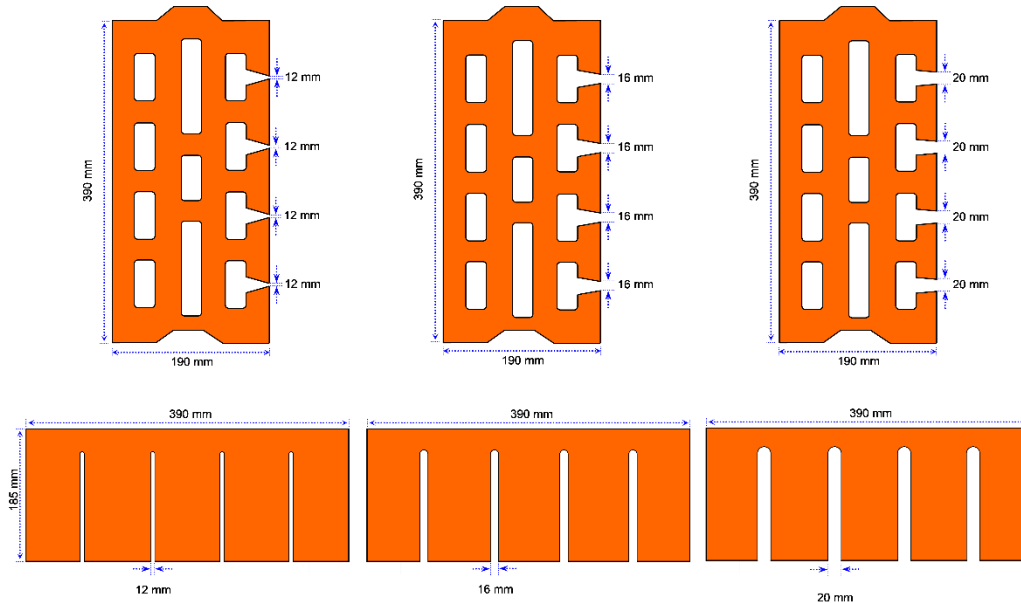
Gürültü kontrolü ve ses yalıtımı amaçlı yapı elemanı olarak kullanılan malzemelerin ses dalgalarının malzeme içerisine girmesini, yayılmasını, sürtünme yoluyla ses enerjisinin sönmülmesini sağlayacak bir matris yapısına sahip olması gerekmektedir. Gürültü azaltma katsayısı (NRC), test edilen malzemenin ses yutum kalitesini gösteren tek bir sayı indeksidir. Bu katsayı, belirli bir yüzeye vurma üzerine emilen ses enerjisinin miktarını ve ortalama değer bağlamında bir absorpsiyon katsayısını temsil etmektedir. NRC; 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz ve 2000 Hz frekanslarda ölçülen ses yutum katsayılarının aritmetik ortalamasının en yakın değere 0.05’lik yuvarlanması ile belirlenmiştir. NRC değerleri akustik açıdan malzemeler arasında yakınsak bir karşılaştırma yapılmasını sağlayan pratik bir ölçü olarak kabul edilebilmektedir [17]. Blok örneğinin Gürültü Azaltma Katsayısı $NRC=0.33$ olarak hesaplanmıştır. DIN EN ISO 11654 standardında [19] öngörülen ses emici sınıfına göre “E” kategoride yer almaktadır. Bu değere göre blok elemanı yüzeyine gelen ses dalgalarının %33’ünün kâgir blok elemanı tarafından emildiğini, %67’lik kısmının ise ortama geri yansıtıldığını gösterir. Geri yansıtılan ses dalgalarının oransal değerinin daha düşük bir düzeye indirgenmesi için, blok elemanın tasarımında ses yutma performansını iyileştirilmesini sağlayacak alternatif tasarım değişikliklerinin yapılması gerekmektedir.

B. Ses Emisyon Yarık Boyutunun Ses Yutum Özelliğine Etkisi

Hafif agregalı referans kâgir blok elemanın ses emicilik ve akustik özelliklerinin iyileştirilmesi ve de karşılaştırılmalı tasarım değişkenlerinin etkinliğini belirlemek amacıyla, blok elemanı tasarımında bloğun alın kısmına bakan dış hatıda blok yüksekliğinin %80’lik kısmında 4 adet ses emisyon yarığı oluşturulmuştur (Şekil 5). Oluşturulan bu yarıklar ile blok tasarımında yer alan ilk sıra boşluk hacimleri arası alan açılarak, her bir boşluk hacmi ortamı için Helmholtz rezonatörü formu oluşturulmuştur. Blok tasarımdaki bu yarıklar geometrik olarak Helmholtz rezonatörünün boyun kısmı bölgesindeki ses emisyonu yarıklarının genişliğini ve bloğun dış hatıl et kalınlığı ses emisyonu yarık derinliğini oluşturur. Bloğun bu alın tarafındaki ilk sıra boşluk hacimleri ise rezonans odası hacmini temsil etmektedir. Helmholtz rezonatörü formu oluşturulmuş tüm blok tasarımlarında boyun kısmı bölgesinde blok elemanlarının ses emisyonu yarık derinliği 27 mm ve rezonans odası hacimleri ise 244.4 cm³ sabit değer olarak tasarlanmıştır. Referans kâgir blok elemanın tasarımında sırasıyla 12 mm, 16 mm ve 20 mm olarak oluşturulan 3 ayrı yarık genişliğinde blok örneklerinin ses yutum katsayı değerleri 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığındaki değişimi analiz edilmiştir. Farklı yarık boyutlarında tasarlanan blok örneklerinin sembolik görünümü Şekil 6’da verilmiştir.

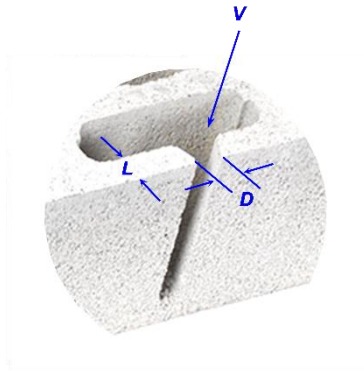


Şekil 5. Ses emisyonu yarık boyutu ve Helmholtz rezonatörü formu sembolik görünümü



Şekil 6. Farklı yarık boyutlarında tasarlanan blok örneklerinin sembolik görünümü

Çok farklı akustik özelliklere sahip önemli bir rezonatör türü, Alman fizikçi Hermann von Helmholtz'un adını taşıyan Helmholtz rezonatörüdür [8,9]. Kâgir blok tasarımında oluşturulan bu rezonatör formları, küçük açıklıklı yarık şekilli boynu olan içi boş hacimli Helmholtz rezonatörler şeklinde olup, bu yarıklardan ortamda yer alan sesin boşluk hacmine girmesine izin vermek için genellikle huni şeklindedir. Boşluk hacmi içerisine alınan ses, Helmholtz rezonatörünün prensibine dayanarak ses enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü şeklinde soğrulma işlevi görebilirler. Blok elemanındaki rezonatörün geometrik formuna bağlı bir rezonans frekansı (f_{rez}) mevcuttur. Rezonans frekansı, genellikle Eşitlik 4'te verilen yaklaşımla tanımlanabilmekte olup (Şekil 7), bu rezonans frekansına yakın frekans değerlerinde Helmholtz rezonatörü en yüksek ses yutma değerini sağlar. Helmholtz rezonatörü en çok düşük ve orta frekanslarda etkili sonuçlar sağlayabilmektedir.



Şekil 7. Kâgir blok tasarımında Helmholtz rezonatör parametreleri

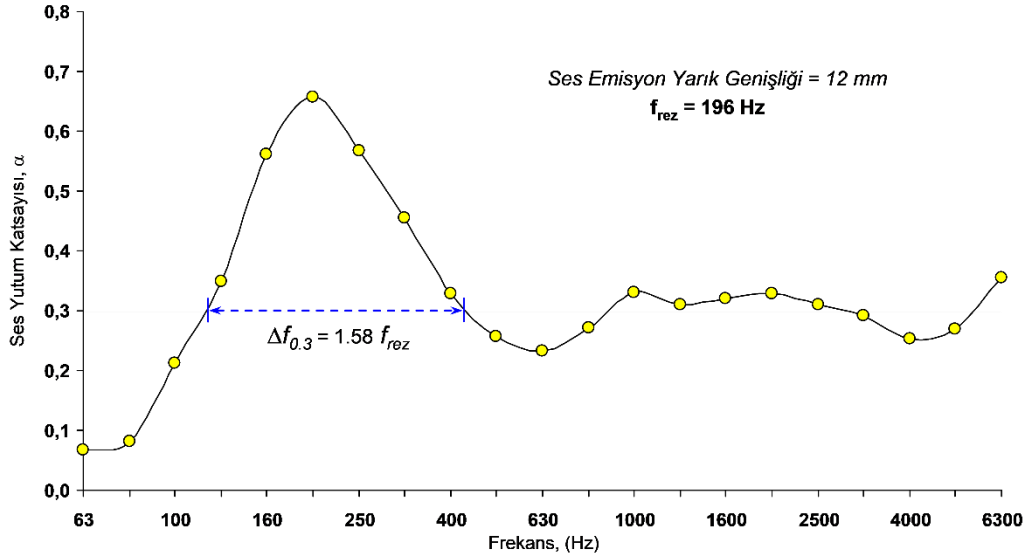
$$f_{rez} = \frac{c_s D}{4} \sqrt{\frac{1}{\pi V (L + 0.75 D)}} \quad (4)$$

Burada; c_s , ses hızı (344000 mm/s); D , ses emisyon yarık genişliği (mm); L , ses emisyon yarık derinliği (mm) ve V , rezonans odası hacmini (mm^3) temsil etmektedir.

Ses emisyonu yarık genişliği 12 mm olan hafif agregalı akustik kâgir blok örneğinin kütle ağırlığı (m^2 ağırlığı) 133 kg/m^2 ve Eşitlik 4'e göre hesaplanmış rezonans frekans değeri $f_{rez}=196 \text{ Hz}$ 'dir. Blok örneklerinin 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı (absorpsiyon katsayısı) değişimi analiz edilmiş olup, bulgular Şekil 8'de verilmiştir.

Frekans (Hz)	Ses Yutum Katsayısı
63	0,07
80	0,08
100	0,21
125	0,35
160	0,56
200	0,66
250	0,57
315	0,46
400	0,33
500	0,26
630	0,23
800	0,27
1000	0,33
1250	0,31
1600	0,32
2000	0,33
2500	0,31
3150	0,29
4000	0,25
5000	0,27
6300	0,36

NRC= 0,37



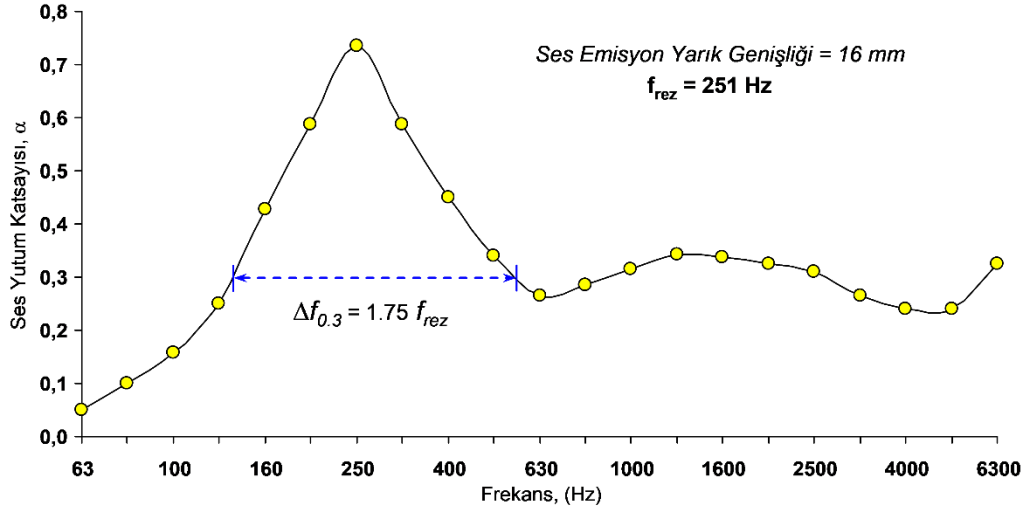
Şekil 8. Frekans – ses yutum katsayısı ilişkisi (ses emisyon yarık genişliği: 12 mm)

Rezonans frekansı 196 Hz değerinde $\alpha=0.67$ olarak belirlenmiştir. Düşük frekans bölgesinde rezonans frekans değerine kadar olan bant değişiminde ses yutum performansı 0.07'den 0.67 değerine kadar gelişim göstermektedir. Ancak, bu frekans değerinden sonra 630 Hz frekans değerine kadar $\alpha=0.23$ 'e düşmektedir. Yüksek frekans bölgesinde ise $\alpha=0.27 - 0.36$ aralığında değişim göstermektedir. Referans blok örneği için bu çalışmada öngörülmuş $\alpha=0.3$ 'lük absorpsiyon bant genişliği değeri ile mukayese edildiğinde, 12 mm'lik ses emisyon yarık genişliğinde $\Delta f_{0.3}=1.58f_{rez}$ 'dir. Bu yaklaşım, referans bloğun rezonans bölgesinde etkin ses emicilik performansına göre yaklaşık %12 daha gelişmiş olduğunu gösterir. Diğer bir irdeleme bulgusu olarak, 12 mm'lik ses emisyon yarık genişliğinde blok örneğinin gürültü azaltma katsayısı $NRC_{12mm}=0.37$ olarak hesaplanmıştır. Referans blok örneğine benzer şekilde bu blok tasarımı da DIN EN ISO 11654 standardında [19] öngörülen ses emici sınıfına göre "E" kategoride yer almaktadır. Ancak, referans blok tasarımına göre gürültü azaltma performansı olarak da yaklaşık %12 daha yüksek bir emilim değerine sahiptir.

Blok elemanı tasarımında ses emisyon yarık genişliği artırıldığında, blok örneğinin ses yutum ve akustik performansındaki gelişimin irdelenmesi amacıyla ses emisyonu yarık genişliği 16 mm ve 20 mm olan hafif agregalı akustik kâgir blok örneklerinin analizi yapılmıştır. Blok örneklerinin 16 mm ve 20 mm yarık genişliği değerlerinde kütle ağırlıkları (m^2 ağırlıkları) sırasıyla 132 kg/m^2 ve 131 kg/m^2 'dir. Eşitlik 4'e göre hesaplanmış rezonans frekans değerleri de 16 mm ve 20 mm yarık genişliği için sırasıyla $f_{rez,16mm}=251$ Hz ve $f_{rez,20mm}=303$ Hz'dir. Blok tasarımında ses emisyon yarık genişliği arttıkça, rezonans frekans değeri de artmaktadır. Bu da rezonans bölgesinde ses emicilik özelliğinde daha etkin olacağını çağrıştırmaktadır. 16 mm ve 20 mm yarık genişlikli blok örneklerinin 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı değişimi analiz edilmiş olup, bulgular Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.

Frekans (Hz)	Ses Yutum Katsayısı
63	0,05
80	0,10
100	0,16
125	0,25
160	0,43
200	0,59
250	0,73
315	0,59
400	0,45
500	0,34
630	0,27
800	0,28
1000	0,32
1250	0,34
1600	0,34
2000	0,32
2500	0,31
3150	0,27
4000	0,24
5000	0,24
6300	0,32

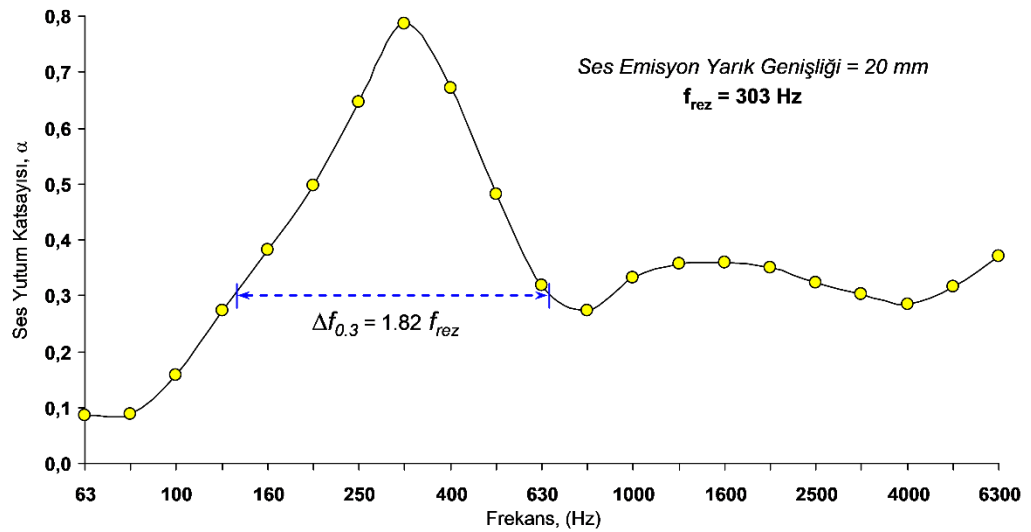
NRC= 0,43



Şekil 9. Frekans – ses yutum katsayısı ilişkisi (ses emisyon yarık genişliği: 16 mm)

Frekans (Hz)	Ses Yutum Katsayısı
63	0,09
80	0,09
100	0,16
125	0,27
160	0,38
200	0,50
250	0,65
315	0,79
400	0,67
500	0,48
630	0,32
800	0,27
1000	0,33
1250	0,36
1600	0,36
2000	0,35
2500	0,32
3150	0,30
4000	0,29
5000	0,32
6300	0,37

NRC= 0,45



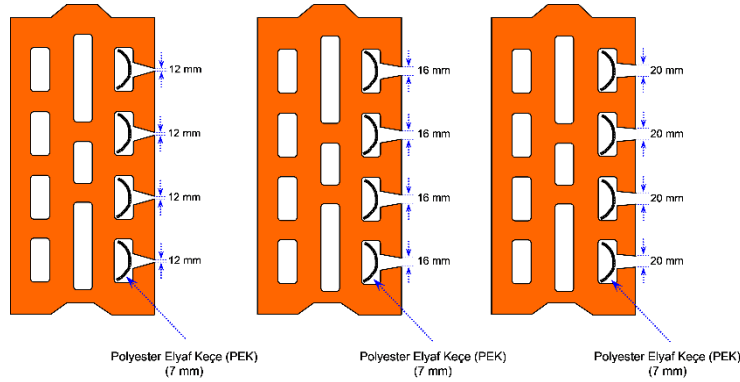
Şekil 10. Frekans – ses yutum katsayısı ilişkisi (ses emisyon yarık genişliği: 20 mm)

Rezonans frekansı değerlerinde 16 mm yarık açıklığındaki bloğun maksimum ses yutum katsayısı $\alpha=0.73$ iken 20 mm yarık açıklığındaki bloğun maksimum ses yutum katsayısı ise $\alpha=0.80$ 'dir. 12 mm'den 20 mm'ye değişen ses emisyon yarık genişliğindeki artış, ses yutum katsayı değerlerinde her bir yarık genişliği artışında sırasıyla %8.9 - %9.6 oranında gelişim göstermiştir. Blok tasarımındaki yarık genişliği büyüdükçe, Helmholtz rezonatör formundaki boşluk hacimlerine alınan ses miktarının arttığını ve dolayısıyla daha fazla ses soğurma işlevi gördüğünü temsil etmektedir. Bununla birlikte, yüksek frekans bölgelerinde de yarık genişliğine bağlı olarak ses yutumu daha düşük düzeyde de olsa bir performans artışı olduğu görülmektedir. Referans blok örneği için bu çalışmada öngörülmiş $\alpha=0.3$ 'lük absorpsiyon bant genişliği değeri ile mukayese edildiğinde, 16 mm'lik ses emisyon yarık genişliği için $\Delta f_{0,3}=1.75f_{rez}$ ve 20 mm'lik ses emisyon yarık genişliği için ise $\Delta f_{0,3}=1.82f_{rez}$ 'dir. Blok tasarımındaki 16 mm'lik yarık genişliği, referans bloğa göre rezonans bölgesinde yaklaşık %28.7'lik daha etkin bir ses emicilik performansına sahiptir. Benzer şekilde, 20 mm'lik yarık genişliği ise referans bloğa göre rezonans bölgesinde yaklaşık %33.8'lik daha etkin bir ses emicilik performansına sahiptir. Buradan da görüleceği üzere ses

emiyon yarık genişliği, kâgir bloğun akustik performans tasarımında önemli bir faktör olmakta ve blok elemanında arzu edilen akustik değerin sağlanabilmesi için tasarımda boyutlandırmanın önemle ve özenle yapılması kaçınılmaz olmaktadır. Diğer bir irdeleme bulgusu bağlamında, 16 mm ve 20 mm'lik ses emiyon yarık genişliklerinde gürültü azaltma katsayısı sırasıyla $NRC_{16mm}=0.43$ ve $NRC_{20mm}=0.45$ olarak hesaplanmıştır. Blok elemanlarının ses yutum performansı artmasına rağmen, her iki blok tasarımının da DIN EN ISO 11654 standardında [19] öngörülen ses emici sınıfına göre kategorileri değişmemiş olup, "E" kategoride yer almaktadır. Ancak, referans blok tasarımına göre gürültü azaltma performansları önemli ölçüde artış göstererek 16 mm ve 20 mm yarık açıklığı için sırasıyla %30.3 ve %36.4 oranlarında artmıştır.

C. İlave Ses Emici Takviyeli Kâgir Blok Tasarımının Ses Yutum Özellikleri

Hafif agregalı Helmholtz rezonatör formu tasarımına sahip olan kâgir blok elemanlarının ses emicilik özelliklerinin düşük ve orta frekans bölgelerinde etkin bir değer taşıdığı görülmüştür. Blok tasarımının yüksek frekans bölgelerinde de ses yutum özelliklerinin mevcut tasarıma göre iyileştirilebilmesi amacıyla Helmholtz rezonatör formunu oluşturan boşluk hacimleri içeresine ses soğuruculuk özelliği taşıyan gözenekli malzemeler yerleştirilerek akustik özelliği geliştirilebilmektedir. Bu özelliğin sağlanabilmesi için bu çalışma kapsamında blok örneklerinin rezonatör görevi gören her bir boşluk hacmi içeresine normal piyasa koşullarından tedarik edilen ortalama yoğunluğu $100\pm 10 \text{ kg/m}^3$ ve 7 mm kalınlıkta polyester elyaf keçe (PEK) malzeme dış bükey (konveks) form oluşturacak şekilde yerleştirilerek, ilave ses emici takviyeli kâgir blok tasarımı oluşturulmuştur. Bu yalıtım takviye elemanı (PEK), geri dönüşümünden elde edilen sentetik elyafların harmanlanarak, kolay uygulanabilir dokumasız kumaş (nonwoven) işleme yöntemi ile sıkıştırılarak uygulanabilir kalınlığa getirilmiş kimyasal katkı maddesi içermeyen ses izolasyonu amaçlı kullanılan bir malzemedir. PEK yalıtım malzemesinin inşaat sektörü haricinde otomotiv sektörü ve beyaz eşya sektöründe de nonwoven ürünler olarak akustik amaçlı kullanımı yaygın olarak görülebilmektedir. Yalıtım takviyeli kâgir blok elemanının tasarımında sırasıyla 12 mm, 16 mm ve 20 mm olarak oluşturulan 3 ayrı yarık genişliğinde blok örneklerinin ses yutum katsayı değerleri 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığındaki değişimi analiz edilmiştir. PEK takviyeli blok örneklerinin sembolik görünümü Şekil 11'de verilmiştir.

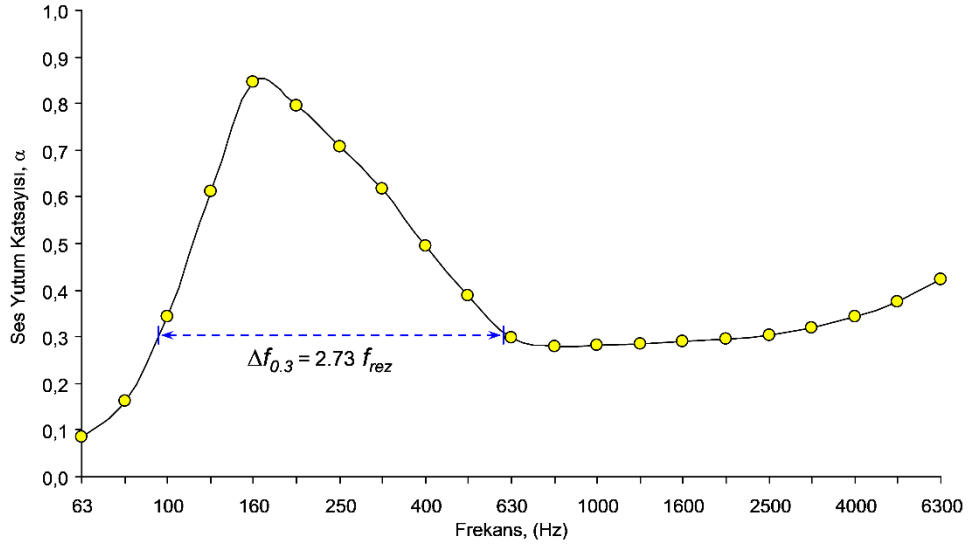


Şekil 11. PEK takviyeli blok örneklerinin sembolik görünümü

Rezonans frekans değeri $f_{rez}=196$ Hz olarak belirlenmiş olan 12 mm ses emiyonu yarık genişliğinde hafif agregalı akustik kâgir blok örneğine dış bükey formda ortalama 7 mm kalınlığında PEK malzeme takviyesi yerleştirildikten sonra 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı değişimi analiz edilmiş olup, bulgular Şekil 12'de verilmiştir.

Frekans (Hz)	Ses Yutum Katsayısı
63	0,08
80	0,16
100	0,34
125	0,61
160	0,85
200	0,80
250	0,71
315	0,62
400	0,50
500	0,39
630	0,30
800	0,28
1000	0,28
1250	0,28
1600	0,29
2000	0,30
2500	0,30
3150	0,32
4000	0,34
5000	0,38
6300	0,42

NRC= 0,42



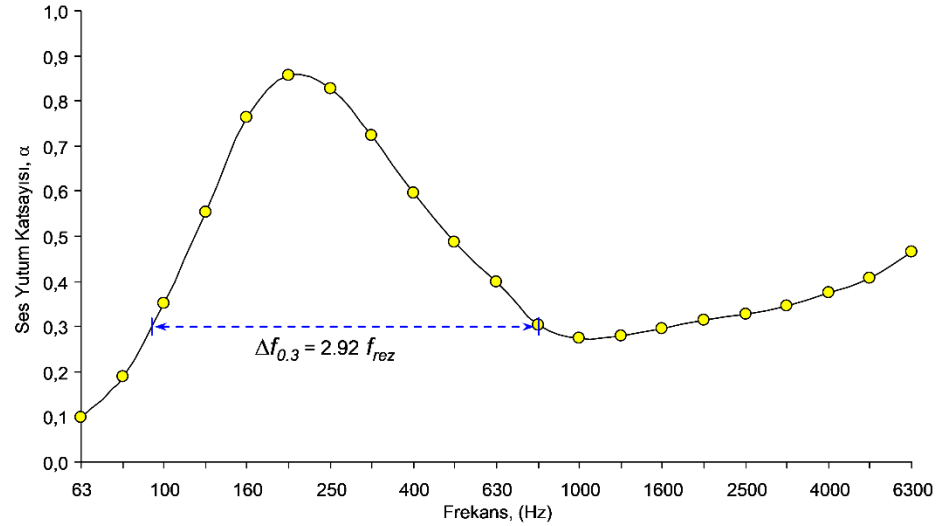
Şekil 12. Frekans – ses yutum katsayısı ilişkisi (PEK takviyeli 12 mm yarı genişlikli blok)

12 mm ses emisyonu yarı genişliğine sahip hafif agregalı blok örneğinin PEK takviyesi yapılmadan önce rezonans frekans değerinde belirlenmiş $\alpha=0.67$ 'lik değer, PEK takviyesi ile $\alpha=0.80$ seviyesine ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte düşük frekans bölgesinde belirlenen en yüksek $\alpha=0.85$ olup, bu frekans bant genişliğinde blok tasarımının yaklaşık %29 daha fazla ses emici bir özellik kazandığı görülmüştür. Buradaki artışın sebebi, ses enerjisinin bir kısmının blok tasarımındaki Helmholtz rezonatör formu ve PEK malzemenin nonwoven dokusu ve gözeneklerinde ısı enerjisine dönüşümüyle soğurulmasına bağlanabilir. Blok tasarımındaki bu iyileşmenin bir diğer bulgusu ise, düşük ve orta frekans bölgelerinde α değerlerinin PEK takviyesiz formuna kıyasla daha yüksek ses emme değerlerine sahip olduğudur. Bunun bir sonucu olarak, blok tasarımının PEK takviyesiz formu için elde edilen $\Delta f_{0,3} = 1.58 f_{rez}$ 'lik değer, PEK takviyesiyle birlikte $\Delta f_{0,3} = 2.73 f_{rez}$ değerine yükseldiği görülmektedir. Bu da PEK takviyesinin bu tasarım formu için rezonans bölgesinde yaklaşık 1.73 kat daha etkin ses emicilik performansına sahip olduğunu temsil eder. Ayrıca, referans blok örneğine göre ise bu etkinlik değerinin yaklaşık 2 kat daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Yüksek frekans bölgesinde ise genel olarak ses emicilik değerinin PEK takviyesiyle birlikte arttığı da görülmektedir. Diğer bir irdelemede, 12 mm'lik ses emisyon yarı genişliğinde blok örneğine PEK takviyesi yapıldıktan sonra gürültü azaltma katsayısı $NRC_{12mm+PEK}=0.42$ olarak hesaplanmıştır. DIN EN ISO 11654 standardında [19] öngörülen ses emici sınıfına göre "E" kategoride yer almaktadır. Ancak, PEK takviyesiz blok formuna göre gürültü azaltma performansının yaklaşık %13.5 artarak daha geliştiği, referans blok tasarımına göre ise yaklaşık %27 daha yüksek bir ses emici özellik kazanmıştır.

16 mm ve 20 mm ses emisyonu yarı genişliğinde hafif agregalı akustik kâğıt blok örneklerine dış bükey formda ortalama 7 mm kalınlığında PEK malzeme takviyesi yerleştirildikten sonra 1/3 oktav bandında 63 Hz – 6300 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı değişimi analiz bulguları Şekil 13–Şekil 14'de verilmiştir.

Frekans (Hz)	Ses Yutum Katsayısı
63	0,10
80	0,19
100	0,35
125	0,55
160	0,76
200	0,86
250	0,83
315	0,72
400	0,60
500	0,49
630	0,40
800	0,30
1000	0,27
1250	0,28
1600	0,29
2000	0,32
2500	0,33
3150	0,35
4000	0,37
5000	0,41
6300	0,47

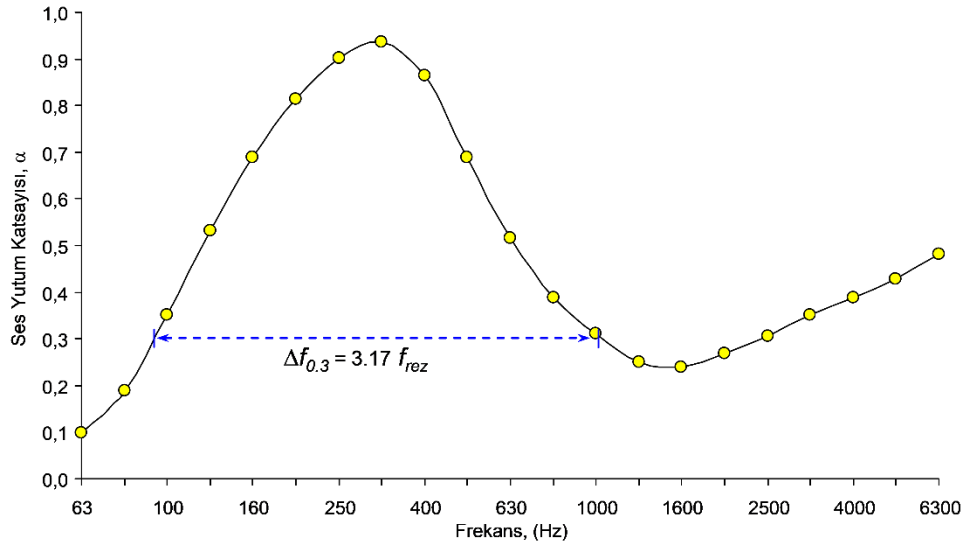
NRC= 0,48



Şekil 13. Frekans – ses yutum katsayısı ilişkisi (PEK takviyeli 16 mm yarı genişlikli blok)

Frekans (Hz)	Ses Yutum Katsayısı
63	0,10
80	0,19
100	0,35
125	0,53
160	0,69
200	0,82
250	0,90
315	0,94
400	0,86
500	0,69
630	0,52
800	0,39
1000	0,31
1250	0,25
1600	0,24
2000	0,27
2500	0,31
3150	0,35
4000	0,39
5000	0,43
6300	0,48

NRC= 0,54



Şekil14. Frekans – ses yutum katsayısı ilişkisi (PEK takviyeli 20 mm yarı genişlikli blok)

PEK takviyesiz 16 mm ve 20 mm ses emisyonu yarı genişliğindeki blok örneklerinin rezonans frekans değerlerinde belirlenmiş maksimum ses yutum katsayı değerleri sırasıyla $\alpha=0.73$ ve $\alpha=0.80$ 'dir. PEK takviyesi ile birlikte sırasıyla $\alpha=0.86$ ve $\alpha=0.94$ değerlerine yükselmiştir. Düşük frekans bölgesinde PEK takviyeli 16 mm ses emisyonu yarı tasarımı kağır bloğun ses emicilik özelliğinin yaklaşık %18 oranında iyileştiği, 16 mm ses emisyonu yarı tasarımı kağır bloğun ise yaklaşık %17.5 daha iyileştiği görülmüştür. Elde edilen maksimum ses emicilik yüzde oran değer değişimi irdelendiğinde yarı boyutu arttıkça PEK takviyesinin düşük frekans bölgesinde bloğun ses emicilik etkinliğini göreceli olarak azaltmaktadır. 16 mm ses emisyonu yarı tasarımı bloğun PEK takviyesiz formu için elde edilen $\Delta f_{0,3}=1.75f_{rez}$ 'lik değeri, PEK takviyesiyle birlikte $\Delta f_{0,3}=2.92f_{rez}$ değerine yükselmektedir. Benzer şekilde, 20 mm yarı tasarımı bloğun PEK takviyesiz formu için ise bu yaklaşımın $\Delta f_{0,3}=1.82f_{rez}$ 'lik değeri, PEK takviyesiyle birlikte $\Delta f_{0,3}=3.17f_{rez}$ değerine yükselmektedir. PEK takviyesi ile birlikte 16 mm yarı tasarımı blokta 1.67 katlık, 20 mm yarı tasarımı blokta ise 1.74 kat'lık ilave bir ses emicilik performansı sağlanmaktadır. Ancak, referans blok baz alındığında ise; 16 mm yarı tasarımı blokta

2.15 katlık, 20 mm yarıklar tasarımı blokta ise 2.33 katlık ses emicilik performansları gelişmektedir. Bu değerlerin genellikle düşük ve orta frekans bölgelerinde etkinlik kazandığı görülmektedir. Yüksek frekans bölgesinde ise ses emicilik değerinin PEK takviyesi ile birlikte 1000 Hz – 2000 Hz aralığında bir miktar düştüğü görülse de daha yüksek frekanslarda ses yutumu değerleri artmaktadır. 16 mm yarıklar tasarımı blok örneğine PEK takviyesi, gürültü azaltma katsayısı $NRC_{16mm}=0.43$ 'den $NRC_{16mm+PEK}=0.48$ değerine yükseltmiştir. Benzer olgu, 20 mm yarıklar tasarımı blok örneğine PEK takviyesi, gürültü azaltma katsayısı $NRC_{20mm}=0.45$ 'den $NRC_{20mm+PEK}=0.54$ değerine yükselerek gelişmiştir. Ancak PEK takviyesi, referans blok formuna göre 16 mm yarıklar tasarımı blokta gürültü azaltma performansını yaklaşık %45.5 iyileştirerek DIN EN ISO 11654 standardında [19] öngörülen “emici sınıfı” olarak da nitelendirilebilen “D” kategorisine gelişimini sağladığı düşünülebilir. Benzer olgu, 20 mm yarıklar tasarımı blokta ise gürültü azaltma performansını yaklaşık %64 iyileştirerek daha yüksek bir ses emicilik sınıfını temsil eden “C” kategorisine yükselmiştir. Bu bulgulara göre, ses emisyon yarıklar genişliği, Helmholtz rezonatör formu tasarımı ve boyutları, boşluk hacmi içerisine ilave ses emici takviye elemanı olarak yerleştirilebilecek malzemenin karakteristiği ve kalınlığı gibi faktörler, kâğıt blok tasarımının ses emicilik performansına doğrudan etken olan parametreler arasında yer aldığını göstermektedir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, özellikle tasarımında Helmholtz rezonatör formunun oluşturulduğu ve 3 ayrı alternatif ses emisyon yarıklar genişliklerinin kâğıt blok elemanının ses yutumu performansına olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bloğun ses yutumu kapasitesini artırmak için polyester elyaf keçenin takviyeli ayrı bir seri blok tasarımı incelenmiştir. Çalışma sonuçlarının karşılaştırmalı analizinin yapılabilmesi için, yarıksız ve keçe takviyesiz standart bir blok tasarımı referans olarak incelenmiş ve toplamda 7 farklı seri blok dizaynı irdelenmiştir. Çalışma bulgularına göre:

1. Düşük frekans bölgelerinde referans blok elemanının ses yutumu katsayısı 0.07 – 0.44 aralığında değişmektedir. Bu bulgu, hafif agregalı referans blok örneğinin özellikle düşük frekans bölgesinde ses yutumu açısından daha etkin bir performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır.
2. Referans blok örneğinin Gürültü Azaltma Katsayısı $NRC=0.33$ olarak hesaplanmıştır. DIN EN ISO 11654 standardında öngörülen ses emici sınıfına göre “E” kategoride yer almaktadır. Bu değere göre blok elemanı yüzeyine gelen ses dalgalarının %33'ünün kâğıt blok elemanı tarafından emildiğini, %67'lik kısmının ise ortama geri yansıtıldığını gösterir. Geri yansıtılan ses dalgalarının oransal değerinin daha düşük bir düzeye indirgenmesi için, blok elemanının tasarımında ses yutumu performansını iyileştirilmesini sağlayacak alternatif tasarım değişikliklerinin yapılması gerekmektedir.
3. 12 mm, 16 mm ve 20 mm ses emisyon yarıklar genişliklerinde blok örneklerinin gürültü azaltma katsayıları sırasıyla $NRC_{12mm}=0.37$, $NRC_{16mm}=0.43$ ve $NRC_{20mm}=0.45$ olarak hesaplanmıştır.
4. Rezonans frekans değerleri 12mm, 16 mm ve 20 mm yarıklar genişliği için sırasıyla $f_{rez_12mm}=196$ Hz, $f_{rez_16mm}=251$ Hz ve $f_{rez_20mm}=303$ Hz'dir. Blok tasarımında ses emisyon yarıklar genişliği arttıkça, rezonans frekans değeri de artmaktadır. Bu da rezonans bölgesinde ses emicilik özelliğinde daha etkin olacağını çağrıştırmaktadır.
5. PEK takviyeli ve 12 mm, 16 mm ve 20 mm ses emisyon yarıklar genişliklerinde blok örneklerinin gürültü azaltma katsayıları sırasıyla $NRC_{12mm+PEK}=0.42$, $NRC_{16mm+PEK}=0.48$ ve $NRC_{20mm+PEK}=0.54$ olarak hesaplanmıştır.
6. PEK takviyesi, referans blok formuna göre 16 mm yarıklar tasarımı blokta gürültü azaltma performansını yaklaşık %45.5 iyileştirerek DIN EN ISO 11654 standardında öngörülen “emici sınıfı” olarak da nitelendirilebilen “D” kategorisine gelişimini sağlamıştır. Ayrıca, 20 mm yarıklar tasarımı blokta ise gürültü azaltma performansını yaklaşık %64 iyileştirerek daha yüksek bir ses emicilik sınıfını temsil eden “C” kategorisine yükselmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Aksoy, U. T. & Toktaş S. (2011). Dış duvar uygulamalarında ses geçirimsizliği ve ses yalıtımı özellikleri, *Engineering Sciences*, 6(4), 827-837.
- [2] Erol, H. B. (2006). *İç mekanlarda malzeme kullanımında akustik performans kriterleri*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [3] Fahy, F., & Walker, J. (2005). *Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration*. Spon Press, London and New York, UK and USA.
- [4] Hurley, J. S. (2007). *Natural Fiber Based Lightweight Sound Absorber Materials*. SAE Technical Paper Series, No: 2007-01-2197.
- [5] İzoder (2013). *İnşaat Teknolojisi Ses Yalıtımı*. Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği, İstanbul, 80.
- [6] Demirkale Y.S. (2007). *Çevre ve Yapı Akustiği*, BirsenYayınevi, İstanbul.
- [7] Sousa, H., & Carvalho, A., Melo, A., (2004). A New Sound Insulation Lightweight Concrete Masonry Block. Design And Experimental Characterization, *13th International Brick and Block Masonry Conference*. July 4-7, Amsterdam.
- [8] Sousa, H., & Carvalho, A. (1998). A New Sound Absorbing Lightweight Concrete Masonry Block, *XXV IAHS World Housing Congress Proceedings*. 1, 325-332.
- [9] Koski, J. A. (1992). *Sound-absorbing concrete block, Acoustically engineered block quiet noisy areas and improve overall sound quality*. PUBLICATION #M920384, The Aberdeen Group.
- [10] Colinwell Co. (2022). *Acoustic Masonry*, <http://www.colinwell.com>
- [11] Haron, Z., Jusli, E., Nor, H. M., Jaya R. P., Yaacob, H., Yahya K., Mohamad, A., & Yahya M. N. (2018). Prediction of Sound Absorption Coefficient for Double Layer Rubberised Concrete Blocks. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.29), 704-710.
- [12] Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N., Vasilev, Y., Lesovik, V., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Acoustic Properties of Innovative Concretes: A Review. *Materials*, 14(2), 398.
- [13] TS EN ISO 10534-1. (2004). Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio, 20.
- [14] TS EN ISO 10534-2. (2003). Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -Part 2: Transfer-function method, 27
- [15] Ghilahare, A. K., & Pandey, M. (2007). Experimental Analysis of Sound Absorption Coefficient of the Combined Mechanism of Enhanced Egg Carton, Gypsum Board and Sound Diffuser. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(8), 16400-16412.
- [16] Thermalxx Jackets. (2022). *Decibel Drop and Noise Reduction Coefficients for Material Combinations*. <https://blog.thermalxxjackets.com/decibel-drop-noise-reduction-coefficients-for-material-combinations>, (25.12.2022).
- [17] Arge Yapı İzolasyon. (2022), *Ses Yalıtım Malzemeleri*. <https://www.argeyapiizolasyon.com/ses-yalitim-malzemeleri>, (25.12.2022).
- [18] ASTM C423. (2022). Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method
- [19] TS EN ISO 11654. (2002). Acoustics - Sound absorbers - Rating of sound absorption coefficients.

Araştırma Makalesi - Research Article

Evidence Based Design in Healthcare Facilities*

Sağlık Yapılarında Kanıta Dayalı Tasarım

Eda Selçuk^{1*}

Geliş / Received: 11/05/2022

Revize / Revised: 10/08/2022

Kabul / Accepted: 01/09/2022

ABSTRACT

The design of healthcare structures is a complex and constantly evolving issue due to the need for addressing various interrelated functions. Today, user involvement in the design phase is considered to be one of the main pillars of successful design. However, in healthcare structures, efforts toward this end are often hampered by the need for identifying the various requirements of multiple user groups and for setting priorities between different requirements of these groups. Recently, the effects of physical environmental conditions on user satisfaction have become more important in health building designs. Along with the rise of user satisfaction in design, the concept called 'evidence-based design' is increasingly attracting the attention of researchers and has become the theoretical concept of the healing physical environment in design.

The aim of this study is to determine the gaps and areas needed to improve the effects of the physical environment on the user in terms of evidence-based design strategies. In this context, scientific studies on the design of health buildings between 2012 and 2021 were systematically reviewed and analyzed according to the evidence-based pyramid method with kohen kappa analysis within the scope of evidence-based design criteria. A total of 1641 articles were identified for the scope of the study. Among these a total of 48 scientific studies were analyzed fitted to the criteria of the study. The impacts of physical environment on users are evaluated on two main types of user groups: (1) patients and relatives and (2) healthcare workers. The results reveal that evidence design principles are mostly evaluate in terms of patients and there are gaps in evidence-based design literature for healthcare personnel and more studies should be undertaken by multidisciplinary teams for the development of design strategies.

Keywords- *Evidence Based Design, Healthcare Facilities, Users*

ÖZ

Birbiriyle ilişkili birçok işleve sahip mekanlardan oluşan sağlık yapılarının tasarımı karmaşık ve sürekli gelişmekte olan bir konudur. Günümüzde, kullanıcı gruplarının fiziksel çevre gereksinimlerinin tasarım sürecine yansıtılması başarılı bir tasarımın temelleridir. Fakat sağlık yapılarında bu hedef, farklı ihtiyaçlara sahip olan birçok kullanıcı grubunun gereksinimlerinin belirlenmesini ve daha sonra da önceliklerin tespit edilerek tasarım sürecine dahil edilmesini gerektirerek karmaşıklığı arttırmaktadır. Son zamanlarda sağlık yapıları tasarımlarında fiziksel çevre koşullarının kullanıcı memnuniyeti üzerindeki etkileri daha da önemli hale gelmiştir. Tasarımda kullanıcı memnuniyetinin ön plana çıkması ile birlikte, kanıta dayalı tasarım kavramı gittikçe daha çok ilgi çekmeye başlamış ve tasarımda iyileştirici fiziksel çevrenin teorik konsepti haline gelmiştir.

*Bu çalışma Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üni., Fen Bilimleri Enst., Yapı Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda, Yrd. Doç. Dr. Selin Gündeş danışmanlığında tamamlanan "Sağlık Yapılarında Tasarım Yönetimine Yönelik Bir Model Önerisi" başlıklı tezden türetilmiştir.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: edaselcuk@halic.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6443-5033>)
Mimarlık Bölümü, Halic Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul, Türkiye

Bu çalışmanın amacı fiziksel çevrenin kullanıcı üzerindeki etkilerinin kanıta dayalı tasarım stratejileri bakımından geliştirilmesi için gereken eksiklikler ve faktörlerin belirlenmesidir. Bu kapsamda 2012 ve 2021 yılları arasında sağlık yapıları tasarımına yönelik yapılan bilimsel çalışmalar, sistematik olarak incelenmiş ve kanıta dayalı tasarım kriterleri kapsamında kohen kappa analizi ile kanıta dayalı piramit yöntemine göre değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında toplam 1641 bilimsel makale tespit edilmiştir. Bunlar arasında çalışmanın kriterlerine uygun olan toplam 48 makale analiz edilmiştir. Nihai kullanıcıların bakış açılarına göre ele alınan bu çalışmada fiziksel çevrenin kullanıcılar üzerindeki etkileri, (1) hasta ve hasta yakınları, (2) sağlık personeli olmak üzere iki ana nihai kullanıcı grubu üzerinde ele alınmıştır. Sonuçlar, kanıta dayalı tasarım ilkelerinin çoğunlukla hastalar açısından değerlendirildiği; sağlık çalışanları için eksiklikler olduğu ve geliştirilmesi için kullanıcı memnuniyetini değerlendiren multidisipliner çalışmalara gereksinim duyulduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler- Kanıta Dayalı Tasarım, Hastaneler, Kullanıcılar

I. INTRODUCTION

Recently, there has been a significant increase in studies conducted to examine the effects of health structures on patient recovery processes. Studies show that “evidence-based design” approaches have gained importance in terms of service quality in health services, which are quite effective at the welfare level of society. Evidence based design (EBD) is the formulation of design strategies based on studies that identify the impacts of the physical environment on users [1]. Today, many hospitals and healthcare systems, especially in developed countries, adopt these design principles in order to increase the quality of healthcare services, and benefit from these design principles in renovation/maintenance works and new projects [1, 2].

Previous studies prove that the satisfaction of both “patients” and “staff” groups are higher in hospitals that are planned based on the views and feedback from these two groups. According to Andrade et al (2012), satisfaction level increases in hospitals planned by feedback from patients, and patients prefer these hospitals again to solve their next health problems [3]. In a study investigating the effects of environmental factors on healthcare workers' stress and satisfaction, Applebaum et al. (2010) state that considering employees' opinions increased satisfaction and reduced stress [4]. Waroonkun (2018) has studied ambient features (lighting, temperature, noise, air quality, odors), architectural features (building design or architectural design), interior design (greenery, color, furniture, signage) and outdoor environment features (view & surrounding, rest areas, parking) that influence patients' perception of satisfaction in the Thai Community Hospital. The researcher highlighted that ambient features were the most important influence on patients' comfort [5].

Today, it is accepted that a properly planned hospital in the context of person-place creates positive effects on the physical and psychological states of individuals [6, 7]. Therefore, in the design of health buildings, it is important to create healing spaces where individuals can feel good physiologically and psychologically [8, 9, 10]. However, healthcare structures often cannot adequately meet the needs of the society, which leads to user dissatisfaction. Previous studies reveal that the problems encountered are generally associated with the designs of health structures [11]. This situation causes problems such as prolongation in the recovery process, increase in mortality rates and decreases in work efficiency of employees. Therefore, in the health sector, where significant investments are made, it is important for a good service delivery to design these structures to meet the needs of the society. However, in order to meet social needs in a good way, user needs, and satisfaction should also be taken into account in hospital designs. Otherwise, design changes and rework will be inevitable. Perhaps the most important issue arising from neglecting user requirements is that the discontent and errors arising from the design will continue to negatively affect project performances and building users.

Healthcare facilities, which have an important place among public buildings, should be designed in a way that will provide comfortable conditions, and increase the quality of life for patients /healthcare staff. The feedback obtained from patients and healthcare staff will provide a very important design input to the designs of hospitals. Therefore, the aim of this research is to analyze environmental design factors that need to be considered in order to create therapeutic environments in hospitals through a systematic review of previous literature and to identify the obstacles and deficiencies in the development of EBD strategies in healthcare buildings. The impacts of physical environment on users are evaluated on two main types of user groups: (1) patients and relatives and (2) healthcare workers. In this context, the study aims to answer the following research questions:

- Which evidence-based design principles and findings were reached in previous literature regarding the impact of healthcare design on the physiological and psychological conditions of patients, patient relatives and the staff?
- Is there sufficient scientific evidence on the healing properties of hospital architecture?

In order to find answers to the above questions, scientific studies on the design of health buildings between 2012 and 2021 were systematically reviewed and analyzed according to the evidence-based pyramid method with kohen kappa analysis within the scope of EBD criteria. The online search databases used were "Web of Science", "Pubmed" and "Scopus". As a result of the literature review, 48 articles suitable for the aims of the study were obtained. Afterward, these 48 studies were evaluated under two main headings: (1) patients and their relatives, (2) healthcare staff. Evaluations were made according to the levels of evidence in the research, and Kappa analysis was applied to measure the consistency between the findings obtained from the publications.

It is also expected that the EBD criteria to be obtained from this study will contribute to the field by determining the effects of the physical environment on the patients and health personnel in the design of healthcare facilities and other design factors needed in the field of health.

II. METHODS

Within the scope of the study, "Web of Science", "Pubmed" and "Scopus" databases were used for systematic literature review. The research was conducted between March and July 2021. In the first stage, "physical environment AND (hospital OR health services)", "physical environment AND patient satisfaction", "physical environment AND employee satisfaction in hospitals", "physical environment AND hospital design" were used as keywords for the literature review and these keywords were searched in the titles both in Turkish and English. Among the 1641 studies obtained in the literature review, the studies directly related to the physical environment were examined. The language of the publications was limited to Turkish and English, and non-related publications such as customer-oriented marketing, clinical-oriented applications, medical equipment technology, biological effects of the physical environment on animals, book reviews, full-text notifications, and letters to the editor were excluded from the study.

In the second stage, 474 studies in which user satisfaction was measured among the publications obtained were examined. At this stage, evaluations were considered methods used by the authors' sampling and findings. At the final stage, total results of 48 studies were evaluated (Figure 1).

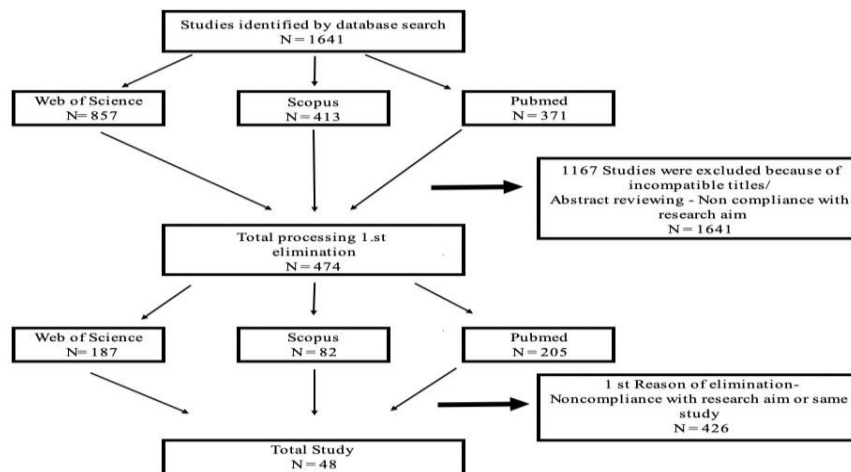


Figure 1. Determination Process of the Literature Included in the Scope of the Systematic Review

A. Evidence-Based Design Approaches in Healthcare Structures

It was shown in the studies that a well-planned hospital will have an impact on the psychological, physical, physiological of patients/workers and work efficiency of employees [12]. Therefore, EBD principles started to be developed in order to increase the quality of healthcare services [13]. EBDs are architectural solutions designed to both improve patient health and increase the work efficiency of staff by determining the effects of the physical

hospital environment on users [14]. Such physical environment factors include natural light, colors, windows, scene, healing gardens, noise level, soothing music, ergonomic items and art [15].

Integrated building design criteria (Figure 2) was used in the study in order to determine the evidence on the users of the physical environment in healthcare facilities [16].

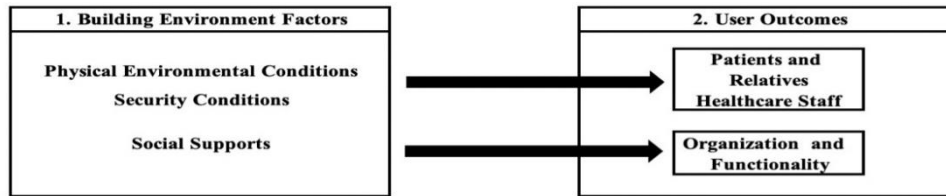


Figure 2. Design Model for EBD in Healthcare Facilities (Adapted from [16])

B. Research Criteria

The selection of the articles included in the study was made according to the following criteria:

- Including EBD studies on the effects of the physical environment on users in healthcare structures involved,
- The languages of the publications are either English or Turkish,
- Publications that are not related to the subject, such as customer-oriented marketing, clinical-oriented applications, medical equipment technology, biological effects of the physical environment on animals, are excluded from the scope of the study,
- Studies published between 2012 and 2021 and articles for which the full texts are available are included.

In the present study, which was shaped according to the perspectives of the end users, the physical effects of EBD were examined within the scope of the evidence pyramid on two main groups as (1) patients and relatives, (2) employees (Figure 3).

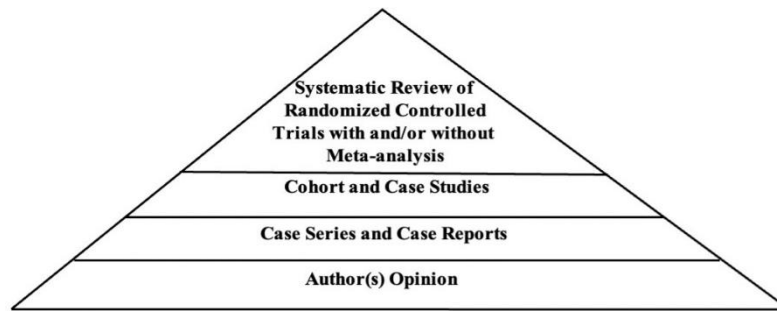


Figure 3. The Evidence Pyramid (Source: Adapted from [17])

The evidence pyramid is a research tool that produces evidence or evaluates the available evidence in research conducted in the field of health [18]. Studies in the field are classified from strong to weak in the order of importance in terms of evidence value and formed the pyramid according to their validity and reliability levels [19, 20]. The order of the best and reliable studies as evidence according to pyramid considering their definition and importance are shown in Table 1.

Table 1. The Order of Studies in the Evidence Pyramid by Definition and Importance (Source: Adapted from [21, 22, 23])

Level	Description of Study
I	Evidence from systematic literature searched by randomized controlled trials
II	Evidence obtained by examining individuals selected to represent the relevant universe over time

III	Evidence from interesting results observed in a small group without a planned study setup
IV	Evidence from the opinions and reports of experts in the field

C. Data Analysis

The final 48 studies examined in the study were divided into two main titles as 1) patients and relatives, 2) healthcare personnel, and subtitles representing these topics according to their subjects (Figure 4). In this study following the research by Huisman et al (2012), the evidence-based pyramid tool is used for data analysis [24]. The study by Huisman et al., (2012) analyzed the period between 1960 and 2011; the present research focuses on the period between 2012 and 2021. Evaluations were made according to the levels of evidence in the research, and Kappa analysis was applied to measure the consistency between the findings obtained from the publications. Kappa statistic was developed to determine the degree of agreement between two raters scoring at the classification level [25].

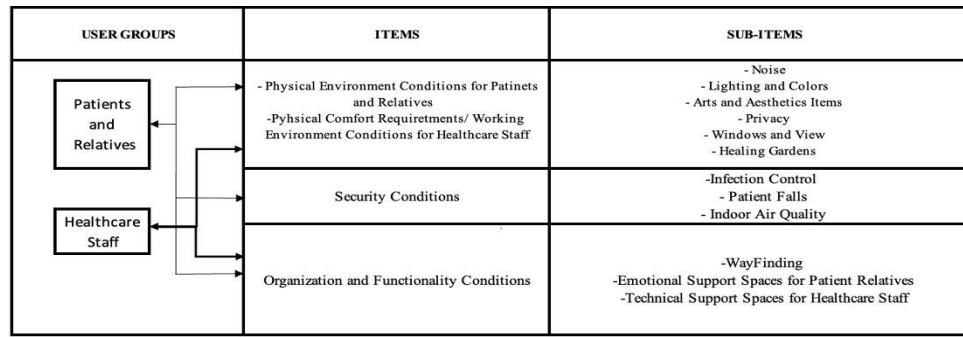


Figure 4. Themes and Sub- Themes (Source: Adapted from [16-24])

In the calculation of the Kappa coefficient in the analysis, there were two different possibilities, namely Pr (a), which is the total proportion of the observed fit, and Pr (e), which is the probability of this fit occurring by chance. The formula used for the Kappa coefficient over these two possibilities was “ $K = (Pr(a) - Pr(e)) / (1 - Pr(e))$ ” [26].

The analysis was carried out by two different coders. As a result of the analysis, the consistency between the coders was found to be 0.70. According to Dawson-Saunders and Trapp Robert (1994), the Kappa coefficient takes values in the range of 0-1, and according to this value range, the consistency levels are as follow: 0.93-1 is excellent, 0.81-0.92 is very good, 0.61-0.80 is good, 0.41-0.60 is fair, 0.21-0.40 is below middle and 0.01-0.20 is weak consistency [27]. Accordingly, the number of Kappa coefficient obtained in the study as 0.70 indicated that the consistency between coders was at a good level. (Table 2).

Table 2. Values for Kohen Kappa Coefficient of Consistency

Kohen Kappa Coefficient of Consistency	Values
Pr (a)	%81
Pr (e)	%35
K= Kappa	%70

III. FINDINGS

A. Evidence-Based Design in Healthcare Structures: Patients and Relatives:

In this category EBD factors were evaluated in terms of the patient and their relatives according to items and subitems (Figure 4). This topic includes examination;

- Physical Environmental Conditions,
- Security Conditions,
- Organizational and Functionality Conditions

will be explained comprehensively as below.

• Physical Environmental Conditions

In this section, physical environmental conditions factors of EBD were examined in terms of the patients and their relatives according to themes and sub-themes given in Table 3.

Table 3. Distribution of Publications Determined for EBD Approach by Evidence Levels

User Group	Themes	Sub-Themes	References	Evidence Level	Total Number of study	Lowest Level of Evidence	Highest Level of Evidence
Patient and Patient Relatives	Physical Environment Conditions	Noise	[12] Bosia et al (2016)	III	4	III	I
			[15] Iyendo et al (2016)	I (rev)			
			[31] Luetz et al. (2016)	III			
			[45] Laursen et al (2014)	I (rev)			
		Lighting and Color	[12]Bosia et al (2016)	III	7	III	I (rev)
			[15] Iyendo et al (2016)	I (rev)			
			[44] Choi et al (2012)	II			
			[45] Laursen et al (2014)	I (rev)			
			[46] Wang & Puksza (2018)	III			
			[47] Ghamari and Amor (2016)	I (rev)			
			[48] Iyendo (2014)	II			
		Arts and Aesthetics Items	[15] Iyendo et al (2016)	I (rev)	8	III	I
			[45] Laursen et al (2014)	I (rev)			
			[48] Iyendo (2014)	II			
			[50] Tinner et al (2018)	II			
			[51] Peeters et al (2018)	II			
			[52] Vetter et al (2015)	I			
			[53] Water et al (2017)	III			
			[54] Salderay (2018)	III			
		Privacy	[12] Bosia et al (2016)	III	7	III	II
			[51] Peeters et al (2018)	II			
			[55] Trochelman et al (2012)	III			
			[56] Stevens et al. (2012)	II			
			[57] Bosch et al (2012)	II			
			[59] Larsen et al (2014)	III			
			[60] Ferri et al (2015)	III			
		Windoos and View	[12] Bosia et al (2016)	III	5	IV	I (rev)
			[15] Iyendo et al (2016)	I (rev)			
[24] Huisman et al (2012)	I (rev)						
[64] Connellan et al (2013)	II						
[65] Campagnol & Shepley (2014)	IV						
Healing Gardens	[51] Peeters et. al (2018)	II	5	III	I		
	[66] Reeve et. al (2017)	II					
	[67] Jiang et al (2018)	III					
	[69] Van der Riet et. al (2014)	II					
	[70] Weerasuriya et.al (2019)	I					

1) Noise: For users to benefit from the hospitals in a healthy way, the noise levels in the building should be at appropriate levels. The World Health Organization (WHO) recommends that the noise level in hospitals should not exceed 40-45 dB during the day and 35 dB at night [28]. However, it was emphasized in the literature that the noise levels in hospitals do not correspond to the values determined by WHO and that these structures are mostly composed of noisy environments. Studies show that noise causes many serious problems for users such as the acceleration of heartbeat, increase in headaches, temporary/permanent hearing disorders, stress and tension [28-30]. These studies highlight that surface coating materials, various devices and human-originated sounds are the main causes of noise in healthcare structures.

Noise studies were also undertaken specifically for individual functional spaces in hospitals. For example, Luetz et al. (2016) proved that noise levels can be reduced with minor architectural interventions in adult intensive care units [31]. Architectural interventions that were made by the researchers, in adult intensive care units, include a technical corridor with a soundproof wooden wall behind the head of the patient bed to hide the medical equipment that causes noise, and the use of furniture with soundproof wood material in the room. Moreover, since all the rooms in the adult intensive care units were twin rooms, a noise-canceling console was placed between both patients to prevent noise. In order to reduce alarms at staff and bedsides, they have planned a closed staff workspace that allows patient observations between rooms [31]. Bosia et al (2016) indicated that acoustic comfort, visual privacy and space flexibility seem to be more important for ambulatories in the internal medicine and oncology departments [12]. Sound-absorbing ceiling and floor coverings should be used to prevent unwanted noise in healthcare buildings. Flooring materials selected in accordance with the functional features of the hospitals have positive contributions to reducing noise, preventing glare, supporting infection control and increasing patient care efficiency [32]. Within the scope of this research, 4 evidence-based studies (Table 3) were identified.

2) Lighting and Colors: In many studies, it was stated that lighting has very important effects on the physiological and psychological conditions of individuals. According to previous research, natural and artificial lighting, especially morning light [33] have beneficial effects on depression, stress, mortality, hospital stay and sleep [34]. Studies indicated that individuals generally prefer natural lighting [33, 35-37] and artificial lighting causes visual fatigue and headaches [38, 39]. Researchers on lighting in hospitals have shown that ultraviolet light has positive effects on healing by promoting emotional well-being [15].

In the literature, it was seen that the main lighting problems that occur in health buildings are related to the orientation of these structures [11]. Creating design strategies according to the orientation of buildings to the sun in terms of natural lighting is an important architectural element in improving the lighting performance. Studies showed that the location of rooms in hospitals is a very important factor especially in psychological disorders [40, 41]. Van (2006) conducted a study proving that lighting has an effect on the hormones and nervous system in the body [42]. Walch (43) stated that daylight in hospital rooms positively affects patients' mental health and reduces the use of painkillers. [43]. Within the scope of this study, 7 publications were identified as an evidence of the positive benefits of light (Table 3). Based on patient recovery times in a hospital in Korea, Choi et al. (2012) proved that the recovery times in rooms facing the southeast direction and therefore receiving morning light are significantly shorter than the recovery times of patients in rooms facing the northwest and receiving intense sunlight in the afternoon [44]. Laursen et al. (2014) determined that plants and sunlight were effective in reducing anxiety and pain levels in post-operative patients [45]. Wang and Puksza, (2018) concluded that a well-designed natural lighting had positive effects on the patients, patients relatives and healthcare workers during chemotherapy treatment [46]. On the other hand, the study conducted by Ghamari and Amor (2016), showed that different light sources and colors have positive physiological and psychological effects on patients [47]. The authors have found that light and color reduced the rate of medical errors and stress, shortened patient stay and increased healing, and patient satisfaction. According to Bosia et al. (2016), for patients in the oncology department, the color of fittings and furniture and the presence of restorative spaces is less important for them. In addition, authors found that outside views seem to be less important for ambulatories in the internal medicine department [12]. Furthermore, Iyendo (2014) also argued that the artistic elements and daylight of the hospital interiors had positive effects on both healthcare personnel and patients [48].

3) Arts and Aesthetics Items: Evidence based literature also suggests that the presence of art elements in hospitals creates positive thoughts on users and increases well-being. The presence of paintings such as nature views and happy smiling figures in the corridor and entrance halls provides positive benefits for individuals [15, 45, 48-50]. Within the scope of this study, 8 publications were identified as an evidence of the positive benefits of

arts and aesthetics items scientifically (Table 3). Peters et al. (2018) concluded that adolescent cancer patients give importance to vibrant colors and decoration items that will arouse the feeling of home, rather than those colors that made them- feel- cold and bored in the hospital environment. However, it was observed that there were great differences in the colors and decoration items preferred among the patients [51]. Likewise, Iyendo (2016) stated that colors have a systematic effect on people's moods, emotions and behaviors [15]. However, in the literature, it has been observed that no information was given about which colors these colors were. On the other hand, a study conducted by Laursen et al. (2014) found that patients had significantly lower pain intensity when they were exposed to visual designs or listening to music [45]. Similary Vetter et al. (2015) pointed out that music had significant effects on postoperative pain, anxiety, blood pressure and heart rate. In addition, the authors emphasized that nature views, more spacious rooms and architectural features that provide more sunlight had positive effects on patients' anxiety and postoperative pain [52].

Water et al. (2017) surveyed 175 children between the ages of 5 and 16 regarding their perceptions of children's outpatients' environments at national children's hospital in New Zealand/Aotearoa. Using Art-based methods and semi-structured interview tools, the authors evaluated children's perceptions in four categories including aesthetics of the environment, wayfinding (navigation), noise and uniforms. The findings indicated that they were aware of their environment and noise was the most important among all factors. Indeed, they wanted a friendly environment and the use of colours associated with well-being, which all together created a less scary clinical environment [53]. The paper by Salderay (2018) evaluated the factors contributing to the improvement process in Main-Science Department of Brain and Nerve Surgery in Gazi University Hospital examined the assessment of the opinions of patients and healthcare staff. As a result of the study, it has been seen that the use of comforting and reassuring items that will increase patient compliance, reduce fear and anxiety, allow playing and activities have positive effects on patients' health [54].

4) *Privacy* : A common view in evidence-based studies on privacy (Table 3) is that single patient rooms provide benefits for the user. In a study, it was seen that providing privacy in single rooms is an important factor in terms of patient satisfaction, both visually and acoustically [55]. Stevens et al. (2012) conducted an extensive comparison of open-bay and single-family room neonatal intensive care unit design and found that single-family rooms provided an improved quality of work environment and enhanced patient safety [56]. On the downside, the researchers indicated that increased walking distance and, steps per nursing staff shift were the main complaints in hospitals incorporating single-bed rooms [56]. A similar study conducted by Bosch et al. (2012) found that single-family rooms provided benefits for nursing staff in terms of reduced job stress, increased quality of work environment and enhanced safety and increased quality of environment provided to patients and their relatives [57]. Peeters et al. (2018) explored hospital stay experiences of adolescents with cancer and how physical environment affects these experiences. It has been proven that adolescents attach importance to privacy, green space, artistic and aesthetic items. The reasons for adolescents to prefer single patient rooms include being alone with their families or friends, coping with their own situation without anyone seeing them, not wanting others to see and hear everything they say and do [51]. Bazuin and Cardon (2011) pointed out that private intensive care unit patient rooms for children reduce patient and family stress and reduce the rates of hospital-acquired infection transmission [58]. However, it has been determined that the communication between the patients who have the same disease types such as colon/breast cancer has to be maintained and these patients need to be in close proximity to each other in rooms with more than one bed. Looking from this point of view, it appears that although multi-bed rooms have a positive effect in terms of patient psychology, they have negative effects in terms of privacy [59]. Ferri et al (2015) concluded that single-bed rooms not only provide user privacy, but also reduce the risk of infection [60].

5) *Windows and Views*: The effects of natural scenery on individuals with different cultures were examined by various studies for buildings such as schools, hospitals, residences, and offices [61, 62] and it was found that natural scenery has benefits on human health [63]. It was pointed out that there is a high probability of developing depression, anxiety, and cognitive impairment in patients hospitalized in windowless units [35, 39, 49]. Within the scope of the present study, it was found that 5 studies provided evidence that windows and nature views provide positive benefits to users (Table 3). The proven effects of the landscape on patient health were first determined by Ulrich in 1984. He showed that patients who had gallbladder surgery and who stayed in rooms with a view took less pain medication and received positive feedback from nurses about patient psychology [24]. Iyendo et al. (2016) noted that monitoring the natural vegetation, green leaves, flowers, water and other natural elements used in hospital buildings had positive effects on patient health [15]. Connellan et al. (2013) observed that the lack of windows and the connection with the outside atmosphere are factors that can increase stress and depression in

terms of mental health [64]. In the study carried out by Campagnol and Shepley (2014) in rehabilitation hospitals in Brazil, it has been observed that nature and art are used as a tool to create healing environments in the physical environment and patients benefit from these environments [65].

6) *Healing Garden*: Research interest in how gardens can benefit patients in terms of health and well-being is increasing day by day [66]. Healing gardens are nature-oriented open spaces that increase the physical activity and motivation of individuals, reduce their stress, improve their well-being, and enable activities that are beneficial to renew their memories [67]. Healing gardens aim to support patient treatment and create a harmonious environment [68]. Studies proving the effects of gardens on users were shown in Table 3. In Van Der Riet's (2014) study on the hospital experiences of sick children in the garden called "Fairy Garden", it was observed that the garden reduced the duration of hospital stays and provided psycho-social and physical benefits [69]. As a result of user experiences, Reeve (2017) found that the garden saves the users from negative thoughts about traumas and diseases and that the fresh air makes them feel normal [66]. Jiang et al. (2018) demonstrated that natural landscape can improve the ability of people to cope with stress, as well as nature has positive health effects thus improve health outcomes. The same study stated that patients experienced comfort and peace when they sat in their rooms and enjoy the outside [67]. Weerasuriya et al. (2019) proved that the green field provides benefits to patients in meeting their psycho-physiological, social, spiritual needs and socialization [70]. Similarly, in the study conducted by Peeters et al. (2018), it has been proven that adolescents with cancer want nice outdoor spaces in hospitals where they can have a good time, socialize and meet their mobility needs [51].

- **Security Conditions**

In this section, the security conditions factors of EBD were examined in terms of the patients and their relatives according to themes and sub-themes given in Table 4.

Table 4. Distribution of Publications Determined for EBD Approach by Evidence Levels

User Group	Themes	Sub-Themes	References	Evidence Level	Total Number of study	Lowest Level of Evidence	Highest Level of Evidence
Patient and Patient Relatives	Physical Environment Conditions	Infection Control	[71] Ebrahimi et al. (2013)	III	1	III	III
		Patient Falls	[24] Huisman et al. (2012)	I (rev)	4	III	I (rev)
			[75] Bayramzadeh et al. (2018)	III			
			[77] Copeland & Chambers (2017)	III			
			[78] Pati et al. (2021)	I (rev)			
		Indoor Air Environment	[79] Shajahan et al. (2019)	I (rev)	6	III	I (rev)
			[30] Tang et al. (2019)	III			
			[82] Dougall et al. (2019)	II			
			[83] Azimi et al. (2013)	II			
			[84] Eijkelenboom & Bluyzen (2019)	I (rev)			
[85] Abbasi & Samaei (2019)	II						

1) *Infection Control*: The most important issue regarding infection control in previous literature is that single-bed patient rooms contribute to the reduction of infection spread [24, 58]. However, in the present study, no evidence-based research could be determined in terms of patients and their companions. It was observed that the research on this issue were mostly conducted in recent years and infection control was mainly discussed in terms of healthcare professionals. Within the scope of this study, only one study on infection control was obtained (Table 4). Ebrahimi et al. (2013) concluded that the main reasons for the increase in infections are the inappropriate physical structure of the wards regarding location and the user circulation control that is not reserved for patients, relatives and healthcare workers [71]. In previous studies and in the study determined within the scope of this study, the common belief was that infection spreads are predominantly seen in intensive care units and patients hospitalized in these units have a higher risk of infection than other patients [24].

2) *Patient Falls*: Patient falls reduce the life quality of individuals by causing serious psychological and physiological problems in patients [72]. However, patient falls are associated with the physical environmental characteristics or the individual health problems of the patient. For example, private or semi-private rooms can be a factor in designing to reduce falls because patients can help each other when necessary and received help from each other when necessary [73]. However, there are few studies in the literature that deal with the type of room in which the falls occur as private or semi-private. In this study, a total of 4 scientific studies were obtained based on

evidence (Table 4). Huisman et al. (2012) stated that while a patient diagnosed with mental disorder had a higher risk of falling, this risk was lower in individuals with a disease related to the central nervous system, musculoskeletal system or sensory organs [24]. In the literature, it was stated that patient falls in healthcare buildings mostly occur in patient rooms and bathrooms when patients go to the bathroom or get up from their beds [34, 74]. Bayramzadeh et al. (2018) concluded that falls are generally in patient rooms, and day care rooms, and the factors that cause falls are due to poorly arranged lighting systems, flooring material properties and causes limiting to access [75]. In addition, for patients with vision problems, it is necessary to make sure that the flooring materials do not appear wet or slippery [76]. Copeland and Chambers (2017) found that the presence of handrails and non-slippery floor covering contributed to a 55% reduction in patient falls [77]. Pati et al. (2021) found that the toilet seat on the side wall instead of directly opposite the bathroom entrance is a factor reducing falls [78]. Bosia et al. (2016) suggested that oncology and internal medicine departments care about patients and their relatives, their mobility, the ability to move around the room, and easy access to the bathroom. According to researchers, patients' privacy in the oncology department is significantly important. However, the provision of a pleasant environment, hand disinfection facilities and comfortable conditions for visiting relatives are important for both departments [12].

3) *Indoor Air Quality*: Indoor air quality includes issues such as ventilation, relative humidity, odor, and dust particles, which have an impact on the breathing air quality in indoor environments. In the literature, emphasis was placed on the healing environment and ventilation. Inadequate indoor air quality in hospital environments leads to worsening of patient treatments, prolonging the hospital stay of patients, and negative consequences such as decrease in work efficiency and absenteeism on healthcare staff [79]. The research by Tang et al. (2019) on indoor air quality in a healthcare center in China showed that the EBD had positive results on the physical health and recovery status of the patient. Furthermore, the authors identified that air freshness is the most important disturbing factor [30]. Ventilation should be sufficient so that patient care can be provided easily. A poor ventilation system in hospitals increases the risk of hospital infections such as lung and respiratory diseases for healthcare workers [80, 81]. Looking at other studies determined within the scope of the research [30, 82-85] it was seen that indoor air quality, which positively affects the health and comfort of building users, is associated with ventilation and the amount of CO₂ in the environment (Table 4). In the study conducted by Shajahan et al. (2019) on temperature, relative humidity and ventilation system, it was concluded that a higher ventilation rate reduces the infection rate. However, there is insufficient scientific evidence to recommend a minimum ventilation rate for infection control and there is a need for interdisciplinary collaborative research in the future [79].

- **Organizational and Functionality Conditions**

In this section, the organizational and functionality factors of EBD were examined in terms of the patients and their companions according to themes and sub-themes given in Table 5.

Table 5. Distribution of Publications Determined for EBD Approach by Evidence Levels

User Group	Themes	Sub-Themes	References	Evidence Level	Total Number of study	Lowest Level of Evidence	Highest Level of Evidence
Patient and Patient Relatives	Organization and Functionality	Way Finding	[15] Iyendo et al. (2016)	I (rev)	4	III	I (rev)
			[76] Waller (2012)	II			
			[87] Kalantari & Snell (2017)	II			
			[88] Morag et al. (2016)	III			
		Emotional Support Spaces	[91] Andritsch et al. (2013)	II	1	II	II

1) *Wayfinding*: Hospitals, which consists of various interrelated functions, are very complex structures. Users may have problems in going to the units they want to go that they have never experienced before. Problems faced by users in navigating can lead to negative situations such as disorientation, anxiety and loss of control, stress, headache, and increase in blood pressure [33, 86]. In this study, 4 studies proved that several types of wayfinding problems were experienced by users which could be resolved with simple design solutions (Table 5). In this context, researchers suggested that when designers used colors, images, and signposts, orientation was facilitated in hospitals [15, 87]. Kalantari and Snell (2017) observed that the integration of appropriate graphical indicators, color markings, and linear markings provide benefits to the staff as well as the users in finding direction in hospitals [87]. It has been observed that the use of accent colors, pictorial text and signs to find direction in hospitals help confused people find their way [76].

The comprehensiveness of wayfinding tools was evaluated in 9 hospitals for people with different needs and abilities by Morag et al. (2016). The authors concluded that the lighting in the corridors is insufficient for visually impaired people to lip-read and follow direction signs. Moreover, the lack of handrails along the corridors for the physically disabled or the absence of voice announcements when reaching the desired floor in the elevator were other related issues to wayfinding. In the same study, when the colors used in direction signs are similar (such as gray and beige) and there is no verbal indication of what the color of the arrow is, finding direction becomes problematic. It was observed that since the signs were not clear, many users had to ask the personnel to confirm that they had arrived at their desired destination [88].

2) *Emotional Support Spaces*: According to the holistic health approach, a person is always in interaction with the environment [89]. Social support includes the spiritual support that patients receive from their immediate surroundings, and it has a very important contribution to the recovery process of patients [15, 58, 90]. Studies showed that family involvement in patient care provides patient satisfaction. Family areas in patients' rooms reduce patient falls, stress and depression and provide patient privacy [91]. Families, especially in intensive care, may want to be with their relatives during patient treatment processes, so designs should allow this closeness [49]. Recently, it is accepted that social support as well as medical treatments have a significant curative effect on patient healthcare [92, 93]. Studies show that social support received from individuals such as family, friends, and healthcare personnel during patient treatment has stress-reducing and patient health-enhancing effects [34, 58, 94, 95]. Areas for relaxation, food service and internet service are among the important factors that make patient attendants feel comfortable [58]. In hospitals, it is possible to increase social support by providing waiting rooms and lounges with comfortable furniture, designing patient rooms suitable for visitors, and considering facilities that make it easier for family members to stay overnight [15]. Although it is emphasized in the literature that social support is very important for both patients and their relatives, it has been seen that the studies identified in the present study are based on empirical studies rather than proven studies and there is only one proven study (Table 5).

B. Evidence-Based Design in Healthcare Structures: Healthcare Staff

In this category EBD factors were evaluated in terms of healthcare staff according to items and subitems (Figure 4). *This topic includes examination;*

- Physical Environmental Conditions
- Spatial Organization and Functionality Conditions

will be explained comprehensively as below.

- ***Physical Environmental Conditions***

In this section, physical working environmental conditions factors of EBD were examined in terms of the healthcare staff according to themes and sub-themes given in Table 6.

Table 6. Distribution of Publications Determined for EBD Approach by Evidence Levels

User Group	Themes	Sub-Themes	References	Evidence Level	Total Number of study	Lowest Level of Evidence	Highest Level of Evidence
Healthcare Staff	Physical Comfort Requirements	Working Environments	[15] Iyendo et al. (2016)	I (rev)	6	III	I (rev)
			[100] Lavender et al (2020)	III			
			[102] Han et al. (2018)	II			
			[97] Sadatsafavi et al. (2015)	III			
			[103] Ergun et al. (2019)	II			
			[99] Sunderberg et al. (2017)	II			

Physical environmental factors such as lighting, noise level, sufficient green space, temperature and ventilation have direct effects on employees. Lighting and noise are very important in terms of work satisfaction, medical errors working efficiency, and stress. Especially nurses working in intensive care units are sensitive to stress [58]. Poorly planned acoustic arrangements create communication problems between patients and employees in hospitals [76]. Lightings that are not well regulated make the staff less sensitive to stress and reduce job satisfaction [33]. There is some evidence that bright light can improve the performance of staff and that this has positive effects on reducing medical errors that may occur in patient care [38]. Buchanan et al. (1991) stated that the level of illumination is of great importance in preventing mistakes made by healthcare personnel working

in pharmaceutical units. In their study, which they conducted for 21 days at three different lighting levels, they found that those working at high levels of illumination made fewer mistakes [96]. Buchanan et al. (1991) examined the rate of medical errors by the personnel preparing drugs at 450 lux, 1100 lux, and 1500 lux lighting levels. Researchers found that the medical error rate was 2,6% at the light level of 1,500 lux and 3,8% at the light level of 450 lux. As a result, it was observed that the usage of a correct artificial lighting system in the spaces is important in terms of work performance, considering the risks of medical errors of the personnel [96]. In this study, it was determined that the research about the lighting related to EBD were mostly done in the past. Therefore, in the literature review made for the specified years, no publications with the quality to make evidence-based inferences about this section were obtained.

In this research, a total of 6 scientific studies were obtained based on physical working environmental conditions factors evidence for healthcare staff. (Table 4). The study conducted by Iyendo (2016), concluded that a well-designed physical environment has the potential to reduce stress and fatigue on health personnel, increase the efficiency of health service delivery, and prevent other possible negative consequences [15]. Considering suitable lighting, windows, quiet areas, suitable areas for breaks, the ability to adjust workstations and outdoor spaces and courtyards for nurses working in intensive care units are important to make working environment more comfortable [58]. Sadatsafavi et al. (2015) evaluated the perceptions of healthcare professionals regarding 27 different architectural and physical features in patient areas, work areas and personnel areas. The authors pointed out that the healthcare staff in the study paid more attention to the improvement of aesthetic properties of floor coverings, indoor air quality and furniture design for a safe and comfortable working environment [97]. Olausson et al. (2014) pointed out that although the architectural designs of the intensive care unit had a great impact on the health of nurses, job satisfaction and the provision of patient care, more research was needed on the subject [98]. The working experiences of 8 intensive care nurses and 5 assistant staff in an evidence-based intensive care unit patient room were investigated by Sunderberg et al. (2017). The researchers stated that nurses were more efficient, when the room provided well-being for the patients. In addition, it was stated that the personnel should be involved in the design process of intensive care units, about improving the sound environment with sound absorbers during hospital renovations or construction and installing cyclic lighting elements [99]. They concluded that providing adjustable mobile solutions for patients and providing space around the patient bed had very positive effects on the staff. Lavender et al. (2020) carried out a study to investigate how the design of medical-surgical patient rooms can be developed to improve the efficiency, effectiveness and ergonomics of hospital staff and how these design features affect patients and attendants. In their study, the researchers presented 66 EBD guidelines (including entryway 16 guidelines, the patient clinical area 22 guidelines, the bathroom 17 guidelines, the family area 8 guidelines, storage areas for patients and their visitors 3 guidelines) that open up many opportunities to improve the design of patient rooms and can assist designers in their design decisions [100]. On the other hand, Kotzer et al. (2011) conducted a study to measure family and staff user satisfaction before and after alterations made on physical environmental conditions such as light, noise, temperature, aesthetics, comfort, security and privacy in a children's hospital in Denver. Researchers found that design and operational changes of light south-facing floor-to-ceiling windows are designed within the new built hospital, accommodate more natural light, as well as adequate foot candles to provide the necessary artificial lighting for staff to do the job as efficiently and as accurately as possible. In order to decrease the noise level, the usage of rubber floors are suggested in places where the carpet is not medically appropriate, such as operating rooms in the newly built hospital. This issue is also important in the usage of acoustic ceiling plates, especially in the neonatal intensive care unit, and also decentralized patient care stations in order to prevent noise. The authors have shown that the use of basic EBD principles in hospital designs can increase staff and family satisfaction in the built environment [101]. Han et al. (2018), proved that environmental conditions such as temperature, lighting, noise, music and scent are very important for the efficient and comfortable working of healthcare personnel [102]. In another study from Turkey, Ergun et al. (2017) focused on the current status of psychiatric clinics from the point of view of a therapeutic environment. They indicated that there were inadequacies in physical configuration and restricted therapeutic activities in Turkey [103].

• *Spatial Organization and Functionality*

In this section, spatial organization and functionality factors of EBD were examined in terms of the healthcare staff according to themes and sub-themes given in Table 7.

Table 7. Distribution of Publications Determined for EBD Approach by Evidence Levels

User Group	Themes	Sub-Themes	References	Evidence Level	Total Number of study	Lowest Level of Evidence	Highest Level of Evidence
Healthcare Staff	Spatial Organization and Functionality	Way Finding	[12]Bosia et al (2016)	III	6	III	I (rev)
			[15] Iyendo et al. (2016)	I (rev)			
			[71] Ebrahimi et al. (2013)	III			
			[77] Copeland & Chambers (2017)	III			
			[106] Wu et al. (2013)	III			
			[108] Chou et al. (2018)	II			
		Technical Support Spaces	[109] Haddad et al. (2012)	II	2	II	II
			[110] Rozenbaum et al. (2013)	II			

The spatial organization and functionality of hospitals should be able to meet the needs of users. Undoubtedly, the biggest users of these structures are their staff. However, it was observed that the studies conducted on this factor in the literature were generally discussed in terms of patients and their relatives. In the literature review conducted in terms of employees, there are few studies (Table 7) but the subject of finding direction involving both groups in studies are seen more in way finding. In the literature, it is emphasized that patients and their companions may face dangerous consequences such as loss of anxiety and control [33], stress, fatigue, headache, increase in blood pressure and death in some cases as a result of having difficulties in finding directions [86, 104, 105]. The help request of patients from the personnel to find their ways, cause loss of time [105]. According to Ulrich (2010), wayfinding problems can be solved by considering the healing effects of the physical environment together with some changes in organizational and functional scales [105]. For instance, it was determined that some hospitals use symbols such as ponds and artworks [106], well-organized lighting systems, plan schemes and signboards [15] in order to facilitate the movement of patients and prevent the loss of time. On the other hand, a study investigating the effects on walking distance energy of the nurses in terms of expenditure, and job satisfaction by Copealand and Chambers (2017) found that excessive walking distances in a hospital not only decrease nurses' job satisfaction but also contribute to inefficient care delivery [77]. Mohsin-Shaikh et al.'s (2019) study, which was a comprehensive analysis of healthcare facilities, aims to improve the healing environment in two acute care hospital buildings, related to design determinants, areal distribution and adequate spatial organization. Findings indicate that, wasted spaces could be removed up with suitable design in healthcare buildings [107]. A study conducted in Taiwan focused on gender differences in physical and psychological services and, attention was drawn to the equal health services of male and female patients [108]. Evidence obtained in the study conducted by the authors shows that there are five factors, including physical design, functional design, marking design, gender perception, and gender-friendly services in the measurement scale of hospital environments. The authors also found that gender-friendly hospitals had positive effects on customers' loyalty and willingness to pay [108].

In the studies determined in terms of technical support, it is seen that ergonomic designs were important in working conditions. Elements such as adjustable patient beds, raised toilets, and shower chairs were identified as evidence-based auxiliary design criteria for reducing health workers' musculoskeletal risk factors [24]. In addition, hospitals should get help from ergonomics experts to increase hospital staff productivity; to provide a more comfortable working environment for the personnel. Haddad et al. (2012) proved that ergonomic design of operating room equipment had positive effects on the quality of work efficiency [109]. Rozenbaum et al. (2013) proved that ergonomically designed medicine rooms have an effect on reducing medical errors [110].

IV. DISCUSSION

In this research, scientific studies on healthcare facilities were analyzed and evaluated on two main users, (patients/ relatives and healthcare personnel) within the scope of EBD criteria. In the study following questions aimed to be answered: "Which evidence-based design principles and findings were reached in previous literature regarding the impact of healthcare design on the physiological and psychological conditions of patients, patient relatives and the staff?" and "Is there sufficient scientific evidence on the healing properties of hospital architecture? At this point, the data obtained within the scope of the study consists of mixed methods and qualitative studies, and some quantitative studies have been identified. It has been observed that the identified studies are mostly handled in terms of patients and there is a lack of studies for healthcare staff. The considerable and most of the highest level of findings for patients are lighting/color, arts and aesthetics items, privacy, and

indoor air environment. In terms of personnel, it has been seen that working environment conditions are important for their psychological health and work efficiency.

Physical environmental factors such as lighting, noise level, sufficient green space, temperature and ventilation have direct effects on users. It has been proven in many studies on health sciences that physical environmental conditions have positive effects especially on psychological disorders, heart diseases, drug use, pain, and the desire for medical intervention. When the noise criteria for patients and their relatives in hospitals are examined; it has been observed that noise has very important effects on the user's health and there are some design criteria to prevent noise in the design of health buildings. For instance, the selection of sound-absorbing materials such as ceiling tiles, carpets, wooden furniture, the design of single-bed patient rooms, and the use of cork partitions around noisy equipment have been found to have noise-blocking properties [12, 31]. On the other hand, it has been determined that music has psychologically relaxing effects on the user; It has been observed that presenting music to patients in hospital settings, especially in the post-operative phase, is among the interventions that can reduce pain [45]. When the studies about lighting and color were examined, it was seen that different light sources and colors had positive physiological and psychological effects on patients. For this reason, it is noted in the studies that natural light and art works will be very important to the users in the hospital design process. On the other hand, it has been observed that appropriate lighting levels are needed in the delivery of patient health care services. In this context, appropriate lighting should be provided for individuals performing different activities. The most important factor in the illumination of patient rooms designed for patients, especially patients undergoing heart surgery and chemotherapy, is daylight saving [12, 46]. For this purpose, patient rooms should be planned in a position where they can benefit from daylight directly and adequately [15]. Studies have shown that the length of stay in rooms facing southeast is significantly reduced [44]. Considering the studies on art and aesthetic elements, it is revealed that these elements create positive effects on users in hospital designs and designs that encourage patients' exposure to these environmental elements should be made. Especially in units where child health care services are provided, the use of familiar and loved characters and objects by children is recommended [53, 54]. In these design parameters, which are thought to be made for adults, it is emphasized that the preferences of the individuals should be considered, and the culture, religion and geographical regions of the users may differ [16]. In this context, these design elements should be planned by considering the user profiles in hospital designs. In studies on patient privacy, the common belief is that single-bed patient rooms provide user privacy and infection control. For this reason, it has been understood from the studies that designers should take into account the opinions of users regarding privacy, and single-bed patient rooms have significant benefits not only in privacy but also in infection and ensuring efficiency in healthcare delivery [12, 51, 55, 57]. On the other hand, the provision of privacy reduces patients' medical needs and improves doctor-patient communication [12]. The common belief in studies on windows, views and healing gardens is that the natural environment has calming and pleasant effects on users and patients. Iyendo et al., (2016), emphasized that the presentation of natural elements used in places where there is no human-nature interaction has important effects on patient health [15]. In this context, it is possible to create physical environments that will contribute to the health of patients by using visual art elements in places where human nature interaction is not possible in hospital designs.

When the safety conditions are evaluated for the patients and their relatives, it is seen that the risk of infection is very important and the single-bed patient rooms contribute to the prevention of the spread of infection, but there is not enough scientific data for evidence-based inferences in this area. Considering the studies on patient falls and indoor air quality, a designer should consider using of handrails and non-slippery floor covering in the patients' rooms to prevent falls. A poor ventilation system in hospitals increases the risk of hospital infections such as lung and respiratory diseases for healthcare users' but there is insufficient scientific evidence to recommend a minimum ventilation rate for infection control and there is a need for interdisciplinary collaborative research in the future [79].

According to organization and functionality, wayfinding has anxiety and loss of control, stress, headache, and increase in blood pressure significant effects of user health. The integration of appropriate graphical indicators, color markings, and linear markings provide benefits to the staff as well as the users in finding direction in hospitals. It has been observed that the usage of efficient colors, pictorial text and signs to find direction in hospitals help confused people find their way [77, 88]. In this context, attention should be paid to the use of accent colors, pictorial texts and signs by hospital designers and hospital managers to help users find direction. In addition, a hospital designer should get help from a graphic designer for suitable wayfinding design elements. As for social support, it includes that family involvement in patient care provides patient satisfaction. Family areas in patients' rooms reduce patient falls, stress and depression and provide patient privacy. In hospitals, it is possible to increase

social support by providing waiting rooms and lounges with comfortable furniture, designing patient rooms suitable for visitors, and considering facilities that make it easier for family members to stay overnight [15]. However, within the scope of this study, only 1 study related to social support was obtained.

Physical environmental factors such as lighting, noise level, sufficient green space, and properties of medical spaces architectural design have direct effects on healthcare employees' efficiency. However, in the research, it has been observed that the identified studies were mostly handled in terms of patients and there was a lack of studies for healthcare staff. Similar results were obtained in the study by Huisman et al (2012) and considering that the main users of healthcare structures are employees, there is also a lack of evidence-based research on the working environments and expectations of this group [24]. Therefore, it is possible to say that more research is needed for healthcare professionals.

In the evidence obtained except the physical environmental conditions within the scope of the study, it was seen that there are ergonomic conditions as evidence-based design criteria that were important for healthcare professionals. Ergonomic design of operating room equipment had positive effects on the quality of work efficiency and ergonomically designed medicine rooms have an effect on reducing medical errors [109, 110]. In this context hospitals should get help from ergonomics experts to increase hospital staff productivity, and to provide a more comfortable working environment.

V. CONCLUSION

Health facilities, which have an important place among public buildings, should be designed to provide comfortable conditions and increase the quality of life for patients/health personnel. Feedback received from patients and healthcare personnel will provide significant design input to the designs of hospitals. Therefore, this study, it is aimed to analyze and examine the environmental design factors that should be considered to create therapeutic environments in hospitals. This issue is particularly important for hospitals' design because making designs that can provide good and quality healthcare in the future will increase the service performance in hospital architecture.

EBD approach gained importance in the design of health buildings recently. When the data obtained within the scope of the study were evaluated, it is possible to say that the studies are generally randomly controlled studies, case studies, and expert experiences and opinions. Most of the evidence was obtained primarily from physical environment factors including lighting/color, arts and aesthetics items and privacy for patients' relatives. It was understood from the previous studies on health sciences that physical environmental conditions had positive effects on psychological disorders, heart diseases, medication usage, length of stay in the hospital, pain and medical intervention. The first issue that requires further attention is that there are sufficient number of studies in which inferences about designing each functional area independently of each other and in accordance with the service among the obtained data. The findings show that there is a link between a number of aspects of the physical environment of hospitals and the well-being of patients, family comfort of their relatives and the care process as a whole. In this research, it has been seen that it is important to consider design and physical environmental factors for user health and well-being in healthcare buildings. The effect of a well-planned physical hospital environment has significant benefits on patients' anxiety and pain. It has been concluded that the development of design strategies to provide lighting and privacy, especially art and aesthetic elements, among physical environmental factors, is very effective on the health of the user physically and psychologically. As a result of the research, it has been revealed that the designs of single-bed patient rooms, which have a great effect on ensuring privacy, have health-improving effects such as noise control, infection control, and privacy control. Thus, they should be considered as a design strategy in hospital planning. But a poor ventilation system in hospitals increases the risk of nosocomial infections for healthcare users, but there is insufficient scientific evidence to recommend a minimum ventilation rate for infection control and future interdisciplinary research is needed.

Suggestions developed according to the data obtained in terms of EBD strategies within the scope of the study are explained below:

- In the general hospital configuration, it may not be possible to place all patient rooms facing southeast or green space. For this reason, designers and other actors who will take part in the design need to create their design strategies by taking into account the level of natural sunlight.
- In cases where it is not possible to provide human-nature interaction, physical environments that will contribute to the health of patients by using visual art elements should be created with wall panels and

digital visuals. Thus, it is possible to increase the quality of health care services by reducing patient care costs with simple and easy-to-apply design interventions.

- Considering that the main users of healthcare structures are employees, there is also a lack of evidence-based research on the working environments and expectations of this group. Therefore, it is possible to say that more research is needed for healthcare professionals.
- In the findings obtained within the scope of this study, it was seen that physical environmental factors such as lighting, noise level, sufficient green space, temperature and ventilation have direct effects on employees. In this context, hospital designers should be encouraged to consider design decisions according to the requirements needed in different spaces by user groups, such as lighting levels, and ventilation.
- In addition, it was seen that the most important design strategies for increasing the working efficiency of healthcare workers are ergonomic designs. Therefore, hospital designers should get help from ergonomics experts to increase hospital staff productivity; and to provide a more comfortable working environment.
- Considering the different health service delivery and especially healthcare personnel staff diversity of hospitals, it can be said that more research is needed that could improve these findings and address specific contexts and hospital units that will increase the evidence-based design factors in healthcare structures.

Finally, the data obtained show that the physical characteristics of the healthcare facilities are more effective on the physical and psychological health of the users. In this respect, healthcare facilities, which have an important place in the health quality of society, should be able to respond to excellently to user needs. Therefore, in the design of healthcare buildings, design criteria that will increase the working performance of patient health and working health personnel should be determined and these criteria should be considered during the design phase. For this reason, that there should be done adequate research on user needs while designing health buildings. Since different users such as doctors, health personnel and patients in hospitals will have different needs, designs suitable for the user profile are needed. Evidence-based design recommendations are a valuable design concept tool to consider in the design process. There is an increase in the construction of healthcare buildings to meet the healthcare service needs of the increasing population in the world. However, in most buildings, user needs are generally ignored and a customer-oriented management approach is developed. Therefore, it is concluded that the points identified in the studies are important for understanding the needs and relations between the built environment and the user. In addition, it is thought that the findings of the study can guide for similar studies in determining the effects of the physical environment on patients and health staff in the design of healthcare facilities and other design factors needed in the field.

REFERENCES

- [1] Zimring, C., & Bosch, S. (2008). Building The Evidence Base for Evidence-Based Design: Editors' Introduction. *Environment and Behaviour*, 40(2), 147-150.
- [2] Becker, N., & Carthey, J. (2007). Evidence-based Design: Key Issues in a Collaborative Process. *Interdisciplinarity in the Built Environment Procurement Conference*. 23-26 September, New Castle, Australia, 1-12.
- [3] Andrade, C., Lima, M. L., Fornara, F., & Bonaiuto, M. (2012). Users' Views of Hospital Environmental Quality: Validation of the Perceived Hospital Environment Quality Indicators (PHEQIs). *Journal of Environmental Psychology*, 32, 97-111.
- [4] Applebaum, D., Fowler, S., Fiedler, N., Osinubi, O., & Robson, M. (2010). The Impact of Environmental Factors on Nursing Stress, Job Satisfaction and Turnover Intention. *Journal Nurs Admin*, 40(7-8), 323-328.
- [5] Waroonkun, T. (2018). The Environmental Factors Affecting Service Satisfaction of Community Hospital. *Journal of Design and Built Environment*, 18(1), 19-28.
- [6] Nordin, S., McKee, K., Wijk, H., & Elf, M. (2017). Exploring Environmental Variation in Residential Care Facilities for Older People. *Health Environments Research & Design Journal*, 10(2), 49-65.
- [7] Macallister, L., Zimring, C., & Ryherd, E. (2019). Exploring the Relationships Between Patient Room Layout and Patient Satisfaction. *Health Environments Research and Design J.*, 12(1), 91-107.
- [8] Bellia, L., Bisegna, F., & Spada, G. (2011). Lighting in Indoor Environments: Visual and Non-Visual Effects of Light Sources with Different Spectral Power Distributions. *Building and Environment*, 46, 1984-1992.
- [9] Kim, G., & Kim, T. J. (2010). Healthy Daylighting Design for the Living Environment in Apartments in Korea. *Building and Environment*, 45, 287-294.

- [10] Ulrich, R. S., Zimrig, C., Zhu, X., Dubose, J., Bo Seo, H., Seon Choi, Y., Quan, X., & Joseph, A. (2008). A Review of the Research Literature on Evidence-based Healthcare Design. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 1(3), 61-124.
- [11] Di Cicco, S. (2002). Well-being in Hospitals. *Contributions to the 2nd USO-Built Research Conference*. 28-30 November, Switzerland, 75-79.
- [12] Bosia, D., Marino, D., & Peretti, G. (2016). Health Facilities Humanisation: Design Guidelines Supported by Stastical Evidence. *Ann Ist Sanita*, 52(1), 33-39.
- [13] Berry, L., Parker, D., Coile, R.C., Hamilton, D.K., O'neil, D.D., & Sadler, B. L. (2004). The Business Case for Better Buildings. *Frontiers*, 3-24.
- [14] Selçuk, E. (2012). *Sağlık Yapılarında Tasarım Yönetimine Yönelik Bir Model Önerisi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü/ Yapı Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [15] Iyendo, T.O., Uwajeh, P. C., & Ikenna, E. S. (2016). The Therapeutic Impacts of Environmental Design Interventions on Wellnes in Clinical Settings: A Narrative Review. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, 24, 174-188.
- [16] Brambilla, A., Rebecchi, A., & Capolongo, S. (2019). Evidence Based Design. A Literature Review of the Recent Publications About the EBD Impact of Built Environment on Hospital Occupants' and Organizational Outcomes. *Ann Ig*, 31, 165-180.
- [17] Akobeng, A. K. (2005) Principles of Evidence Based Medicine. *Arch Dis Child*, 90, 837-840.
- [18] Steglitz, J., Warnick, J. L., Hoffman, S. A., Johnston, W., & Spring, B. (2015). Evidence-Based Practise. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 8, 332-338.
- [19] Tomlin, G., & Borgetto, B. (2011). Research Pyramid: A New Evidence-Based Practise Model for Occupational Therapy. *American Journal of Occupational Therapy*, 65, 189-196.
- [20] Stichler, J. (2010). Weighing the Evidence. *Health Environments Research & Design Journal*, 3(4), 3-7.
- [21] Albay, C., & Batmaz A. G. (2014). Ortopedi ve Travmatoloji Eğitimindeki Bilimsel Çalışmalar. *TOTBİD Dergisi*, 1, 504-508.
- [22] Hujuel, P. (2008). Grading the Evidence: The Core of EBD. *Evid Based Dent Pract*, 8(3), 116-8.
- [23] Bahar, Z., (2015). Böbrek Hastalıkları ve Diyaliz Hemşireliğinde Kanıt Çalışmaları. 25. *Ulusal Böbrek Hastalıkları Diyaliz ve Transplantasyon Hemşireliği Kongresi*, 21- 25 Ekim 2015, Antalya. <http://www.ndthd.org.tr/images/bobrek-hastaliklari-ve-diyaliz-hemshireliginde-kanit-calismalari.pdf>, (15.02.2019)
- [24] Huisman, E. R. C. M., Morales, E., Van Hoof, J., & Kort, H. S. M. (2012). Healing Environment: A Review of the Impact of Physical Environmental Factors on Users. *Building and Environment*, 58(2012), 70-80.
- [25] Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46.
- [26] Kılıç, S. (2015). Kappa Testi. *Journal of Mood Disorders*, 5(3), 142-4.
- [27] Ulukök, Ş., Çelik, H., & Sarı, U. (2013). Basit Elektrik Devreleriyle İlgili Bilgisayar Destekli Uygulamaların Deneysel Süreç Becerilerinin Gelişimine Etkisi. *Kurumsal Eğitim Bilim Dergisi*, 6(1), 77-101.
- [28] Morrison, W. E., Haas, E. C., Shaffner, D. H., Garrett, E. S., & Fackler, J. C. (2003). Noise, Stress, and Annoyance in Pediatric Intensive Care Unit. *Critical Care Medicine*, 31(1), 113-119.
- [29] Allaouchiche, B., Duflo, F., Debon, R., Bergeret, A., & Chassard, D. (2006). Noise in the Postanaesthesia Care Unit. *Br J Anaesth*, 88(3), 369-373.
- [30] Tang, H., Ding, J., Li, C., & Li, J. (2019). A Field Study on Indoor Environment Quality of Chinese Inpatient Buildings in a Hot and Humid Region. *Build and Environment*, 151, 156-167.
- [31] Luetz, A., Weiss, B., Penzel, T., Fietze, I., Glos, M., Wernecke, K. D., Bluemke, B., Dehn, A. M., Willemeit, T., Finke, A., & Spies, C. (2016). Feasibility of Noise Reduction by a Modification in ICU Environment. *Physiol Meas*, 37(7), 1041-55.
- [32] Harris, D. (2016). Surface Finish Materials: Considerations for the Neonatal Intensive Care Unit (NICU). *Newborn and Infant Nursing Reviews*, 16, 203-207.
- [33] Ampt, A., Harris, P., & Maxwell, M. (2008). *The Health Impact of the Design of Hospital Facilities on Patient Recovery and Wellbeing, and Staff Wellbeing: A review of literature*. University of New South Wales, Sydney.
- [34] R., Quan, X., Zimring, C., Joseph, A., & Choudhary, R. (2004). *The Role of the Physical Environment in the Hospital of the 21st century: A Once-in-a-Lifetime Opportunity*. Center for Health Design, Concord CA (2004), www.healthdesign.org/research/reports/pdfs/role_physical_env.pdf (15.02.2019)

- [35] Devlin, A.S., & Arneill, A. B. (2003). Health Care Environments and Patient Outcomes: A Review of Literature. *Environment and Behaviour*, 35(5), 665-694.
- [36] Hobday, R. (2011). *Indoor Environment Quality in Refurbishment*. Historic Scotland Research Report 12, Scotland.
- [37] Alzoubi, H., Al-rqibat, S., & Ve Bataineh, R. (2010). Pre-versus Post-occupancy Evaluation of Daylight Quality in hospitals. *Building and Environment*, 45, 2652-2665.
- [38] Altimier, L. (2004). Healing Environments: For Patients and Providers. *Newborn and Infant Nursing Reviews*, 4(2), 89-92.
- [39] Fontaine, D. K. (2005). Impact of the Critical Care Environment on the Patient, in *Critical Care Nursing: A Holistic Approach*. 8th Ed., Philadelphia, Pa: Lippincott Williams & Wilkins, 36-45, www.medic94.com/CCEMTP/morton, (27.07.2020).
- [40] Eastman, C. I., Young, M. A., Fogg, L. F., Liu, L., & Meaden, P. M. (1998). Bright Light Treatment of Winter Depression. *Archives of General Psychiatry*, 55, 883-889.
- [41] Evans, G.W. (2003). The Built Environment and Mental Health. *Journal of Urban Health Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 80(4), 536- 555.
- [42] Van Bommel, W. J. M. (2006). Non-visual Biological Effect of Lighting and the Practical Meaning for Lighting for Work. *Applied Ergonomics*, 37, 461-466.
- [43] Walch, J. M., Rabin, B. S., Day, R., Williams, J. N., Choi, K., & Kang, J. D. (2005). The Effect of Sunlight on Postoperative Analgesic Medication Use: A Prospective Study of Patients Undergoing Spinal Surgery. *Psychosomatic Medicine*, 67(1), 156-163.
- [44] Choi, J. H., Beltran, L.O., & Kim, H. S. (2012). Impacts of Indoor Daylight Environments on Patient Average Length of Stay (ALOS) in a Healthcare Facility. *Building and Environment*, 50, 65-75.
- [45] Laursen, J. Danielsen, A., & Rosenberg, J. (2014). Effects of Environmental Design on Patient Outcome: A Systematic Review, *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 7(4), 108-119.
- [46] Wang, Z., & Puksza, M. (2018). Private Rooms, Semi-Open Areas, or Open Areas for Chemotherapy Care: Perspectives of Cancer Patients, Families, and Nursing Staff. *HERD*, 11(3), 94-108.
- [47] Ghamari, H., & Amor, C. (2016) The Role of Color in Healthcare Environments, Emergent Bodies of Evidence-based Design Approach. *Sociology and Anthropology*, 4(11), 1020-1029.
- [48] Iyendo, T.O. (2014). Enhancing the Hospital Healing Environment Through Art and Day-light for Users's Therapeutic Process. *Internatioanl Journal of Arts and Commerce*, 3(9), 101-119.
- [49] Schweitzer, M., Gilpin, L., & Framptons, S. (2004). Healing Spaces: Elements of Environmental Design that Make an Impact on Health. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 10, 71-83.
- [50] Tinner, M., Crovella, P., Rosenbaum, P. (2018). Perceived Importance of Wellness Features at a Cancer Center: Patient and Staff Perspectives. *Health Environments Research & Design Journal* 1-14.
- [51] Peeters, K., Jellema, P., Annemans, M., & Heylighen, A. (2018). How Do Adolescents Affected by Cancer Experience a Hospital Environment?. *Journal of Adolescent and Young Adult Oncology*, 7(4), 488-492.
- [52] Vetter, D., Barth, J., Uyulmaz, S., Uyulmaz, S., Vonlanthen, R., Belli, G., Montorsi, M., Bismuth, H., Witt, C. M., & Clavien, P. A. (2015). Effects of Art on Surgical Patients: A Systematic Review and Meta-analysis. *Annals of surgery*, 262(5), 704-713.
- [53] Water, T., Wrapson, J., Tokalahi, E., Payam, S., & Reay, S. (2017). Participatory Art-based Research with Children to Gain their Perspectives on Designing Healthcare Environments. *Contemporary Nurse*, 53(4), 456-473.
- [54] Salderay, B. (2018). Hastane Ortamında İyileştirme Sürecine Katkı Sağlayan Disiplinler Arası Bir Tasarım: Kemali Hoca'nın Gökyüzü Odası Projesi. *The Journal of International Lingual, Social and Educational Sciences*, 4(2), 263-276.
- [55] Trochelman, K., Albert, N., Spence, J., Murray, T., & Slifcak, E. (2012). Patients and Their Families Weigh in on Evidence-Based Hospital Design. *CriticalCareNurse*, 32(1), 1-13.
- [56] Stevens, D. C., Helseth, C. C., Thompson, P.A., Pottala, J.V. Khan, M.A., & Munson, D.P. (2012). A Comprehensive Comparison of Open-bay and Single-Family-room Neonatal Intensive Care Units at Stanford Children's Hospital. *Health Environments Research & Design Journal*, 5(4), 23-39.
- [57] Bosch, S., Bledsoe, T., & Jenzarli, A. (2012). Staff Perceptions Before and After Adding Single-family Rooms in the NICU. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 5(4), 64-75.
- [58] Bazuin, D., & Cardon, K. (2011). Creating Healing Intensive Care Unit Environments: Physical and Psychological Considerations in Designing Critical Care Areas. *Crit Care Nurs Q*, 34(4), 259-267.

- [59] Larsen, L. S., Larsen, B. H., & Birkelund, R. (2014). A Companionship Between Strangers—the Hospital Environment as a Challenge in Patient–patient Interaction in Oncology Wards. *Journal of Advanced Nursing*, 70(2), 395-404.
- [60] Ferri, M., Zygun, D. A., Harrison, A., & Stelfox, H. (2015). Evidence-Based Design in an Intensive Care Unit: End-User Perceptions. *BMC Anesthesiology*, 15, 57, 1-9.
- [61] Farley, K. M. J., & Veitch, J. A. (2001). *A Room with a View: A Review of the Effects of Windows on Work and Well-Being*. National Research Council Canada Report, RR136, Canada.
- [62] Çakır Kıasıf, G. (2018). Mimarlık, Planlama ve Tasarım Alanında Yenilikçi Yaklaşımlar-*Toplumsal İnanç ve Düşünce Sisteminin Geleneksel Konut Mimarisindeki İzdüşümleri: Geleneksel Japon Evi Örneği*, Gece Akademi, Ankara, 67-83.
- [63] Joye, Y. (2007). Architectural Lessons from Environmental Psychology: The Case of Biophilic Architecture. *Review of General Psychology*, 11(4), 305-328.
- [64] Connellan, K., Gaardboe, M., Riggs, D., Due, C., Reinschmidt, A., & Mustillo L. (2013). Stressed Spaces: Mental Health and Architecture. *Health Environments Research & Design Journal*, 6(4), 127–168.
- [65] Campagnol, G., & Shepley, M. M. (2014). Positive Distraction and the Rehabilitation Hospitals of João Filgueiras Lima. *Health Environments Research and Design Journal*, 8(1), 199-227.
- [66] Reeve, A., Nieberler-Walker, K., & Desha, C. (2017). Healing Gardens in Children’s Hospitals: Reflections on Benefits, Preferences and Design from Visitors’ Books. *Urban Forestry & Urban Greening*, 26, 48-56.
- [67] Jiang, S., Staloch, K., & Kaljevic, S. (2018) Opportunities and Barriers to Using Hospital Gardens: Comparative Post Occupancy Evaluations of Healthcare Landscape Environments, *Journal of Therapeutic Horticulture*, 28(2), 24-55.
- [68] Belčáková, I., Galbavá, P., & Majorošová, M. (2018) Healing and Therapeutic Landscape Design-Examples and Experience of Medical Facilities. *International Journal of Architectural Research*, 12(3), 128-151.
- [69] Van der Riet, P., Jitsacorn, C., Junlapeeya, P., Dedkhard, S., & Thursby, P. (2014). Nurses' Stories of a 'Fairy Garden' Healing Haven for Sick Children. *Journal of Clinical Nursing*, 23, 3544-3554.
- [70] Weerasuriya, R., Henderson-Wilson, C., & Townsend, M. (2019). A Systematic Review of Access to Green Spaces in Healthcare Facilities. *Urban forestry & urban greening*, 40, 125-132.
- [71] Ebrahimi, A., Mardomi, K., & Hassanpour Rahimabad, K. (2013). Architecture Capabilities to Improve Healthcare Environments. *Trauma Mon*, 18(1), 21-7.
- [72] Usta Yeşilbakan, Ö., & Üstündağ, S. (2019). Kanserli Bireylerde Düşmeler. *Hemşirelikte Eğitim ve Araştırma Dergisi*, 16(2), 152-159.
- [73] Lorenz, S. G. (2011). Hospital Room Design and Health Outcomes of the Aging Adult. *Health Environments Research & Design Journal*, 4(2), 23-35.
- [74] Cesario, S. K. (2009) Designing Health Care Environments: Part I: Basic Concepts, Principles, and Issues Related to Evidence-Based Design. *The Journal of Continuing Education in Nursing*, 40(6), 280-288.
- [75] Bayramzadeh, S., Portillo, M., & Carmel-Gilfilen, C. (2018). Understanding Design Vulnerabilities in the Physical Environment Relating to Patient Fall Patterns in a Psychiatric Hospital: Seven Years of Sentinel Events. *Journal of the American Psychiatric Nurses Association*, 25(2), 134-145.
- [76] Waller, S. (2012). Redesigning Wards to Support People with Dementia in Hospital. *Nursing Older People*, 24(2), 16-21.
- [77] Copeland, G., & Chambers, M. (2017). Effects of Unit Design on Acute Care Nurses’ Walking Distances, Energy Expenditure, and Job Satisfaction: A Pre-Post Relocation Study. *Health Environments Research & Design Journal*, 10(4), 22-36.
- [78] Pati, D., Valipoor, S., Lorusso, L., Mihandoust, S., Jamshidi, S., Rane, A., & Kazem-Zadeh, M. (2021). The Impact of the Built Environment on Patient Falls in Hospital Rooms: An Integrative Review. *Journal of patient safety*, 17(4), 273-281.
- [79] Shajahan, A., Culp, C. H., & Williamson, B. (2019). Effects of Indoor Environmental Parameters Related to Building Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems on Patients' Medical Outcomes: A Review of Scientific Research on Hospital Buildings. *Indoor Air*, 29(2), 161-176.
- [80] Jiang, S., Huang, L., Chen, X., Wang, J., Wu, W., Yin, S., Chen, W., Zhan, J., Yan, L., Ma, L., Li, J., & Huang, Z. (2003). Ventilation of Wards and Nosocomial Outbreak of Severe Acute Respiratory Syndrome Among Healthcare Workers. *Chinese Medical Journal*, 116(09), 1293-1297.
- [81] Menzies, D., Fanning, A., Yuan, L., & FitzGerald, J. M. (2000). Hospital Ventilation and Risk for Tuberculous Infection in Canadian Health Care Workers. Canadian Collaborative Group in Nosocomial Transmission of TB. *Annals of Internal Medicine*, 133(10), 779-789.

- [82] Dougall, L. R., Booth, M. G., Khoo, E., Hood, H., MacGregor, S. J., Anderson, J. G., & Maclean, M. (2019). Continuous Monitoring of Aerial Bioburden within Intensive Care Isolation Rooms and Identification of High-Risk Activities. *Journal of Hospital Infection*, 103(2), 185-192.
- [83] Azimi, F., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Hassanvand, M. S., Alimohammadi, M., Afhami, S., & Musavi, S. N. (2013). Fungal Air Quality in Hospital Rooms: A Case Study in Tehran, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 11(1), 1-4.
- [84] Eijkelenboom, A., & Bluysen, P. M. (2019). Comfort and Health of Patients and Staff, Related to the Physical Environment of Different Departments in Hospitals: A literature Review. *Intelligent Buildings International*, 1-19.
- [85] Abbasi, F., & Samaei, M. R. (2019). The Effect of Temperature on Airborne Filamentous Fungi in the Indoor and Outdoor Space of a Hospital. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(17), 16868-16876.
- [86] Young, C., & Koopsen, C. (2005) *Spirituality Health, and Healing*. SLACK Incorporated, USA, 343.
- [87] Kalantari, S., & Snell, R. (2017). Post-occupancy Evaluation of a Mental Healthcare Facility Based on Staff Perceptions of Design Innovations. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 10(4), 121-135.
- [88] Morag, I., Heylighen, A., & Pintelon, L. (2016). Evaluating the Inclusivity of Hospital Wayfinding Systems for People with Diverse Needs and Abilities. *Journal of health services research & policy*, 21(4), 243-248.
- [89] Taşdemir, N., & Özşaker, E. (2007) Yoğun Bakım Ünitesinde Ziyaret Uygulaması: Ziyaretin Hasta, Hasta Ailesi ve Hemşire Üzerine Etkileri. *C. Ü. Hemşirelik Yüksekokulu Dergisi*, 11, 27-31.
- [90] Ulrich, R. S. (2001) Effects of Healthcare Environmental Design on Medical Outcomes. *Proceedings of the Second International Conference on Health and Design*, Svensk Byggtjänst, Stockhol, 49-59.
- [91] Andritsch, E., Stöger, H., Bauernhofer, T., Andritsch, H., Kasperek, A. K., Schaberl-Moser, R., & Samonigg, H. (2013). The Ethics of Space, Design and Color in an Oncology Ward. *Palliative & Supportive Care*, 11(3), 215-221.
- [92] Kesecioglu, J. (2015). Improving the Patient's Environment: The Ideal Intensive Care Unit. *Réanimation*, 24, S341-S343.
- [93] Davis, C., Cohen, R., & Apolinsky, F. (2005). Providing Social Support to Cancer Patients: A Look at Alternative Methods. *Journal of Psychosocial Oncology*, 23(1), 75-85.
- [94] Bennett, S. J., Perkins, S. M., Lane, K. A., Deer, M., Brater, D. C., & Murray, M. D. (2001). Social Support and Health-Related Quality of Life in Chronic Heart Failure Patients. *Quality of Life Research*, 10(8), 671-682.
- [95] Koivula, M., Paunonen- Ilmonen, M., Tarkka, M. T., Tarkka, M., & Laippala, P. (2002). Social Support and its Relation to Fear and Anxiety in Patients Awaiting Coronary Artery Bypass Grafting. *Journal of Clinical Nursing*, 11(5), 622-633
- [96] Buchanan, T. L., Barker, K. N., Gibson, J. T., Jiang, B. C., & Pearson, R. E. (1991). Illumination and Errors in Dispensing. *American journal of hospital pharmacy*, 48(10), 2137-2145.
- [97] Sadatsafavi, H., Walewski, J., & Shepley, M. M. (2015). Factors Influencing Evaluation of Patient Areas, Work Spaces, and Staff Areas by Healthcare Professionals. *Indoor and Built Environment*, 24(4), 439-456.
- [98] Olausson, S., Ekebergh, M., & Österberg, S. A. (2014). Nurses' Lived Experiences of Intensive Care Unit Bed Spaces as a Place of Care: A Phenomenological Study. *Nursing in Critical Care*, 19(3), 126-134.
- [99] Sundberg, F., Olausson, S., Fridh, I., & Lindahl, B. (2017). Nursing Staff's Experiences of Working in an Evidence-based Designed ICU Patient Room—An Interview Study. *Intensive and Critical Care Nursing*, 43, 75-80.
- [100] Lavender, S. A., Sommerich, C. M., Sanders, E. B. N., Evans, K. D., Li, J., Radin Umar, R. Z., & Patterson, E. S. (2020). Developing Evidence-based Design Guidelines for Medical/Surgical Hospital Patient Rooms that Meet the Needs of Staff, Patients, and Visitors. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 13(1), 145-178.
- [101] Kotzer, A. M., Zacharakis, S. K., Reynolds, M., & Bunning, F. (2011). Evaluation of the Built Environment: Staff and Family Satisfaction Pre-and Post-occupancy of the Children's Hospital. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 4(4), 60-78.
- [102] Han, J., Kang, H. J., & Kwon, G. H. (2018). A Measurement for Evaluating the Environmental Quality of Advanced Healthcare Facilities: Intelligent Healthscape Quality for Medical Staff. *Building and environment*, 144, 532-541.
- [103] Ergün, G., Işıl, I. Ş. I. K., & Dikeç, G. (2019). The Examination of the Some Aspects of the Therapeutic Environment of Psychiatric Inpatient Clinics in Turkey. *Clinical and Experimental Health Sciences*, 9(1), 14-20.

- [104] Koopsen, C., & Young, C. (2009). *Integrative Health: A Holistic Approach for Health Professionals*, Jones and Barlett Publishers, LLC, USA, 360.
- [105] Ulrich, R. S., Berry, L. L., Quan, X., & Parish, J. T. (2010). A Conceptual Framework for the Domain of Evidence-based Design. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 4(1), 95-114.
- [106] Wu, Z., Robson, S., & Hollis, B. (2013). The Application of Hospitality Elements in Hospitals. *Journal of Healthcare Management*, 58(1), 47-62.
- [107] Mohsin-Shaikh, S., Furniss, D., Blandford, A., McLeod, M., Ma, T., Beykloo, M. Y., & Franklin, B. D. (2019). The Impact of Electronic Prescribing Systems on Healthcare Professionals' Working Practices in the Hospital Setting: A Systematic Review and Narrative Synthesis. *BMC health services research*, 19(1), 1-8.
- [108] Chou, Y. C., Dang, V. T., Yen, H. Y., & Hsu, P. S. (2018). Developing a Measurement Scale of Gender-friendly Hospital Environments: An Exploratory Study of Customer Perceptions in Taiwan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), 2227.
- [109] Haddad, O., Sanjari, M. A., Amirfazli, A., Narimani, R., & Parnianpour, M. (2012). Trapezius Muscle Activity in Using Ordinary and Ergonomically Designed Dentistry Chairs. *The international journal of occupational and environmental medicine*, 3(2), 76-83.
- [110] Rozenbaum, H., Gordon, L., Brezis, M., & Porat, N. (2013). The Use of a Standard Design Medication Room to Promote Medication Safety: Organizational Implications. *International journal for quality in health care*, 25(2), 188-196.

Tedarikçi Seçiminde Dematel ve Aksiyomatik Tasarım Tekniği Uygulaması

Supplier Selection with Dematel and Axiomatic Design

Şule Emmi¹, Ezgi Güler^{2*}, Selen Avcı³, Zerrin Aladağ⁴

Geliş / Received: 23/06/2022

Revize / Revised: 21/11/2022

Kabul / Accepted: 26/12/2022

ÖZ

Tedarik zinciri yönetiminin en önemli adımlarından biri olan doğru tedarikçi seçimi, rekabetçi koşullarda işletmenin belirlemiş olduğu hedeflere ulaşmasında büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, lojistik sektöründe faaliyet gösteren bir firmada tedarikçi seçim problemi ele alınmıştır. Öncelikle, tedarikçi seçiminin yapılacağı ürün grubunun belirlenmesi amacıyla FSN (Fast-Slow-NonMoving) analizi ile kritik yedek parça seçilmiştir. Ardından, problemin çözümü için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden Aksiyomatik Tasarım ve Dematel (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) yöntemleri önerilmiştir. Tedarikçi seçimine etki eden kriterler arasındaki ilişki Dematel ile yorumlanmış ve kriterler “etkileyen” ve “etkilenen” olarak iki gruba ayrılmıştır. Tedarikçiler arasında seçim ve sıralama ise Aksiyomatik Tasarım ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kriterlerin eşit ağırlığa sahip olmadığı durum da gözönüne alınarak kriterler Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle ağırlıklandırılmış ve alternatifler Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım ile yeniden sıralanmıştır. Son olarak, Dematel yönteminde “etkilenen” olarak belirlenen kriterler analizden çıkarılarak metodoloji tekrarlanmıştır. Böylece kriterler arasındaki neden-sonuç ilişkisinin belirlenmesinin sonuçlara etkisi yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Tedarikçi Seçimi, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), Aksiyomatik Tasarım, Dematel, AHP*

ABSTRACT

Supplier selection is one of the most important steps of supply chain management, and choosing the right supplier is of great importance in achieving the goals of the companies under competitive conditions. In this study, the supplier selection problem in a company operating in the logistics sector is discussed. Firstly, critical spare parts have been selected by FSN (Fast-Slow-Non-Moving) analysis in order to determine the product group from which supplier selection would be made. Axiomatic Design and Dematel (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) method, which are among the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques, have been proposed to solve the problem. The relationships between the criteria influencing the supplier selection have been interpreted via Dematel and the criteria have been divided into two groups as “dispatcher” and “receiver”, and selection and ranking among the suppliers have been carried out with Axiomatic Design. In addition, considering

¹İletişim: suleemmi@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-5664-8506>)

Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: ezgi.guler@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8789-8244>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

³İletişim: selen.avci@kocaeli.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7433-5696>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

⁴İletişim: zaladag@kocaeli.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5986-7210>)

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

the fact that the criteria do not have equal weight, the criteria have been weighted by the Analytical Hierarchy Process (AHP) method and the ranking obtained by Weighted Axiomatic Design have been compared with the previous ranking. Finally, the criteria determined as “receiver” in the Dematel method have been removed from the analysis and the methodology has been repeated. Thus, the effect of determining the cause-effect relationship between the criteria on the results has been interpreted.

Keywords- *Supplier Selection, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Axiomatic Design, Dematel, AHP*

I. GİRİŞ

İşletmeler, günümüzün rekabetçi koşullarında kârlılıklarının artmasını sağlayacak ürün ve hizmetleri pazara sunabilmelidir. Müşteri beklentilerinin çok kısa süre içinde değiştiği göz önüne alındığında, işletmelerin talepleri karşılayabilmek için hızlı çözümler üretmesi gerektiği açıktır. Bu durum tedarik zincirinin etkin bir şekilde yönetilmesi ile mümkündür. Doğru tedarikçi ile çalışmak, prosesin sorunsuz işlenmesini ve terminlerde sapma yaşanmamasını sağlayarak müşteri memnuniyetine ve kârlılığa doğrudan etki eden temel faktörlerdendir [1]. Bu nedenle, tedarik zincirindeki en önemli problemlerden biri işletmeleri strateji ve hedeflerine ulaştırabilecek en uygun tedarikçi seçiminin yapılmasıdır.

Karar problemlerinin kompleks yapısı, doğru ve etkin seçim yapılırken bilimsel yöntemlerin kullanımını zorunlu hale getirmiş ve literatürde karar problemlerinin çözümü için çok sayıda Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniği geliştirilmiştir. Tedarikçi seçimi, çoğu zaman birbirleriyle çelişen farklı kriterleri ve çok sayıda alternatifi birlikte değerlendirmeyi gerektirdiğinden işletmeleri meşgul eden önemli bir karar problemi olarak ÇKKV yöntemleriyle ele alınabilir. Karar verme problemlerinin çoğunda olduğu gibi tedarikçi seçiminde de değerlendirme ve seçme olmak üzere iki temel adım bulunmaktadır. Değerlendirme adımında genellikle tedarikçi seçimine etki eden kriterler belirlenir ve derecelendirilir. Seçim adımında ise derecelendirmeye bağlı olarak en uygun tedarikçi tespit edilir[2].Bu çalışmada, lojistik sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin tedarikçi seçim problemi için ÇKKV tekniklerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Aksiyomatik Tasarım ve Dematel (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)yöntemleri kullanılmıştır.

Aksiyomatik Tasarım, ürün, sistem ve süreçler için tasarılmasını bilimsel açıdan ortaya koymak amacıyla geliştirilmiş bir tekniktir. Yöntem, tasarım ve sistem aralıklarını belirleyerek bilgi içeriklerinin hesaplanması ve en küçük değere sahip bilgi içeriğinin tercih edilmesi temeline dayanmaktadır. Bilgi içeriği en küçük olan seçenек işletmenin isteklerine en yakın olan seçenektir [3].Dematel tekniği ise kriterleri etkileyen yada etkilenen olarak gruplandırarak kriterler arasındaki ilişkiyi net bir şekilde tespit etmeye sağlar. Böylece, karar vericiler, kriterler arasındaki nedensel ilişkiyi ayırt edebilir [4].Bu çalışmada, üzerinde çalışılacak ürün grubu belirlendikten sonra Dematel yöntemiyle kriterler arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Ardından, kriterler uzman görüşü alınarak AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır. Alternatif tedarikçiler Aksiyomatik Tasarım ve Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım yöntemleriyle önce tüm kriterler kullanılarak, ardından yalnızca “etkileyen” kriterler dikkate alınarak sıralanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylece iki yöntem birlikte kullanılarak tedarikçi seçim probleminin detaylandırılması ve değerlendirme kriterlerinin irdelenmesi ile literatüre katkı sağlanmak amaçlanmıştır.

II.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İşletmeler için önemli bir karar problemi olarak tedarikçi seçimi literatürde birçok çalışmaya konu olmuş ve farklı yöntemler ile ele alınmıştır. Aşağıdaki paragrafta tedarik zincirinde Dematel yöntemi ve Dematel yöntemiyle bütünsel farklı ÇKKV yöntemleri ile gerçekleştirilmiş çalışmalardan örnekler verilmiştir:

Ar, Gökşen ve Tuncer [5], kablo sektöründe tedarikçi seçimi için Dematel, Analitik Ağ Süreci (AAS) ve Vikor (VIse Kriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemlerini kullanmış ve çalışmada “ürün fiyatının uygunluğu” en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Sarı, Ervural ve Bozat [6] sağlık sektöründe tedarikçi değerlendirme kriterlerini Dematel yöntemiyle incelemiş ve etkinliği en fazla olan kriterleri fiyat, zamanında teslimat ve hizmet performansı olarak belirlemiştir. Çoşkun, Yıldız ve Bayraktar [7] ahşap sektöründe yaptıkları çalışmada kriterleri ekonomik, sosyal ve çevrel olarak gruplandırmış ve Dematel sonuçlarına göre ekonomik kriterler etkileyen olarak tespit etmiştir. Doğan [8] tarafından hazır giyim sektöründe yapılan çalışmada 13 kriter Dematel yöntemi ile analiz edilerek en önemli kriter “müşteri memnuniyeti”, ikincil öneme sahip kriter ise “teslimat zamanına uygunluk” olarak tespit edilmiştir. Kabadayı ve Dağ [9], Dematel ve Electre (ELimination Et Choix Tradusiant la REalité) teknikleri ile tedarik zincirinde bayi performanslarını değerlendirmiştir. Çalışmada,

performans göstergeleri (KPI) arasındaki ilişkinin ve önem düzeyinin belirlenmesinde Dematel yöntemi, sıralamada ise Electre kullanılmıştır. Çalışmada pazar payı öncelikli kriter olarak elde edilmiştir. Çelik ve Çağır [10], bir traktör firmasında tedarikçi seçimi üzerine çalışmıştır. Problem sırasıyla; bulanık AHP, bütünleşik bulanık Dematel ve Topsis ve bütünleşik bulanık AHP ve Moora (Multi-objective Optimization By Ratio Analysis) teknikleri ile ele alınmıştır. Dematel ve AHP'den farklı ağırlıklar hesaplanmış ancak alternatif sıralaması değişmemiştir. Yaman [11], otomotiv sektöründe tedarikçi seçimi üzerine Dematel ve Topsis (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemlerini kullanarak çalışmıştır. Belirlenen 6 ana kriter içinde ağırlığı en yüksek kriter “ürün fiyatı” olarak belirlenmiştir. Mirmousaa ve Dehnavi [12], tedarikçi seçiminde etkisi olduğu düşünülen 43 kriteri Dematel tekniği ile analiz etmiştir. Benzer şekilde Kumar, Sangwanc ve Gupta [13], operasyonel esneklik, erişilebilirlik gibi 4 ana kriter belirlenmiş ve Dematel ile kriterleri analiz etmiştir. Kant [14], döngüsel tedarik zincirinde engelleyici kriterleri belirlemek için AHP ve Dematel yöntemlerini kullanmıştır. Ashtarinezhad, Sarfaraz ve Navabakhsh [15], petrol ve gaz endüstrisinde tedarikçi değerlendirmesi için bulanık Dematel yöntemini kullanmıştır. Sözü edilen çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, farklı sektörlerde tedarikçi seçiminin sıklıkla çalışıldığı söylenebilir. Çalışmalarda, Dematel yöntemiyle kriterler “etkileyen” ve “etkilenen” olarak gruplanmış ve kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Başka bir ÇKKV yöntemiyle ise alternatifler sıralanmıştır. Bazı çalışmalarda kriter ağırlıkları AHP ya da AAS gibi bir kriter ağırlıklandırma yöntemiyle de hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Birçok çalışmada “ürün fiyatı” kriterinin etkileyen kriter grubunda ve en öncelikli kriter olarak tespit edildiği söylenebilir.

Literatür araştırması bölümünün bu kısmında ise tedarikçi seçiminde Aksiyomatik Tasarım yönteminin kullanıldığı çalışmalardan örnekler sunulmuştur:

Demirci [1], lojistik sektöründe tedarikçi seçimi için Aksiyomatik Tasarım yöntemini kullanmıştır. Kurumsal yapı, ekonomik güç, lojistik konum, tedarik süresi ve ürün birim maliyeti kriterlerine göre en uygun tedarikçi belirlenmiştir. Ardalı [3], AHP, Bulanık Aksiyomatik Tasarım ve Ağırlıklı Bulanık Aksiyomatik Tasarım tekniklerini kullanarak yeşil tedarikçi seçimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Özel ve Özyörük [16], bir beyaz eşya firmasında tedarikçi seçim problemi için Aksiyomatik Tasarım tekniğini önermiştir. Problem Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım ile de çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İncelenen çalışmalar arasında tedarikçi seçiminde Dematel ve Aksiyomatik Tasarım yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, kriterlerin Dematel ile gruplanmasının Aksiyomatik Tasarım yönteminden elde edilen sonuçlara etkisi analiz edilerek karar vericilere farklı bir bakış açısı sunma ve literatürdeki boşluğun doldurulması amaçlanmaktadır.

III. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Dematel Tekniği

Dematel tekniği, kompleks problemlerin çözümlenmesi, kriterler arasındaki ilişkilerin ortaya konması ve yapısal bir model oluşturma amacıyla 1972 ile 1976 yılları arasında Cenevre Battelle Memorial Enstitüsü, Bilim ve İnsan İlişkileri programında ortaya konmuştur [17]. ÇKKV yöntemlerinden biri olan Dematel ile kriterler, etkileyen yada etkilenen olarak gruplandırabilmektedir. Böylece yöntem, karar vericilerin kriterler arasındaki nedensel ilişkiyi net bir şekilde ifade etmelerine ve neden-sonuç gruplandırması yapabilmelerine imkan vermektedir [4]. Dematel, probleme doğrudan ya da dolaylı olarak etki eden kriterleri hesaplamalara dahil ederek grafik gösterim ile ifade edebilmesi açısından önemli bir tekniktir. Karar vericiler tarafından probleme dair kriterlerin belirlenmesinin ardından aşağıdaki adımlar uygulanır [18]:

Adım 1. Direkt ilişki matrisinin oluşturulması: Uzmanlardan kriterleri ikili olarak 0,1,2,3 ve 4 değerlerinden oluşan ölçeği kullanarak karşılaştırmaları istenir. Bir kriterin diğerine göre etkisi yoksa 0 verilir. Bir kriterin diğerine etkisi düşük ise 1, orta ise 2, yüksek ise 3 ve son olarak çok yüksek ise 4 değeri kullanılır. Bu bilgiler ışığında A matrisi Eşitlik 1’de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2. Direkt ilişki matrisinin normalize edilmesi: Direkt ilişki matrisi A, Eşitlik 2, 3 ve 4 kullanılarak normalize edilir.

$$X = \lambda * A \quad (2)$$

$$\lambda = \min \left\{ \frac{1}{\max_{i=1}^n |a_{ij}|}, \frac{1}{\max_{j=1}^n |a_{ij}|} \right\} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n \sum_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (4)$$

Adım 3. Toplam İlişki Matrisinin Oluşturulması: Toplam ilişki matrisi Eşitlik 5 ile hesaplanır. Matris t_{ij} elemanı i kriterinin j kriterini etkileme derecesini ve I birim matrisi ifade etmektedir.

$$T = X(I - X)^{-1} \quad (5)$$

Adım 4. Kriterlerin Etki ve Etkilenme Derecelerinin (Gönderici ve Alıcı Grubunun) Belirlenmesi: T matrisinin satır toplamları D_i , sütun toplamları R_j olmak üzere;

D_i , i . kriterin diğer kriterleri etki derecesinin toplamını, R_j , j . kriterin diğer kriterlerden etkilenme derecesinin toplamını ifade etmektedir. D_i ve R_j elde edildikten sonra $D_i + R_j$ ve $D_i - R_j$ değerleri hesaplanır. $D_i + R_j$, alınan ve gönderilen etkini toplamını, $D_i - R_j$, kriterler arasındaki ilişkinin yönünü ifade etmektedir.

$D_i - R_j > 0$ ise; i kriterinin diğer kriterleri etkileme derecesi diğer kriterlerden etkilenme derecesinden fazladır.

$D_i - R_j < 0$ ise; i kriterinin diğer kriterleri etkileme derecesi diğer kriterlerden etkilenme derecesinden azdır.

$D_i - R_j = 0$ ise; i kriterinin sistemdeki etki ve etkilenme dereceleri birbirine eşittir.

B. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

AHP, Saaty (1972) tarafından ortaya koyulmuş yaygın olarak kullanılan bir ÇKKV yöntemidir. Hedef, ana kriterler, alt kriterler ve alternatifler arasında hiyerarşik yapı oluşturulmuş bir karar probleminde ikili karşılaştırmalar ile kriterlerin önem düzeylerinin belirlenmesini sağlar. Aşağıda AHP yönteminin adımlarından kısaca bahsedilmiştir [19, 20]

Adım 1: Yöntemin ilk aşaması amacın belirlenmesi ve hiyerarşik yapının oluşturulmasıdır.

Adım2: İkili karşılaştırmalar sonucunda hangi karar elemanının daha önemli olduğu a_{ij} ile gösterilmektedir. a_{ij} , i . kriterin j . kriterine göre ne kadar üstün olduğunu belirtmektedir. İkili karşılaştırmalar sonucunda $n \times n$ boyutlu ve köşegen elemanları 1 olan bir matris oluşturulmaktadır. i kriteri j 'ye göre a_{ij} önemli ise j kriteri de i 'ye göre $1/a_{ij}$ önemli olacaktır. İkili karşılaştırma matrisi Eşitlik 6'da verilmiştir. İkili karşılaştırmalar Tablo 1'de verilen Saaty ölçeği ile yapılır.

Tablo 1. Saaty Ölçeği

Önem Değeri	Değer Tanımı	Açıklama
1	Eşit Derecede Önem	Her iki faktör de aynı önem derecesindedir.
3	Orta Derecede Önem	Deneyim ve yargılara göre faktör değerine göre biraz daha önem taşır.
5	Kuvvetli Derecede Önem	Faktör değerinden kuvvetle daha önemlidir.
7	Çok Kuvvetli Derecede Önemli	Faktör değerine göre yüksek derecede önem taşır.
9	Mutlak Öneme Sahip	Faktör diğer bir faktöre göre çok yüksek derecede önem taşır.
2, 4, 6, 8	Ara Değerler	Yukarıda açıklamaları bulunan değerlerin ara değerleri olarak görülür.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = \frac{1}{a_{21}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{n1} = \frac{1}{a_{1n}} & a_{n2} = \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Adım 3: Normalizasyon işlemi Eşitlik 7 ile yapılır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Adım 4: Eşitlik 8 kullanılarak her bir kriter için önem ağırlıkları (w_i) belirlenir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (8)$$

Adım 5: Karar vericilerin ikili karşılaştırmalar sırasında tutarlı olup olmadığının belirlenmesi için tutarlılık oranı hesaplanmalıdır. Tutarlılık oranı (CR) değeri 0,1'den küçük ise ikili karşılaştırma tutarlı kabul edilir. En büyük öz değer (λ_{maks}) ve tutarlılık indeksi (CI) formülleri sırasıyla Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'da verilmiştir.

$$\lambda_{maks} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j}{w_i} \right) \quad (9)$$

$$CI = \frac{(\lambda_{maks} - n)}{n-1} \quad (10)$$

C. Aksiyomatik Tasarım

Aksiyomatik Tasarım, ürün ve proseslerin tasarım aralığını bilimsel olarak tanımlayabilmek için Suh tarafından geliştirilmiştir [3]. Tasarım, "Neyi gerçekleştirmek istiyoruz?" ve "Bunu nasıl gerçekleştirebiliriz?" soruları ile ifade edilir. Aksiyomatik Tasarım tekniğinin amacı, tasarım faaliyetlerinin bilim ve mantık ile desteklenerek gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Aksiyomatik tasarımda iki önemli aksiyom bulunmaktadır. İlk aksiyom tasarımın oluşturulması, ikinci aksiyom ise alternatifler arasından en uygun olanının tercih edilmesidir [2]:

Aksiyom 1 (Bağımsızlık Aksiyomu): Tasarım parametresi ve fonksiyonel ihtiyaçların birbirinden bağımsız olmasıdır.

Aksiyom 2 (Bilgi Aksiyomu): En küçük bilgi içeriği değerinin tercih edilmesidir. Alternatif tasarımlardan bağımsızlık aksiyomunu sağlayan en iyi tasarım minimum bilgi içeriğine sahiptir.

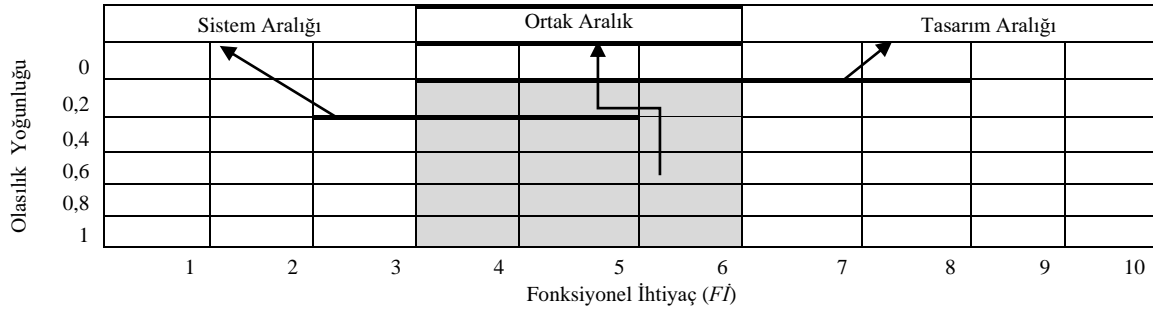
Bilgi içeriği I , verilen bir fonksiyonel ihtiyacı (F_i)'yi sağlama olasılığı olarak ifade edilir. Bu olasılık p ise, olasılıkla ilgili bilgi içeriği I , Eşitlik 11 ile gösterilir:

$$I_i = \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) \quad (11)$$

Aynı anda karşılanması gereken birçok fonksiyonel ihtiyaç bulunabilir. Logaritma fonksiyonu, her bir fonksiyonel ihtiyacın bilgi içeriğine eklenebilmesi için kullanılır. Bilgi içeriği n tane fonksiyonel ihtiyacın olasılıkları toplamıdır. Olasılıklar toplamı 1 ise bilgi içeriği 0'dır. Bir ve daha fazla olasılık 0'a eşit ise bilgi içeriği sonsuzdur. Düşük olasılık, fonksiyonel ihtiyaçları karşılayabilmek için daha fazla bilgiye ihtiyaç olduğunu belirtir.

Şekil 1'de gösterildiği üzere, fonksiyonel ihtiyaçların olasılık dağılım fonksiyonu uniform olduğunda tasarımcının belirttiği tasarım aralığı ve sistemin gerçekleştiği sistem aralığının kesişimi çözüm aralığı olarak kabul edilir. Sistem olasılık dağılım fonksiyonunun uniform olduğu durumda F_i 'nin gerçekleşme olasılığı Eşitlik 12 ile hesaplanır:

$$p_i = \frac{\text{ortak aralık}}{\text{sistem aralığı}} \quad (12)$$



Şekil 1. Tasarım Aralığı, Sistem Aralığı, Ortak Aralık ve $F\dot{I}$ 'nin Sistem Olasılık Dağılım Fonksiyonu [16].

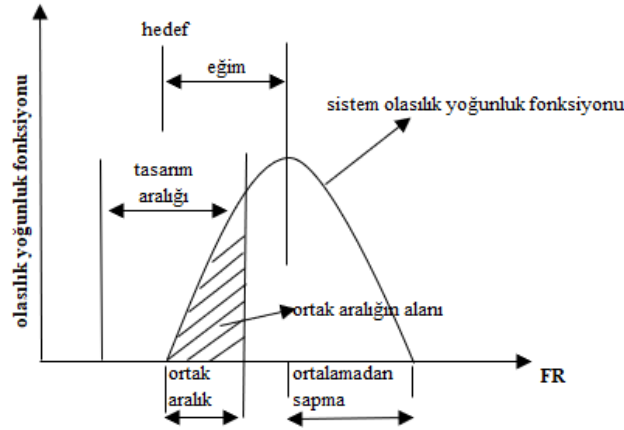
Eşitlik 12'den hareketle bilgi içeriği Eşitlik 13 ile hesaplanır.

$$I_i = \log_2 \frac{\text{sistem aralığı}}{\text{ortak aralık}} \quad (13)$$

Fonksiyonel ihtiyaçlar sürekli tesadüfî değişken ise tasarım aralığındaki fonksiyonel ihtiyacın gerçekleşme olasılığı Eşitlik 14 ile ifade edilir:

$$p_i = \int_{dr_l}^{dr_u} p_s(F\dot{I}_i) dF\dot{I}_i \quad (14)$$

Eşitlik 14, ilgili sistemdeki olasılık yoğunluk fonksiyonunun integralinin alınması ile tüm sistem aralığının gerçekleşme ihtimalini verir. Şekil 2'de sistem aralığı belirlenmiş $F\dot{I}$ 'ye karşı bir olasılık yoğunluk fonksiyonu bulunmaktadır. Tasarım aralığı ve sistem aralığı arasındaki kesişim bölgesi ortak alan (A_{cr}) olarak gösterilir ve bu alan sadece fonksiyonel ihtiyaçların sağlandığı alandır. Sistem aralığının altındaki alan, ortak aralığın altındaki alana bölündüğünde tasarımın belirlenmiş hedefinin gerçekleşme derecesinin olasılığı elde edilmiş olur (Eşitlik 15).



Şekil 2. Tasarım Aralığı, Sistem Aralığı, Ortak Aralık ve $F\dot{I}$ 'nin Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu [16].

$$I = \log_2 \frac{A_{sr}}{A_{cr}} \quad (15)$$

Burada A_{sr} sistem aralığının altındaki alanı, A_{cr} ise ortak aralığın altındaki taralı alanı ifade eder. Genellikle $A_{sr}=1,0$ olduğundan sağlanacak n tane F_i olduğunda bilgi içeriği Eşitlik 16 ile ifade edilir:

$$I = \log_2 \frac{1}{A_{cr}} \quad (16)$$

D. Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım

Her bir kriter farklı ağırlık değerlerine (w_j) sahip olduğunda formüllere ağırlık değerleri de dahil edilmektedir. Bu yaklaşım Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım olarak ifade edilmekte olup Eşitlik 17 ile gösterilmiştir [16].

$$\begin{aligned} \left[\log_2 \left(\frac{1}{p_{ij}} \right) \right]^{1/w_j} & , 0 \leq I_{ij} \leq 1 \\ \left[\log_2 \left(\frac{1}{p_{ij}} \right) \right]^{w_j} & , I_{ij} \geq 1 \\ w_j & , I_{ij} = 1 \end{aligned} \quad (17)$$

IV. BULGULAR

Uygulamanın gerçekleştirildiği lojistik firmasında yedek parça, lastik, akü, transpalet ve istif araçları Almanya merkezli fabrikadan ve yurt içi tedarikçilerden temin edilmektedir. Tedarik edilen malzemeler, bayilere ve müşterilere satılmaktadır. Çalışmada, yurt içinden tedarik edilen ve çok hareket gören ürün grubundaki bir malzemenin teknik özellikleri dikkate alınarak tedarikçiler arasında sıralama ve önceliklendirme yapılması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, 1 yıl içinde sipariş edilerek tüketime giren malzemeler hareket ve birim maliyetleri göz önüne alınarak gruplandırılmıştır. Gruplandırma yapılırken yıllık sipariş adetleri ve birim mahsuplaştırılmış maliyetleri dikkate alınmıştır. Çalışmanın devamında, belirlenen ürün için tedarikçi değerlendirme kriterleri Dematel yöntemi ile etkileyen ve etkilenen gruplar bakımından incelenmiş ve AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır. Öncelikle, söz konusu değerlendirme kriterlerinin tümü sonrasında yalnızca “etkileyen” kriterler dikkate alınarak Aksiyomatik Tasarım ve Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım yöntemleriyle tedarikçi seçimi yapılmıştır.

A. Yedek Parça FSN Analizi

FSN envanter sınıflandırma sistemi, hangi malzeme kalemlerinden stok tutulması gerektiği temel sorusunu, öğelerin göreceli önemine dayalı olarak farklı kontrol seviyelerine izin vererek yanıtlar. Çoğu işletme stokta çok sayıda ürün bulundurur ancak; makul bir maliyetle daha iyi bir kontrole sahip olmak için malzemeleri önemlerine göre sınıflandırmak yararlı olmaktadır. Çalışmada, kritik öneme sahip malzemenin belirlenmesi için 1 yıl içinde sipariş edilerek tüketime giren malzeme verileri SAP (Sistem Analizi ve Yazılım Geliştirme) paket programı üzerinden alınarak analiz edilmiştir. Stok kontrol yaklaşımı çerçevesinde malzemeler, hızlı hareket etme, yavaş hareket etme ya da hareket görmeme durumuna göre sınıflandırılmıştır. Tablo 2’de sınıflandırma tablosu yer almaktadır.

Tablo2. Stok Malzemelerinin Sınıflandırılması

HareketGrubu (Sipariş/Yıl)	BirimMaliyet (Eur)
Fast (F)	>250
Good (G)	25-250
Middle (M)	4-24
Slow (S)	1,2,3
Without (W)	0

HareketGrubu (Sipariş/Yıl)	BirimMaliyet (Eur)
Extreme (E)	≥1000
High (H)	≥100
Intermediate (I)	≥10
Low (L)	≥1
Penny (P)	>0

- **Fast Grubu Stok Kalemleri:** Yıllık hareketi 250 adetten fazla olan en önemli gruptur.
- **Good Grubu Stok Kalemleri:** Yıllık hareketi 25 ile 250 adetasında olan malzemelerdir.
- **Middle Grubu Stok Kalemleri:** Yıllık hareketi 4 ile 24 adet arasında olan malzemelerdir. Orta derecede önemli gruptur.
- **Slow Grubu Stok Kalemleri:** Yıllık hareketi 1,2 ya da 3 adet olan malzemelerdir.
- **Without Grubu Stok Kalemleri:** Hareketi olmayan malzemelerdir. Göreceli olarak en az önemli gruptur.

- **Extreme Grubu Stok Kalemleri:** Mahsuplaştırılmış birim maliyeti 1000 Eur ve üzeri olan malzemelerdir.
- **High Grubu Stok Kalemleri:** Mahsuplaştırılmış birim maliyeti 100 Eur ve üzerinde olan malzemelerdir.
- **Intermediate Grubu Stok Kalemleri:** Mahsuplaştırılmış birim maliyeti 10 Eur ve üzerinde olan malzemelerdir.
- **Low Grubu Stok Kalemleri:** Mahsuplaştırılmış birim maliyeti 1 Eur ve üzerinde olan malzemelerdir.
- **Penny Grubu Stok Kalemleri:** Mahsuplaştırılmış birim maliyeti 0 Eur olan malzemelerdir.

Bir yıl içinde tüketime giren ve müşteri tarafından talep edilen 1669 kalem malzeme Tablo 3'te belirtildiği üzere birim maliyet ve tüketim adedine göre analiz edilmiştir. Bu malzemelerin 330 kalemi yerli tedarikçilerden temin edilmektedir. Temin edilecek tedarikçi sayısının çok olması ve fazla hareket görmesi sebebi ile 48V/625Ah traksiyoneraküler, tedarikçi değerlendirme çalışması yapılacak malzeme grubu olarak belirlenmiştir. Traksiyoneraküler, hareketli araçlarda kullanılan akülerdir. Özellikle forklift, istif makineleri, taşıma bantları gibi alanlarda kullanılmaktadır. Birim hücre olarak 2V enerjiye sahiptir. Müşteri isteğine göre bütün hücreler seri olarak bağlanarak toplamda voltaj ve amper-saatleri (Ah) elde edilerek kullanıma hazır olur. Genellikle 120 ile 1550 Ah arasında ortalama kapasitededir. Kullanım ömürleri ortalama 1550 cycle (bir gündeki şarj ve deşarj döngüsü) olarak hesaplanmaktadır. Kullanıcının günde 1 kere şarj ettiği varsayılırsa ortalama 4 yıllık bir kullanım ömrü söz konusudur. Kullanım ömrü periyodik bakımların düzenli yapılması vb. Durumlara bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.

Tablo 3. Stok Malzemelerinin FGMSW Sınıfları

Malzeme Kodu	Malzeme Kısa Metni	Tür	Tüketim Adedi	FGMSW	Birim Maliyet	PB	EHILP
000974*	Far Mavi Işık	Far	47	Good	17,47	Eur	Intermediate
00097408*	Far	Far	17	Middle	2,94	Eur	Low
000993*	Jant	Diğer	1	Slow	50,78	Eur	Intermediate
000993249*	Jant	Diğer	1	Slow	134,24	Eur	High
014580*	Conta	Diğer	1	Slow	4,12	Eur	Low
014867*	Cam Ön	Cam	1	Slow	39,4	Eur	Intermediate

Tablo 4. Kritik Yedek Parça Özellikleri

Malzeme	Malzeme Kısa Metni	Tür	Tedarikçi Sayısı	Talep Miktarı	Birim Maliyet
FL60000*	Akü - 48V/625Ah	Akü	7	4	2.611,33 €
FL63000*	Akü - 48V/625Ah	Akü	7	11	2.427,41 €

B. Kriterlerin Belirlenmesi

Bu çalışmada, literatürdeki benzer çalışmalardan bazıları incelenerek tedarikçi firma seçim sürecini etkileyen 6 adet kriter belirlenmiştir:

KÖ-Kullanım Ömrü: Tedarikçi seçim kriteri olarak tedarik edilecek ürünün teknik yetkinliği ya da kullanım ömrü karar vericiler tarafından değerlendirilmektedir [21].

ÇS-Çevrim Sayısı: İşletmelerin rekabet koşullarında üstünlük sağlayabilmeleri için tedarik riskini azaltmaları, üretim maliyetlerini düşürmeleri, stok düzeylerini ve iş süreçlerini optimize etmeleri gerekmektedir. Bu hususta çevrim zamanını minimum seviyede tutabilecek tedarikçi ya da tedarikçilerin seçimi işletmeler için önem arz etmektedir [22].

TS- Tedarik Süresi: Tedarik süresi, bir siparişin verilmesinden siparişin temin edilmesine kadar geçen süredir. İşletmeler girdi teminini gerçekleştirirken miktar ve kalite açısından uygunluğun yanında, istenildiği anda istenildiği miktarda girdi teminini de önemsemektedirler [23].

LK-Lojistik Konum: Tedarikçinin lojistik konumu taşıma maliyeti ve süresini direkt olarak etkileyeceği için karlılık oranı üzerinde de etkilidir. Diğer taraftan coğrafi konumunun uygun olmadığını düşünen bir firma karlılık oranına bağlı olarak tesis yeri seçiminde yeni kararlar alabilir [24].

BF-Birim Fiyatı: Bir işletme amaç ve hedefleri doğrultusunda en kaliteli ürünü en az maliyetle işletmeye sağlamaya çalışacaktır. Kaliteli ürününü sağlayan tedarikçi ise en iyi fiyatı sunmayabilir. Dolayısıyla tedarikçi seçim kararı bu çatışan kriterler arasında en iyi uzlaşan çözümü arama işlemi olmaktadır [25].

ÖŞ-Ödeme Şekli: İşletmede tedarikçiler için yapılan ödeme biçimini (vadelendirme ya da nakit) ifade etmektedir [26].

Kriterler ve çalışma özelindeki birim ve kriter açıklamaları Tablo 5’te belirtilmektedir.

Tablo 5. Kriterler ve Açıklamaları

Kriterler	Açıklama	Kaynak
KÖ-Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	1 şarj 1 deşarj döngüsü ile traksiyoner akünün kullanılabilecek süresini ifade eder.	[27], [21]
ÇS-Çevrim sayısı (Cycle)	Traksiyoner akünün kalitesini bir başka deyişle akü ömrünün uzun olmasını sağlayan temel faktördür.	[22], [28]
TS-Tedarik süresi (Hafta)	Talep edilen akünün siparişten sonar firmaya ulaşımına kadar geçen süreyi ifade eder.	[29], [30], [23]
LK-Lojistik Konum (Dakika)	Tedarikçinin akü sevkini yapacağı mevcut konumunu ifade eder.	[31], [32]
BF-Birim Fiyatı (Eur)	Tedarikedilen akünün maliyetini ifade eder.	[33], [34], [35]
ÖŞ-Ödeme Şekli (Vade)	Ödeme süresini ifade eder.	[36], [26]

C. Dematel Yönteminin Uygulanması

Tablo 6’da firmadan alınan bilgiler doğrultusunda kriterlere göre tedarikçi performansları verilmiştir.

Tablo 6. Kriterlere Göre Tedarikçi Performansları

Kriterler	Tedarikçi 1	Tedarikçi 2	Tedarikçi 3	Tedarikçi 4
KÖ Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	4-5 Yıl	3-5 Yıl	4-4,5 Yıl	2-5 Yıl
ÇS Çevrim sayısı (Cycle)	1500 Cycle	1200-1600 Cycle	1500 Cycle	1500 Cyle
TS Tedarik süresi (Hafta)	8 Hafta	8-10 Hafta	22-24 Hafta	15-16 Hafta
LK Lojistik Konum (Dakika)	45 dk	270 dk	25 dk	25 dk
BF Birim Fiyatı (Eur)	2.917,00 €	2.750,00 €	2.525,00 €	2.960,00 €
ÖŞ Ödeme Şekli (Vade)	60 gün	90 gün	90 gün	90 gün

Uzman görüşleri dikkate alınarak kriterler için direkt ilişki matrisi Tablo 7’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir. Daha sonra direkt ilişki matrisi normalize edilerek Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Direkt İlişki Matrisi

A	KÖ	ÇS	TS	LK	BF	ÖŞ
KÖ	0	0	0	0	4	0
ÇS	4	0	0	0	4	3
TS	0	0	0	0	2	1
LK	0	0	3	0	2	2
BF	0	0	0	0	0	3
ÖŞ	0	0	0	0	2	0

Tablo 8. Normalize Direkt İlişki Matrisi

Kriterler	KÖ	ÇS	TS	LK	BF	ÖŞ
KÖ	0	0	0	0	0,3636	0
ÇS	0,3636	0	0	0	0,3636	0,2727
TS	0	0	0	0	0,1818	0,0909
LK	0	0	0,2727	0	0,1818	0,1818
BF	0	0	0	0	0	0,2727
ÖŞ	0	0	0	0	0,1818	0

Toplam ilişki matrisi Eşitlik 5 ile hesaplanarak Tablo 9 elde edilir.

Tablo 9. Toplam İlişki Matrisi

	KÖ	ÇS	TS	LK	BF	ÖŞ
KÖ	0	0	0	0	0,3826	0,1043
ÇS	0,3636	0	0	0	0,5739	0,4292
TS	0	0	0	0	0,2087	0,1478
LK	0	0	0,2727	0	0,2830	0,2838
BF	0	0	0	0	0,0522	0,2870
ÖŞ	0	0	0	0	0,1913	0,0522

Toplam ilişki matrisinde satır toplamları D , diğer kriterleri etkileme derecesini ifade ederken, sütun toplamları R ise diğer kriterlerden etkilenme derecesini ifade etmektedir. Bu değerler kullanılarak Tablo 10'da gösterildiği üzere D_i+R_i ve D_i-R_i hesaplanmıştır. D_i+R_i i kriterinin etki ve etkilenme dereceleri toplamıdır ve kriterler arasındaki ilişkinin yoğunluğunu belirtir. D_i-R_i ise i kriterinin diğer kriterler ile ilişkisini belirtmektedir.

Tablo 10. Kriterlerin Etki ve Etkilenme Dereceleri

Kriterler	D	R	D+R	D-R
KÖ	0,4870	0,3636	0,8506	0,1233
ÇS	1,3668	0	1,3668	1,3668
TS	0,3565	0,2727	0,6292	0,0838
LK	0,8395	0	0,8395	0,8395
BF	0,3391	1,6917	2,0308	-1,3526
ÖŞ	0,2435	1,3043	1,5478	-1,0609

Sistemde etkinliği en yüksek ve diğer kriterlerle en fazla ilişkili olan kriter birim fiyattır. Çevrim süresi ve ödeme şekli kriterleri de sistemde etkinliği yüksek diğer kriterlerdir. *D-R* değerlerine göre kriterlerin ilişki yönü hakkında yorum yapılabilmektedir. *D-R* değerleri pozitif olan kullanım ömrü, çevrim süresi, tedarik süresi ve lojistik konum kriterlerinin etkileme derecesinin etkilenme derecesinden fazla olduğu görülmektedir. *D-R* değerleri negatif olan birim fiyat ve ödeme şekli ise diğer kriterlerden etkilenen kriterlerdir. Diğer kriterlerden en fazla etkilenen kriter ise birim fiyattır.

D. AHP Yöntemi ile Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Karar verme aşamasında kullanılan kriterlerin önem derecelerinin birbirinden farklı olduğu durumlarda Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım yaklaşımı kullanılabilir. Bu yaklaşımda ilk adım kriterlerin ağırlık değerlerinin belirlenmesidir. Bu çalışmada, Saaty tarafından önerilen 1-9 önem skalası kullanılmış ve AHP yöntemi adımları uygulanarak kriterlere ilişkin ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Düzenlenen ikili karşılaştırma matrisi, hesaplanan ağırlık değerleri ile birlikte Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Kriterler için İkili Karşılaştırma Matrisi ve Ağırlık Değerleri

Kriterler	KÖ	ÇS	TS	LK	BF	ÖŞ	W_j -Kriter Ağırlıkları
KÖ	1	1	2	5	1	5	0,256
ÇS	1	1	1	5	1	5	0,2251
TS	0,5	1	1	5	1	5	0,2037
LK	0,2	0,2	0,2	1	0,2	1	0,045
BF	1	1	1	5	1	5	0,2251
ÖŞ	0,2	0,2	0,2	1	0,2	1	0,045

E. Aksiyomatik Tasarım ile Analiz

Aksiyomatik Tasarımda bilgi aksiyomunun uygulanabilmesi için bağımsızlık aksiyomu sağlanmalıdır. Bu çalışmada, alternatifler için sağlanması gereken kriterler yani $F\hat{I}$ ’ler birbirinden bağımsızdır. Her bir alternatifin sahip olduğu bilgi içeriğinin hesaplanabilmesi için $F\hat{I}$ tasarım aralıklarının belirlenmesi gerekir. Bu amaçla belirlenen tasarım aralıkları (kısıtlar) Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Tasarım Aralıklarının Belirlenmesi

Kriterler	Tasarım Aralığı		
	Alt Değer	Üst Değer	
KÖ	Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	3 Yıl	5 Yıl
ÇS	Çevrim sayısı (Cycle)	1200 Cycle	1600 Cycle
TS	Tedarik süresi (Hafta)	6 Hafta	24 Hafta
LK	Lojistik Konum (Dakika)	60 dk	1440 dk
BF	Birim Fiyatı (Eur)	2.500,00 €	3.100,00 €
ÖŞ	Ödeme Şekli (Vade)	60 gün	120 gün

Alternatif tedarikçiler için kriterlere ait system aralıkları Tablo 13'te, tasarım aralığı ile sistem aralığı kesişim bölgesi ise Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 13. Tedarikçi Firmaların Sistem Aralıkları

Kriterler	Tedarikçi 1		Tedarikçi 2		Tedarikçi 3		Tedarikçi 4		
	KÖ	Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	4	5	3	5	4	4,5	2
ÇS	Çevrimsayısı (Cycle)	1200	1500	1200	1600	1200	1500	1200	1500
TS	Tedarik süresi (Hafta)	8	9	8	10	22	24	15	16
LK	Lojistik Konum (Dakika)	90	2880	270	2880	50	2880	50	2880
BF	Birim Fiyatı (Eur)	2.917,00 €	3.117,00 €	2.750,00 €	2.950,00 €	2.525,00 €	2.725,00 €	2.960,00 €	3.160,00 €
ÖŞ	Ödeme Şekli (Vade)	0	60	0	90	0	90	0	90

Tablo 14. Tasarım Aralığı ile Sistem Aralığı Kesişim Bölgesi

Kriterler		Tedarikçi 1		Tedarikçi 2		Tedarikçi 3		Tedarikçi 4	
KÖ	Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	4	5	3	5	4	4,5	3	5
ÇS	Çevrim sayısı (Cycle)	1200	1500	1200	1600	1200	1500	1200	1500
TS	Tedarik süresi (Hafta)	8	9	8	10	22	24	15	16
LK	Lojistik Konum (Dakika)	90	1440	270	1440	60	1440	60	1440
BF	Birim Fiyatı (Eur)	2.917,00 €	3.100,00 €	2.750,00 €	2.950,00 €	2.525,00 €	2.725,00 €	2.960,00 €	3.100,00 €
ÖŞ	Ödeme Şekli (Vade)	0	60	60	90	60	90	60	90

Eşitlik 13 yardımıyla her bir tedarikçi için bilgi içeriği hesaplanabilmektedir. Örneğin; Tedarikçi 1 için kullanım ömrü kriteri kesişim aralığına bakılarak;

$I_{KÖ1} = \log_2 \left(\frac{5-4}{5-4} \right) = 0$ hesaplaması yapılır. Diğer alternatif tedarikçiler için de benzer hesaplar yapılarak bilgi içerikleri Tablo 15'teki gibi belirlenmiştir.

Tablo 15. Aksiyomatik Tasarım Bilgi İçerikleri

Kriterler		Tedarikçi 1	Tedarikçi 2	Tedarikçi 3	Tedarikçi 4
I-KÖ	Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	0	0	0	0,585
I-ÇS	Çevrim sayısı (Cycle)	0	0	0	0
I-TS	Tedarik süresi (Hafta)	0	0	0	0
I-LK	Lojistik Konum (Dakika)	1,0473	1,1575	1,0361	1,0361
I-BF	Birim Fiyatı (Eur)	0,1282	0	0	0,5146
I-ÖŞ	Ödeme Şekli (Vade)	0	1,585	1,585	1,585
Toplam -I		1,1755*	2,7425	2,6211	3,7206

Tablo 14'e göre, toplam bilgi içeriği en düşük olan 1. firma tercih edilir. Kriterlerin eşit önem düzeyine sahip olmadığı varsayımında ise Eşitlik 17 yardımıyla hesaplanan Ağırlıklandırılmış Aksiyomatik Tasarım bilgi içerikleri Tablo 16'da verilmiştir. Her iki analiz sonucunda da bilgi içeriği minimum olan Tedarikçi 1 en uygun seçenek olarak belirlenmiştir (Tablo 17).

Tablo 16. Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım Bilgi İçerikleri

Kriterler	Tedarikçi 1	Tedarikçi 2	Tedarikçi 3	Tedarikçi 4	
I-KÖ	Kullanım Ömrü (%80 deşari)	0	0	0	0,1231
I-ÇS	Çevrim sayısı (Cycle)	0	0	0	0
I-TS	Tedarik süresi (Hafta)	0	0	0	0
I-LK	Lojistik Konum (Dakika)	1,0021	1,0066	1,0016	1,0016
I-BF	Birim Fiyatı (Eur)	0,0001	0	0	0,0523
I-ÖŞ	Ödeme Şekli (Vade)	0	1,021	1,021	1,021
Toplam -I		1,0022*	2,0276	2,0226	2,1979

Tablo 17. Aksiyomatik Tasarım ve Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım Yöntemleri Sonuçları

Tedarikçiler	AksiyomatikTasarım	AğırlıklıAksiyomatikTasarım
Tedarikçi 1	1. öncelikli	1. öncelikli
Tedarikçi 2	3. öncelikli	3. öncelikli
Tedarikçi 3	2. öncelikli	2. öncelikli
Tedarikçi 4	4. öncelikli	4. öncelikli

F. Kriterlerin Yeniden Düzenlenmesi ve Ağırlıklandırılması

Dematel yönteminden elde edilen bulgulara göre *D-R* değerleri pozitif olan kullanım ömrü, çevrim süresi, tedarik süresi ve lojistik konum kriterleri etkileyen; *D-R* değerleri negatif olan birim fiyat ve ödeme şekli ise etkilenen kriterler olarak tespit edilmişti. Çalışmanın bu bölümünde, “etkilenen” kriterler çıkarılarak metodoloji tekrarlanmıştır. Beş kritere göre yeniden düzenlenen ikili karşılaştırma matrisi, hesaplanan ağırlık değerleri ile birlikte Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Etkileyen Kriterler için İkili Karşılaştırma Matrisi ve Ağırlık Değerleri

Kriterler	KÖ	ÇS	TS	LK	W_j -Kriter Ağırlıkları
KÖ	1	1	2	5	0,3679
ÇS	1	1	1	5	0,3084
TS	0,5	1	1	5	0,2621
LK	0,2	0,2	0,2	1	0,0617

G. Etkileyen Kriterlere göre Aksiyomatik Tasarım Analizi

Yalnızca etkileyen kriterler ve hesaplanan yeni kriter ağırlıkları kullanılarak Aksiyomatik Tasarım ve Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım adımları tekrarlanmıştır. Tablo 19’da Aksiyomatik Tasarım, Tablo 20’de ise Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım bulgularına yer verilmiştir.

Tablo 19. Etkileyen Kriterlere Göre Bilgi İçeriğinin Hesaplanması (Aksiyomatik Tasarım)

Kriterler	Tedarikçi 1	Tedarikçi 2	Tedarikçi 3	Tedarikçi 4	
I-KÖ	Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	0	0	0,5850	
I-ÇS	Çevrim sayısı (Cycle)	0	0	0	
I-TS	Tedarik süresi (Hafta)	0	0	0	
I-LK	Lojistik Konum (Dakika)	1,0473	1,1575	1,0361	
Toplam -I		1,0473	1,1575	1,0361*	1,6211

Tablo 20. Etkileyen Kriterlere Göre Bilgi İçeriğinin Hesaplanması (Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım)

Kriterler	Tedarikçi 1	Tedarikçi 2	Tedarikçi 3	Tedarikçi 4	
I-KÖ	Kullanım Ömrü (%80 deşarj)	0	0	0,2328	
I-ÇS	Çevrim sayısı (Cycle)	0	0	0	
I-TS	Tedarik süresi (Hafta)	0	0	0	
I-LK	Lojistik Konum (Dakika)	1,0029	1,0091	1,0022	
Toplam -I		1,0029	1,0091	1,0022*	1,2350

Her iki analiz sonucunda da bilgi içeriği minimum olan Tedarikçi 3 en uygun seçenek olarak belirlenmiştir (Tablo 21).

Tablo 21. Etkileyen Kriterlere Göre Aksiyomatik Tasarım ve Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım Yöntemleri Sonuçları

Tedarikçiler	Aksiyomatik Tasarım	Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarım
Tedarikçi 1	2. öncelikli	2. öncelikli
Tedarikçi 2	3. öncelikli	3. öncelikli
Tedarikçi 3	1. öncelikli	1. öncelikli
Tedarikçi 4	4. öncelikli	4. öncelikli

V. SONUÇLAR

Karar problemlerinde karara etki eden birçok kriter ve alternatifin olması en doğru kararın verilmesini güçleştirmektedir. Probleme etki eden kriterlerin eşit önem düzeyine sahip olmaması, birbirleriyle çelişmesi ya da aralarında neden-sonuç ilişkisi olması da problemin zorluğunu arttıran faktörlerdendir. Bu gibi problemlerde ÇKKV yöntemleri, alternatifler arası önceliklendirme ve seçimde sıklıkla kullanılmaktadır.

Günümüzün rekabetçi koşullarında; sürecin sorunsuz işleyişi, müşteri taleplerinin doğru miktar, zaman ve kalitede karşılanabilmesi ve böylece pazar payı ve karlılığın artırılabilmesi için doğru tedarikçilerle çalışmak oldukça önemlidir. Tedarikçi seçiminde göz önünde bulundurulması gereken kriter ve alternatiflerin fazla olması seçim aşamasında subjektiften ziyade rasyonel yaklaşımları zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda tedarikçi seçimi bir ÇKKV problemi olarak ele alınabilir.

Bu çalışmada, lojistik sektöründe yer alan bir firmada kullanılan kritik bir parça özelinde tedarikçi seçim problemi ele alınmış ve AHP, Aksiyomatik Tasarım ve Dematel yöntemleri ile tedarikçi seçim modeli geliştirilmiştir. Çalışmada, tedarikçi seçiminin yapılacağı ürün grubunun belirlenmesi için öncelikle malzemeler FSN (Fast, Slow, NonMoving) yaklaşımı ile analiz edilmiştir. İlgili ürün grubu belirlendikten sonra söz konusu ürün grubu için tedarikçi seçim kriterleri belirlenmiş ve kriterler arası ilişki ve önem seviyesinin değerlendirilebilmesi için Dematel yöntemi uygulanmıştır. Sistemde etkinliği en yüksek kriter “birim fiyat” olarak tespit edilmiştir. Birim fiyat, kullanım ömrü, çevrim süresi, tedarik süresi ve lojistik konum kriterlerinin diğer kriterleri etkileme derecesi bu kriterlerden etkilenme derecesinden fazladır. Diğer bir deyişle bu kriterler “etkileyen” kriterlerdir. Birim fiyat ve ödeme şekli ise “etkilenen” kriterlerdir. Tedarikçi seçim uygulamasında alternatif tedarikçilerin kriterler için karşılması gereken tasarım aralıkları ve kriterlerin sistem aralıkları belirlenmiştir. Aksiyomatik Tasarım ile bilgi içerikleri hesaplanarak toplam bilgi içeriği minimum olan Tedarikçi 1 öncelikle çalışılması gereken tedarikçi olarak seçilmiştir. Alternatif sıralaması en iyiden başlamak üzere Tedarikçi 1, Tedarikçi 3, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 4 olarak tespit edilmiştir. Kriterlerin AHP yöntemiyle ağırlıklandırılması ile de aynı sıralama elde edilmiştir. Ancak toplam bilgi içeriklerinde değişiklikler gözlenmiştir. Örneğin; kriter ağırlıklandırmadan sonra Tedarikçi 3 ve Tedarikçi 2’nin toplam bilgi içerikleri arasındaki fark kapanmıştır. Bu durumda firma herhangi bir zorunluluk durumunda Tedarikçi 3’ü Tedarikçi 2 yerine tercih edebilir. Son olarak, Dematel yönteminde “etkilenen” olarak belirlenen kriterler analizden çıkarılarak metodoloji tekrarlanmıştır. Etkileyen kriterlere göre Aksiyomatik Tasarım ve Ağırlıklı Aksiyomatik Tasarımdan elde edilen sıralama en iyiden başlamak üzere Tedarikçi 3, Tedarikçi 1, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 4’tür. Sıralamada 1. ve 3. alternatifin yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Dematel yöntemiyle elde edilen bulguların seçimi değiştirdiği açıktır.

KAYNAKLAR

- [1] Demirci, A. (2020). Lojistik Tedarikçi Seçiminde Aksiyomatik Tasarım Tekniği Uygulaması. *International Journal Of Economics ,Politics, Humanities and Social Sciences*, 3(1), 90-105.
- [2] Zaralı, F. (2018). *Lojistik Merkezi Yer Seçimi ve Yerleştirme Problemi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [3] Ardalı, Z. (2020). Bulanık AHP ve Bulanık Aksiyomatik Tasarım ile Yeşil Tedarikçi Seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [4] Badem, E. (2019). Otomobil Seçimi Kararında Tüketici Satın alma Kararını Etkileyen Faktörlerin Dematel Yöntem ile Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın.
- [5] Ar, İ. M., Gökşen H., & Tuncer M. A. (2015). Kablo Sektöründe Tedarikçi Seçimi İçin Bütünleşik Dematel-AAS-Vikor Yönteminin Kullanılması, *Ege Akademik Bakış*. 15(2), 285-300.
- [6] Sarı, İ. U., Ervural B. Ç., & Bozat S. (2017). Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde Dematel yöntemiyle tedarikçi değerlendirme kriterlerinin incelenmesi ve sağlık sektöründe bir uygulama, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 477-485.
- [7] Coşkun B., Yıldır M., S. & Bayraktar M. (2022).Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminde Tedarikçi Değerlendirme Kriterlerinin Dematel Yöntemiyle İncelenmesi Ve Ahşap Sektöründe Bir Uygulama. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*,18 (2), 618-648.
- [8] Doğan H. (2022). Dematel ve Copras Yöntemleri İle Tedarikçi Seçimi: Hazır Giyim Sektöründe Bir Uygulama. *Journal of Textiles and Engineer*, 29(127), 150- 160.
- [9] Kabadayı, Ç., & Dağ, S. (2020). Dematel ve Electre Yöntemi ile Tedarik Zincirinde Bayi Performans Değerlendirmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 241-253.
- [10] Çelik, F. & Çağıl, G. (2021). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Tedarikçi Seçimi;Bir Traktör Fabrikası Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(68),607-619.
- [11] Yaman, K.H. (2019). Bulanık Dematel ve Bulanık Topsis Yöntemleri Kullanılarak Tedarikçi Seçimi ve Bulanık Doğrusal Programlama ile Optimum Sipariş Miktarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [12] Mirmousaa, S. & Dehnavi, D.H. (2016). Development of Criteria of Selecting the Supplierby Using the Fuzzy Dematel Method. *3rd International Conference on New Challenges in Management and Organization: Organization and Leadership*, Dubai, UAE.
- [13] Kumar, S.J. A., Sangwanc, K.S., Gupta, G.S. (2021). Modelling Supply Chain Agility Antecedents Using Fuzzy Dematel. 28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering.
- [14] Kant, R.L.S. (2021). *Evaluating the circular supply chain implementation barrier susing Pythagorean fuzzy AHP-Dematel approach*. Mechanical Engineering Department, Sardar Vallabhbai National Institute of Technology, Ichchhanath, Surat 395007, Gujarat, India.

- [15] Ashtarinezhad, E., Sarfaraz, H. A., & Navabakhsh, M. (2018). Supplier evaluation and categorize with combine Fuzzy Dematel and Fuzzy Inference System. *Data in Brief*, 18,1149-1156.
- [16] Özel, B., & Özyörük, B. (2007). Bulanık Aksiyomatik Tasarım ile Tedarikçi Seçimi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 415-423.
- [17] Sarı, İ. U., Ervural, B. Ç., & Bozat, S. (2017). Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminde Dematel Yöntemiyle Tedarikçi Değerlendirme Kriterlerinin İncelenmesi ve Sağlık Sektöründe Bir Uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 477-485.
- [18] Erdem, M. B., & Doğan, N.Ö. (2020). Tekstil Sektöründe Sürdürülebilirliğin Analizi, Kahramanmaraş'ta Faaliyet Gösteren bir Tekstil İşletmesinde Dematel Uygulaması. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 13(36), 571-598.
- [19] Al-Harbi, K. M. A. S. (2001). Application of the AHP in Project management. *International journal of Project management*, 19(1), 19-27.
- [20] Kabak, M., & Dağdeviren, M. (2017). A Hybrid approach based on ANP and grey relational analysis for machine selection. *Technical Gazette*, 24(1), 109-118.
- [21] Erdoğan, D., & Tokgöz, N. (2017). Bilgi Teknolojileri Dış Kaynak Kullanımında Kritik Tedarikçi Seçim Kriterlerinin Belirlenmesi: Havacılık Sektöründe Nitel Bir Araştırma. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 13(13), 68-83.
- [22] Akyüz, G. A. (2012). Bulanık VIKOR yöntemi ile tedarikçi seçimi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 26(1), 197-215.
- [23] Kabadayı, N., & Küçük Çırpın, B. (2020), Gri İlişkisel Temelli TOPSIS Yöntemi ile Tedarikçi Seçimi ve Tedarikçi Risk Değerlendirmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 767- 788.
- [24] Dağdeviren, M., Dönmez, N., & Kurt, M. (2006). Bir İşletmede Tedarikçi Değerlendirme Süreci İçin Yeni Bir Model Tasarımı ve Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 247-255.
- [25] Özdemir, A. (2010). Ürün grupları temelinde tedarikçi seçim probleminin ele alınması ve analitik hiyerarşi süreci ile çözümlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(1), 55-84.
- [26] Zhumazhanova, M. (2022). Tedarikçi seçim kararlarında bulanık çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanımı: Mobilya sektöründe bir uygulama, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye.
- [27] Tursun, S. S., & Özkoç, H. (2019). Taze gıda ürünlerinde tedarikçi seçim kararı üzerine karma bir araştırma. *Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi*, 3(6), 75-94.
- [28] Güleş, H. K., Çağlıyan, V., & Şener, T. (2014). Hazır giyim sektöründe analitik hiyerarşi prosesi yöntemine dayalı tedarikçi seçimi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 159-170.
- [29] Candan, G., & Yazgan, H. R. (2015). Tedarik Zincirinde Hammadde Tedarikçisi Seçimi Problemi: Bir Uygulama. *Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 3(3), 43-52.
- [30] Gültepe, M., & Yılmaz, E. (2022). Tedarik Zinciri Yönetiminde Lojistik ve Dağıtım Ağının Etki Seviyelerinin Belirlenmesi ve Tedarikçi Seçimi Optimizasyonu için AHP ve Matematik Programlama Modelini İçeren Yeni Bir Yaklaşım. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(2), 262-270.
- [31] Li, Y., Dlabat, A., & Lu, C., C. (2020), Leagile Supplier Selection in Chinese Textile Industries a Dematel Approach, *Annals of Operations Research*, 287, 303-322.
- [32] Çağıl, G., & Çelik, F. (2021). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri İle Tedarikçi Seçimi; Bir Traktör Fabrikası Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(68), 607-619.
- [33] Karagöz, E. T. (2022). Çok kriterli karar verme ve veri madenciliği yöntemleri ile tedarikçi seçimi ve seviyelendirmesi, Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- [34] Gündoğan, K., & Borat, O. (2021). Çelik Yapıda Kullanılan Endüstriyel Boya için Ahp ve Topsis Yöntemleri Uygulanarak Yapılan Tedarikçi Seçimi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(40), 162-177.
- [35] Vargeloğlu, A. A., Başkır, M. B., & Gamgam, H. (2021). Ekonomik Göstergelere Dayalı Tedarikçi Seçimi için Sezgisel Bulanık Yaklaşım. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(3), 1017-1037.
- [36] Oğuz, C., Pence, I., Siseci Çeşmeli, M., & Çetinkaya Bozkurt, O. (2021), Tedarikçilerin TOPSIS ile Seçilmesi ve Gelişim Durumlarının Sezgisel Optimizasyon ile Belirlenmesi, *Acta Infologica*, 5(1), 53-64.

Araştırma Makalesi - Research Article

İki Buharlaştırıcı Kritik Nokta Üstü CO_2 Soğutma Çevriminde İç Isı Değiştiricisi Kullanımının Gaz Soğutucusu ve Buharlaştırıcıların Boyutlarına Etkisi

Effect of the Internal Heat Exchanger Usage in the Two Evaporator Transcritical CO_2 Refrigeration System on the Dimensions of the Gas Cooler and Evaporators

Mehmet Tahir Erdinç^{1*}, Muhammet Nasıf Kuru²

Geliş / Received: 30/08/2022

Revize / Revised: 22/12/2022

Kabul / Accepted: 22/12/2022

ÖZ

Soğutma sistemlerinde, küresel ısınmaya neden olan yapay soğutucu akışkanların yerine doğal soğutucu akışkanların kullanımı yaygınlaşmaktadır. CO_2 çevre dostu, maliyetinin düşük olması, ozon tabakasını delme potansiyeli ve küresel ısınma potansiyelinin düşüklüğü nedeniyle soğutma sistemlerinde kullanılan doğal soğutucu akışkandır. Bununla birlikte, CO_2 ile çalışan sistemlerin enerji verimliliğinin yapay soğutucu akışkanlara göre düşük olmasından dolayı, soğutma sisteminin etkinliği iç ısı değiştiricisi eklenerek arttırılmaktadır. Soğutma endüstrisinde, farklı buharlaştırıcı sıcaklığına sahip ortamların elde edilmesi birçok uygulamada istenmektedir. Bu çalışmada, iki farklı buharlaştırıcı sıcaklığına sahip iki buharlaştırıcı CO_2 soğutma çevrimi iç ısı değiştiricisiz ve iç ısı değiştiricili durumlar için ayrı ayrı incelenmiştir. CO_2 'in gaz soğutucusunda kritik nokta üstünde hal değiştirdiği kabul edilmiştir. Farklı gaz soğutucusu basınçlarında ve buharlaştırıcı sıcaklıklarında, gaz soğutucusu ve buharlaştırıcıların boyutları karşılaştırılmıştır. Optimum gaz soğutucusu basınçları elde edilerek, iç ısı değiştiricili durumun sistemin etkinliğini ne kadar iyileştirdiği ve boyutları nasıl etkilediği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gaz soğutucusu basıncı arttıkça gaz soğutucusunun boyu azalmakta, ancak buharlaştırıcıların boyu artmaktadır. Çalışılan tüm durumlar için, optimum gaz soğutucusu basıncı iç ısı değiştiricisi kullanımı ile %3 civarında düşmüştür ve COP değerlerinde %6 civarında artış olmaktadır. COP_{max} ve optimum gaz soğutucusu basıncı, 1,887 ve 9685 kPa olarak $T_{b,1} = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ve $T_{b,2} = 0\text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilmiştir. Bu optimum gaz soğutucusu basıncında, iç ısı değiştiricisi kullanımı ile gaz soğutucusunun boyu yaklaşık olarak yüzde %17 azalırken, gerekli olan buharlaştırıcı 1'in boyu %6,02 ve buharlaştırıcı 2'nin boyu %9,35 artmıştır.

Anahtar Kelimeler- İç Isı Değiştiricisi, İki Buharlaştırıcı, Gaz Soğutucusu, Boyutlandırma, Optimum

ABSTRACT

In refrigeration systems, the use of natural refrigerants become widespread instead of artificial refrigerants that cause global warming. CO_2 is a natural refrigerant used in refrigeration systems due to its environmentally friendly, low cost, ozone layer depletion potential and low global warming potential. However, since the energy efficiency of systems working with CO_2 is lower than that of artificial refrigerants, the performance of the refrigeration system is increased by adding an internal heat exchanger. In the refrigeration industry, it is desirable

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: mtahirerdinc@tarsus.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2201-2937>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tarsus, Mersin, Türkiye

²İletişim: mnasifkuru@tarsus.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5941-1221>)

Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tarsus Üniversitesi, Akdeniz, Mersin, Türkiye

in many applications to obtain environments with different evaporator temperatures. In this study, CO_2 refrigeration cycle with two evaporators with two different evaporator temperatures is investigated separately for the cases with and without an internal heat exchanger. It is assumed that CO_2 changes state above the critical point in the gas cooler. The dimensions of the gas cooler and evaporators are compared at different gas cooler pressures and evaporator temperatures. By obtaining the optimum gas cooler pressures, it was investigated how the situation with the internal heat exchanger improves the performance of the system and how it affects the dimensions of the system. As the pressure of the gas cooler increases, the length of the gas cooler decreases and the length of the evaporators increases. For all studied cases, the optimum gas cooler pressure is reduced by around 3% with the use of the internal heat exchanger, and the COP values are increased by around 6%. COP_{max} and optimum gas cooler pressure were obtained as 1.887 and 9685 kPa at $T_{b,1} = 5\text{ }^\circ\text{C}$ and $T_{b,2} = 0\text{ }^\circ\text{C}$. At this optimum gas cooler pressure, the use of the internal heat exchanger reduced the length of the gas cooler by approximately 17%, while the length of evaporator 1 increased by 6.02% and the length of evaporator 2 by 9.35%.

Keywords- Internal Heat Exchanger, Two Evaporator, Gas Cooler, Dimensioning, Optimum

I. GİRİŞ

Soğutma sistemlerinde verimin iyileştirilmesi bu sistemlerde enerji tüketimini azaltacağından önem taşımaktadır. Soğutma sistemlerinde doğal ve yapay soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Yapay soğutucu akışkanların enerji verimliliği yüksek olmasına karşın çevreye zarar vermektedirler. Bunların ozon tabakasını delme potansiyeli (ODP) ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) yüksektir. Bu nedenle, atmosfere ve çevreye zarar vermeyen ve iklim değişikliğine neden olmayan doğal soğutucu akışkanlara ilgi artmıştır. Soğutma sistemlerinde doğal soğutucu akışkanlardan CO_2 'in ısı iletiminin yüksek olması, yanıcı olmaması, düşük maliyetli ve kolay elde edilebilir olmasından dolayı tercih edilmektedir. CO_2 'in hacimsel ısı transferi kapasitesinin Kloroflorokarbon (CFC) ve Hidrokloroflorokarbon (HCFC)'a göre 3-10 kat arası daha yüksek olduğu Kim vd. [1] tarafından belirtilmiştir. Bu durumda, aynı soğutma kapasitesinde daha düşük boyutlarda soğutma elemanları kullanılabilir.

Soğutma sistemlerinde genellikle kritik nokta altındaki bölgede çalışan buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimleri tercih edilmektedir. Soğutucu akışkan olarak CO_2 'in kullanılması durumunda, dış ortam sıcaklığı kritik sıcaklığa yaklaşır. Bu durumda da dışarıya ısı atımının sağlanabilmesi için soğutma çevriminde kritik nokta üstünde (transkritik) çalışmalıdır. Cabello vd. [2] deneysel olarak CO_2 'in kritik nokta üstü bölgede çalıştığı soğutma çevriminde farklı parametrelerde optimum gaz soğutucu basıncını elde ederek enerji verimini incelemişlerdir. Buharlaştırma sıcaklıklarının (-0,9, -10,1 ve -18,1), gaz soğutucu çıkış sıcaklıklarının (31,2, 33,6, 40,0) olduğu durumda, gaz soğutucu basıncının 74,4 bar ile 104,7 bar arasında değişmesi ayrı ayrı çalışılmıştır. Özgür vd. [3], buharlaştırma sıcaklığının -25 °C ile 0 °C aralığında değiştiği, gaz soğutucu çıkış sıcaklığının 30 °C ve 55 °C aralığında değiştiği durumda gaz soğutucusunun optimum basınç değerlerini elde ederek, korelasyon sunmuşlardır. Ahammed vd. [4] CO_2 'li soğutma sisteminde kısımla vanasının yerine çift fazlı ejektör kullanmışlardır.

Soğutma sistemlerinin veriminin artırılması, bileşenlerin korunması ve boyutların küçültülmesi için genellikle iç ısı değiştiricisi kullanılmaktadır. Fartaj vd. [5] CO_2 'li soğutma sisteminde kritik nokta üstü bölgede çalışılması durumunda iç ısı değiştiricisi kullanımını birinci ve ikinci yasa yönünden incelemişlerdir. Her bir bileşendeki ekserji kayıplarının dağılımının elde edildiği çalışmalarında, sistemin verimine etkisi irdelenmiştir. Sonuç olarak, kompresör ve gaz soğutucudaki tersinmezliğin en yüksek olduğu ve bu bileşenlerin geliştirilmesine çaba harcanması gerektiğini belirtmişlerdir. Llopis vd. [6] iç ısı değiştiricilerinin kısımla vanasında ani buharlaşmayı ve kompresöre sıvı girişini önlemede etkili olduğunu belirtmişlerdir. Karaçaylı ve Şimşek [7], CO_2 'li soğutma sisteminde iç ısı değiştiricisi kullanıldığı durumda buharlaştırıcı girişi kuruluk derecesi ve aşırı kızgınlık değerini enerji ve ekserji verimi açısından incelemişlerdir. Aşırı kızdırma değerinin 5 °C, kuruluk derecesinin 0,42 olması durumunda ekserji veriminin en yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

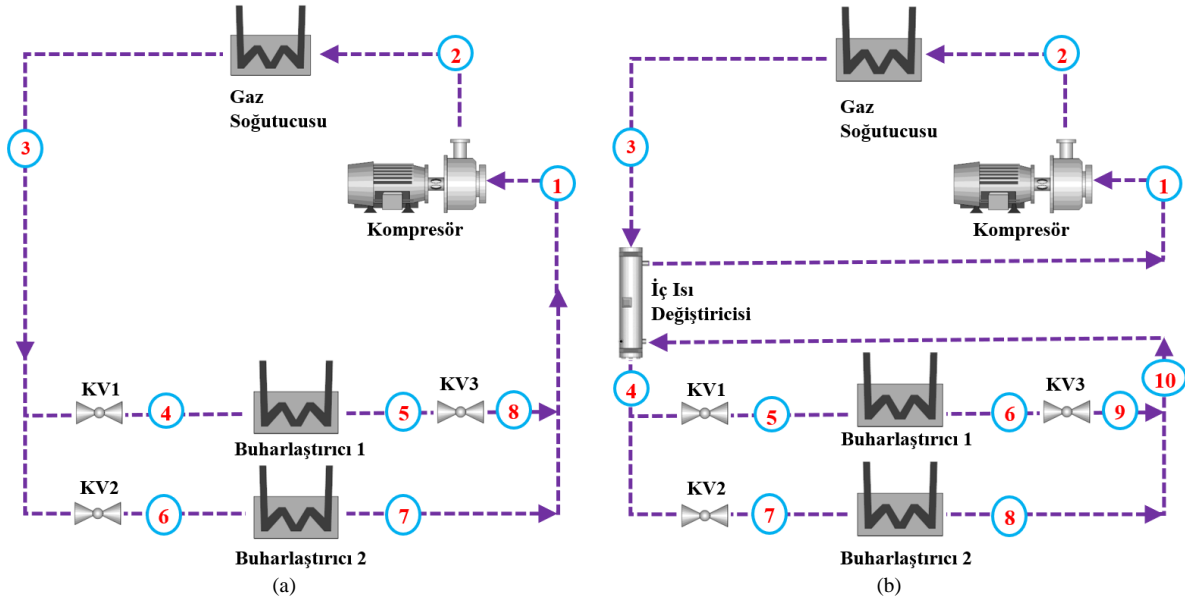
Soğutma uygulamalarında iki buharlaştırıcı kullanılması durumu yaygındır. Yataganbaba vd. [8] iki buharlaştırıcı soğutma sisteminde R134a, R1234yf ve R1234ze'yi soğutucu akışkan olarak kullanarak ekserji analizlerini yapmışlardır, R1234ze'nin R134a ve R1234yf'ye göre daha çevre dostu olduğunu belirtmişlerdir. Ünal vd. [9] ejektörlü iki buharlaştırıcı soğutma sisteminde R1234yf ve R134a'yı soğutucu akışkan olarak kullanmışlardır. Sistemin verimi ve soğutma elemanlarına ait ekserji yıkımları incelenmiştir. Ejektörün sistemin

veriminde, R1234yf için %17, R134a için %15 artış sağladığını belirtmişlerdir, toplam ekserji kaybını ise R134a için %17, R1234yf için %19 olarak elde etmişlerdir. Kutlu vd. [10] iki buharlaştırıcı CO₂'li soğutma sisteminde iki fazlı ejektör kullanımını incelemişlerdir. İki fazlı ejektörün COP'de %26 artış, ekserji yıkımında %22 azalışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Erdinc vd. [11] iki farklı buharlaştırıcı sıcaklığına sahip CO₂'li soğutma sisteminde kritik nokta üstü bölgede iç ısı değiştiricisinin etkisini parametrik olarak çalışmışlardır. İç ısı değiştiricisi, optimum gaz soğutucu basıncında %2,8 azalmaya ve sistemin COP'sinde %5,6 artmaya neden olmuştur. Soğutma yükünün sabit olduğu durumda, iç ısı değiştiricisi kullanımı ile soğutucu akışkan debisinin %23,9 azaldığı ayrıca bulunmuştur. Kuru ve Erdinc [12] kaskad soğutma sisteminde iki buharlaştırıcı kullanımını incelemişlerdir.

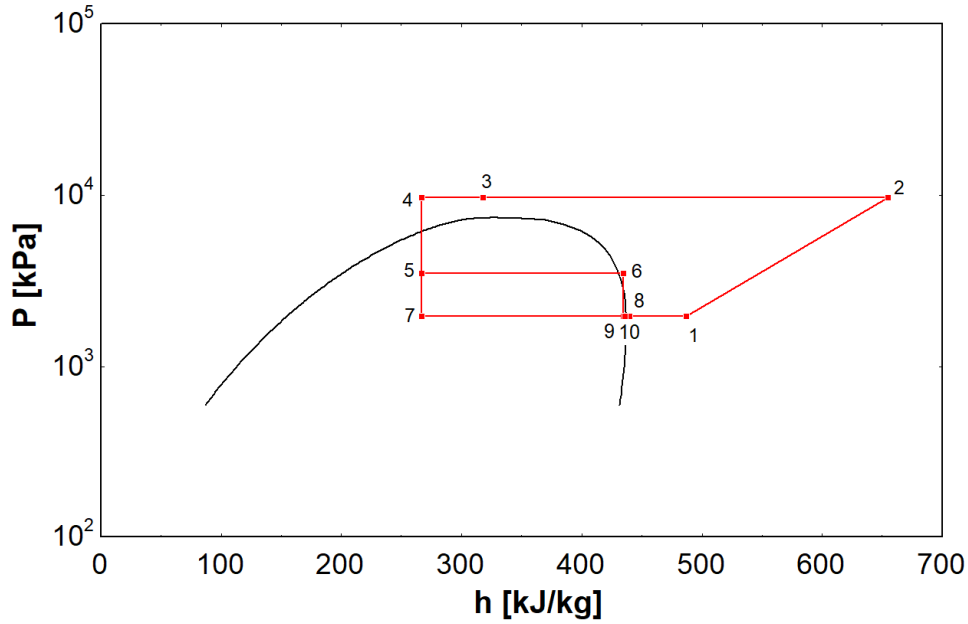
Bu çalışmada, iki buharlaştırıcı CO₂'li soğutma çevriminde, iç ısı değiştiricisi kullanımının gaz soğutucusu ve gerekli olan buharlaştırıcıların boyutlarına etkisi farklı gaz soğutucusu basınçlarında, gaz soğutucusu çıkış sıcaklıklarında ve buharlaşma sıcaklıklarında incelenmiştir. Farklı gaz soğutucusu basınçlarında ve buharlaştırıcı sıcaklıklarında, gaz soğutucusu ve buharlaştırıcıların boyutları karşılaştırılmıştır. Optimum gaz soğutucu basınçları elde edilerek, iç ısı değiştiricili durumun sistemin etkinliğini ne kadar iyileştirdiği ve boyutları nasıl etkilediği incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

İki buharlaştırıcı CO₂'li soğutma sisteminde iç ısı değiştiricisiz ve iç ısı değiştiricili durumlar Şekil 1'de gösterilmiştir. Burada, gaz soğutucusu, buharlaştırıcılar, iç ısı değiştiricisi, kısılma vanaları ve kompresör sistemin ana elemanlarıdır. Şekil 1 de gösterilen kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevrimine ait basınç-entalpi diyagramı da Şekil 2'de verilmiştir. Burada iki farklı buharlaştırıcı sıcaklığına sahip buharlaştırıcılar kullanılarak iki farklı soğuk ortam elde edilmektedir. T_{gs} giriş sıcaklığındaki gaz soğutucusundan T_0 sıcaklığındaki sıcak ortama \dot{Q}_H ısı atılmaktadır. İki farklı soğuk ortam sıcaklığını (T_{s1} ve T_{s2}) sağlamak için buharlaştırıcı sıcaklıklarının (T_{b1} ve T_{b2}) oldukları soğuk ortamlardan (\dot{Q}_{L1} ve \dot{Q}_{L2}) ısıları çekilmektedir. Bu ısıları çekmek için harcanan kompresör işi \dot{W}_H 'dir.



Şekil 1. İki buharlaştırıcı (a) iç ısı değiştiricisi olmayan (b) iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevrimi



Şekil 2. İki buharlaştırıcılı iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevrimine ait basınç-entalpi diyagramı

III. TERMODİNAMİK ANALİZ

İki buharlaştırıcılı kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevriminin termodinamik analizi için aşağıda belirtilen kabuller yapılmıştır:

- Sistemdeki tüm elemanların kararlı durumda olduğu kabul edilmiştir, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Sistemdeki borulardan dışarıya olan ısı geçişi ve borulardaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- Kompresör, kısılma vanası ve iç ısı değiştiricisindeki hal değişimleri adyabatiktir.
- Kompresör verimi, giriş ve çıkış basınçlarına bağlı olarak hesaplanmıştır.
- Buharlaştırıcı sıcaklıkları, gaz soğutucu çıkış sıcaklığı ve aşırı kızdırma/soğutma sıcaklıkları bilinmektedir.
- Buharlaştırıcı sıcaklıklarının soğutulan ortamdan 10 °C düşük, gaz soğutucu çıkış sıcaklığının dış ortam sıcaklığından 10 °C yüksek olduğu kabul edilmiştir.
- Dış ortam sıcaklığı $T_0 = 30$ °C olarak sabit kabul edilmiştir.
- Birinci ve ikinci buharlaştırıcıların soğutma kapasiteleri $\dot{Q}_{b1} = 10$ kW ve $\dot{Q}_{b2} = 5$ kW olarak kabul edilmiştir.
- İç ısı değiştiricisinin etkinliği 0,75 olarak kabul edilmiştir.

Termodinamik analizler Engineering Equation Solver (EES) programı [13] kullanılarak yapılmıştır ve gerekli denklemler, Şekil 1b'de gösterilen iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevrimi için verilmiştir. İç ısı değiştiricisinin kullanılmadığı durumda ise Şekil 1a'ya göre çalışılmıştır. Termodinamik analizlerde, birinci ve ikinci buharlaştırıcı sıcaklıkları (T_{b1} ve T_{b2}), gaz soğutucusu çıkış sıcaklığı ve basıncı (T_{gs} ve P_{gs}) tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir ve sırasıyla -50 °C ile -40 °C, -30 °C ile -20 °C, 35 °C ile 45 °C, 7500 kPa ile 14500 kPa aralığında değişmektedir.

Soğuk ortam 1 için soğutma yükü (\dot{Q}_{L1}), 5–6 noktaları arasındaki entalpi farkının birinci buharlaştırıcıdan geçen soğutucu akışkan debisi \dot{m}_{L1} ile çarpımından elde edilmiştir.

$$\dot{Q}_{L1} = \dot{m}_{L1} (h_6 - h_5) \quad (1)$$

Soğuk ortam 2 için ise soğutma yükü (\dot{Q}_{L2}), 7-8 noktaları arasındaki entalpi farkının ikinci buharlaştırıcıdan geçen soğutucu akışkan debisi \dot{m}_{L2} ile çarpımından elde edilir.

$$\dot{Q}_{L2} = \dot{m}_{L2} (h_8 - h_7) \quad (2)$$

Buharlaştırıcıların çıkışında karışım bölgesinde, enerji dengesi yazılarak, iç ısı değiştiricisi giriş entalpisi (h_{10}) elde edilecektir.

$$\dot{m}_{L1} h_9 + \dot{m}_{L2} h_8 = \dot{m}_{toplama} h_{10} \quad (3)$$

İki buharlaştırıcıya ait kütleli debi değerleri bilinmektedir ve toplam debi Eş. (4) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{m}_{toplama} = \dot{m}_{L1} + \dot{m}_{L2} \quad (4)$$

Birinci ve ikinci buharlaştırıcıdan geçen kütle debileri arasında

$$\dot{m}_{L2} = w \dot{m}_{L1} \quad (5)$$

ilişkisi yazılabilir. Burada w kütleli debi oranıdır. Kompresörde harcanan güç değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_{toplama} (h_2 - h_1) \quad (6)$$

Kompresör izentropik verimi, η_{komp} için Eş. (7) yazılabilir.

$$\eta_{komp} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (7)$$

Burada h_{2s} , kompresördeki izentropik sıkıştırma durumundaki entalpi değeridir. Kompresör izentropik verimi, kompresörün giriş ve çıkış koşullarına bağlıdır, bu nedenle Richter vd. [14] tarafından ampirik olarak sunulan aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$\eta_{komp} = 0,8536 - 0,0577 \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

İç ısı değiştiricisinde, enerji dengesi için Eş. (9) yazılabilir.

$$\dot{Q}_{ihx} = \dot{m}_{toplama} (h_3 - h_4) = \dot{m}_{toplama} (h_1 - h_{10}) \quad (9)$$

İç ısı değiştiricisinin verimi için ise Eş. (10) yazılabilir.

$$\eta_{ihx} = \frac{T_1 - T_{10}}{T_3 - T_{10}} \quad (10)$$

Gaz soğutucusu kapasitesi \dot{Q}_{gs} de Eş. (11) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{gs} = \dot{m}_{toplama} (h_3 - h_2) \quad (11)$$

Kısılma vanalarındaki hal değişimleri Eş. (12) de görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$h_4 = h_5 \quad ; \quad h_4 = h_7 \quad ; \quad h_6 = h_9 \quad (12)$$

İki buharlaştırıcı kritik nokta üstü CO_2 soğutma çevriminin birinci yasa verimi (COP) buharlaştırıcıdaki ısı transferinin toplam harcanan güce oranı olarak tanımlanır.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_{L2}}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_{fan,c1} + \dot{W}_{fan,c2} + \dot{W}_{fan,gs}} \quad (13)$$

Burada fan güçleri, ısı değiştiricileri analizi bölümünden elde edilecektir. Ayrıca basınçlar için aşağıdaki Eş. (14) yazılabilir.

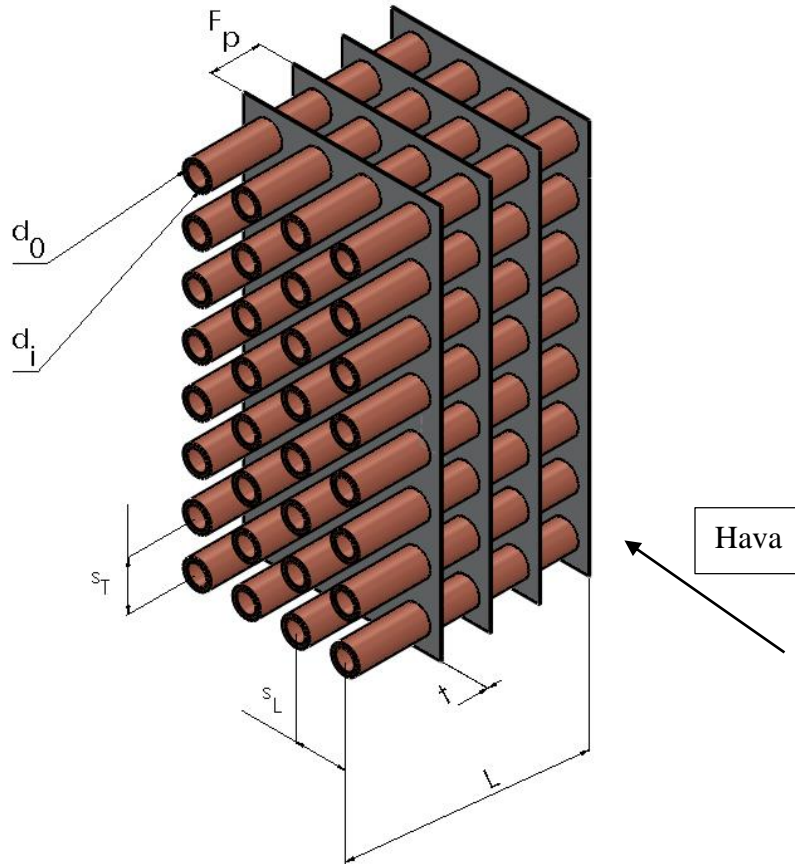
$$P_1 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10}, P_2 = P_3 = P_4, P_5 = P_6 \quad (14)$$

Buharlaştırıcı 2'in çıkış basıncı (P_8) Buharlaştırıcı 1'e (P_6) göre daha düşük olduğundan kısılma vanası konularak Buharlaştırıcı 2'nin basıncına eşitlenmiştir. Böylece iç ısı değiştirici girişi (P_{10}), buharlaştırıcı 2 çıkışı (P_8) ve kısılma vanası 3'ün (P_9) çıkışı eşit basınca sahiptir. Yukarıda verilen denklemlerde $\eta_{ihx} = 0$ olduğu durumda iç ısı değiştiricili olmayan durum ve w 'nin sıfır olduğunda da tek buharlaştırıcılı sistem olmaktadır. İç ısı değiştiricili durum ile iç ısı değiştiricisi olmayan durumun karşılaştırılmasını yapabilmek için ısı verim artışı COP^+ aşağıdaki Eş. (15)'te görüldüğü gibi tanımlanmıştır.

$$COP^+ = \frac{COP_{ihx} - COP_{ihx-yok}}{COP_{ihx-yok}} \cdot 100 \quad (15)$$

IV. ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ HESAPLAMALARI

Gaz soğutucusu ve buharlaştırıcılarda Tablo 1'de listelenen özelliklere sahip Şekil 3'te gösterilen düzgün sıralı dizilişe sahip düz kanat borulu ısı değiştiricisi kullanılmaktadır.



Şekil 3. Kanatlı borulu ısı değiştiricisinin gösterimi

Tablo 1. Kanatlı borulu ısı değıştiricisi özellikleri

Özellik	Değerler
Tip	düz
Diziliş	düzgün sıralı
Boyuna boru sayısı, N_L	4
Enine boru sayısı, N_T	8
Boru dış çapı, d_o	12 mm
Boru iç çapı, d_i	9 mm
Kanatlar arasındaki mesafe, F_p	2 mm
Kanat kalınlığı, t	0,12 mm
Borular arasındaki yatay mesafe, s_L	22 mm
Borular arasındaki enine mesafe, s_T	22 mm
Boru Malzemesi	Bakır
Kanat Malzemesi	Alüminyum

Yapılan boyutlandırmalarda, kanat sayısı ve boru uzunluğu değışmektedir, dolayısıyla ısı değıştiricilerin hacmi de değışmektedir. Gaz soğutucusundan dışarı atılan ısı ve soğuk ortamlardan buharlaştırıcılar yardımıyla çekilen ısı \dot{Q} termodinamik analiz ile elde edilmiştir. Bu ısı transferinin gerçekleşmesi için gerekli yüzey alanları aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{hava} c_p (T_{hava,\zeta} - T_{hava,g}) \quad (16)$$

$$\dot{Q} = U A \Delta T_{lm} \quad (17)$$

Logaritmik sıcaklık farkı ΔT_{lm} ise,

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{giris} - T_{hava,\zeta}) - (T_{çıkış} - T_{hava,g})}{\ln \frac{T_{giris} - T_{hava,\zeta}}{T_{çıkış} - T_{hava,g}}} \quad (18)$$

şeklinde. Burada, $U A$ değeri kirlenme olmadığı varsayılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\frac{1}{U A} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2 \pi k L} + \frac{1}{\eta_o h_o A_o} \quad (19)$$

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f) \quad (20)$$

$$A = A_{boru} + A_f \quad (21)$$

A_{boru} kanatlı olmayan boru yüzey alanı, A_f tüm kanat yüzey alanını, η_f tek bir kanadın verimini, A tarafından toplam yüzey alanını göstermektedir. η_o ise yüzey etkinliğidir. Bu çalışmada, $\eta_f = 0,75$ olarak kabul edilmiştir.

A. Gaz soğutucusu için soğutucu akışkan tarafı ısı transferi katsayısı hesabı, h_i

Boru içerisinde türbülanslı ve tam gelişmiş akış durumu varsayımıyla, Dittus – Boelter [15] korelasyonları soğutucu akışkan tarafındaki ısı transferi katsayısını bulmada kullanılmıştır.

$$Nu_i = 0,023 Re_i^{0,8} Pr_s^{0,4} \quad (22)$$

$$h_i = \frac{Nu_i k_s}{d_i} \quad (23)$$

Boru içerisindeki ortalama hız gaz soğutucusu kapasitesinden debi bulunarak hesaplanmıştır ve Re_i Eş. (24) kullanılarak hesaplanabilir.

$$Re_i = \frac{\rho_s V_{boru} d_i}{\mu_s} \quad (24)$$

Burada gaz soğutucusundaki ani yoğunluk ve ısı iletim katsayısı değişimlerinden dolayı alt bölgelere ayırarak ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir.

B. Buharlaştırıcılar için soğutucu akışkan tarafı ısı transferi katsayısı hesabı, h_i

İki fazlı akışın olduğu buharlaştırıcı için Kenning ve Cooper'ın [16] denklemleri yardımıyla akışkan tarafındaki ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir.

$$Nu_i = (1 + 1,8 \cdot X^{-0,87}) \cdot 0,023 \cdot Re_i^{0,8} \cdot Pr_l^{0,4} \quad (25)$$

Burada, X Lockhart-Martinelli parametresidir ve kurulum derecesine göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$X = \left(\frac{(1-x)}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0,1} \quad (26)$$

Doymuş buhar ve doymuş sıvı yoğunlukları ρ_v ve ρ_l ile doymuş buhar ve doymuş sıvı dinamik viskoziteleri μ_l ve μ_v ile doymuş sıvı Prandtl sayısı Pr_l ile sıvı Reynolds sayısı Re_l ile gösterilmektedir.

$$Re_l = \frac{G_m (1-x) d_i}{\mu_l} \quad (27)$$

G_m kütle akısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_m = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi d_i^2}{4}} \quad (28)$$

Soğutucu akışkan tarafındaki ısı taşınım katsayısı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$h_i = \frac{Nu_i k_l}{d_i} \quad (29)$$

C. Gaz soğutucusu ve buharlaştırıcılar için hava tarafı ısı transferi katsayısı hesabı, h_o

Gaz soğutucusu ve buharlaştırıcılar için aynı tip ısı değiştiricisi kullanıldığından dolayı eşitlikler bu bölümde verilmiştir. Düz kanatlı düzgün sıralı dizilişe sahip kanat borulu ısı değiştiricileri için hava tarafındaki ısı transferi katsayısı Kays ve London [17]'a göre hesaplanmıştır.

$$Nu_o = 0,117 Re_o^{0,65} Pr_{hava}^{1/3} \quad (30)$$

$$h_o = \frac{Nu_o k_{hava}}{d_i} \quad (31)$$

Hava giriş hızı $V_{giriş} = 10 \text{ m/s}$ olarak sabit kabul edilmiştir, Re_o ise minimum akış kesit alanındaki maksimum hıza göre tanımlanmıştır.

$$Re_o = \frac{\rho_{hava} V_{max} d_h}{\mu_{hava}} \quad (32)$$

Hidrolik çap ise,

$$d_h = \frac{4 \cdot A_{min}}{\text{Çevre}} \quad (33)$$

Çevre, yoğuşturucudaki toplam ısı transferi alanının (A) akış doğrultusundaki ısı değiştiricisi boyuna (W) bölünmesi ile bulunur.

D. Hava tarafındaki basınç düşümü ΔP ve fan gücü \dot{W}_{fan}

Rich [18] kanat borulu ısı değiştiricileri üzerinde yaptığı kapsamlı çalışmalar neticesinde, basınç düşümünü ΔP_c kanat sayısına ve giriş hızına bağlı olarak ilişkilendirmiştir. Bu çalışmadaki 1 m boyunca olan kanat sayısı elde edilmiştir ve Rich [18]'in aşağıdaki bağıntısı kullanılmıştır.

$$\Delta P_c = 9,63 V_{giriş}^{1,56} \quad (34)$$

COP hesaplamalarında kullanılacak, fan gücü $\dot{W}_{fan,c}$ ise giriş alanına ($L \cdot H$) bağlı olarak tanımlanmıştır.

$$\dot{W}_{fan} = \dot{V} \Delta P = V_{giriş} L H \Delta P \quad (35)$$

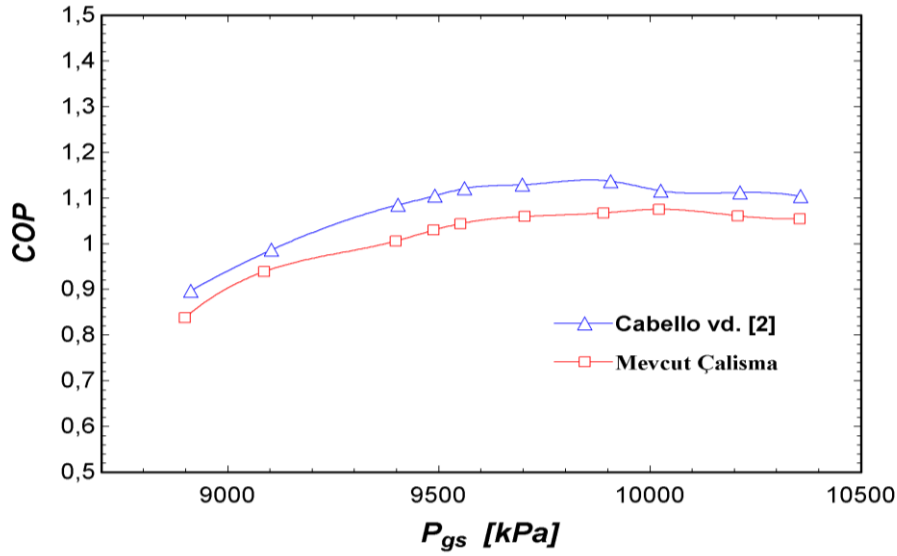
V. DOĞRULAMA

Literatürde iki buharlaştırıcılı CO_2 'li soğutma sistemine ait deneysel çalışma verileri olmadığından Cabello vd. [2]'nin Tablo 3'te verilen tek buharlaştırıcılı CO_2 soğutma sistemine ait deneysel verileri doğrulama çalışmasında kullanılmıştır.

Tablo 3. Cabello vd. [2]'nin deney verileri ve sonuçları

Parametre	Değerler
Buharlaştırma sıcaklığı, T_b	-10,1 °C
Gaz soğutucu çıkış sıcaklığı, $T_{gs,çıkış}$	40,2 °C
Gaz Soğutucu çalışma basıncı, P_{gs}	89 bar ile 103,9 bar arasında
Soğutucu akışkan debisi, \dot{m}_{toplam}	0,041 kg/s ile 0,045 kg/s arasında
Yararlı aşırı kızdırma	5,6 °C
Yararsız aşırı kızdırma	3,4 °C
Soğutma kapasitesi, \dot{Q}_b	3,7 kW ile 5,6 kW arasında
Kompresör güç tüketimi, \dot{W}_k	4,4 kW ile 4,9 kW arasında
Soğutma Performans Katsayısı, COP	0,9 ile 1,2 arasında

Şekil 4'te mevcut çalışma ve Cabello vd. [2]'nin çalışmasına ait COP değerlerinin gaz soğutucu çalışma basıncı ile değişimi verilmiştir. Hata oranı en fazla % 7,28 olmaktadır ve deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kabul edilmiştir. En yüksek COP değerinde gaz soğutucu basıncı optimumdur. Cabello vd. [2], optimum gaz soğutucu basıncını 101,2 bar ve buna karşı gelen COP değerini 1,15 olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada, optimum gaz soğutucusu basıncı 100,2 bar olarak elde edilmiştir ve bu değere karşı gelen COP 1,08 olmaktadır.



Şekil 4. COP değeri için doğrulama çalışması

Liao vd. [19] ve Sarkar vd. [20] optimum gaz soğutucusu basıncını Eş. (36) ve Eş. (37)'de verilen ampirik denklemlerle ifade etmişlerdir:

$$P_{opt} = (2,78 - 0,0157 \cdot T_b) \cdot T_{gs,\text{çıkış}} + (0,381 \cdot T_b - 9,34) \text{ (bar)} \quad (36)$$

$$P_{opt} = 4,9 + 2,256 \cdot T_b - 0,17 \cdot T_{gs,\text{çıkış}} + 0,002 \cdot T_{gs,\text{çıkış}}^2 \text{ (bar)} \quad (37)$$

Mevcut çalışmada elde edilen optimum gaz soğutucusu basıncı değerleri Tablo 4'te Liao vd. [19], Sarkar vd. [20] ve Cabello vd. [2] ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. Mevcut çalışmanın optimum gaz soğutucu basıncı değerinin literatürle karşılaştırılması

	P_{opt} (bar)	Fark (%)
Mevcut çalışma	100,2	-
Cabello vd. [2]	101,2	- % 0,98
Liao vd. [19]	104,9	- % 4,48
Sarkar vd. [20]	100,6	- % 0,40

VI. SONUÇLAR

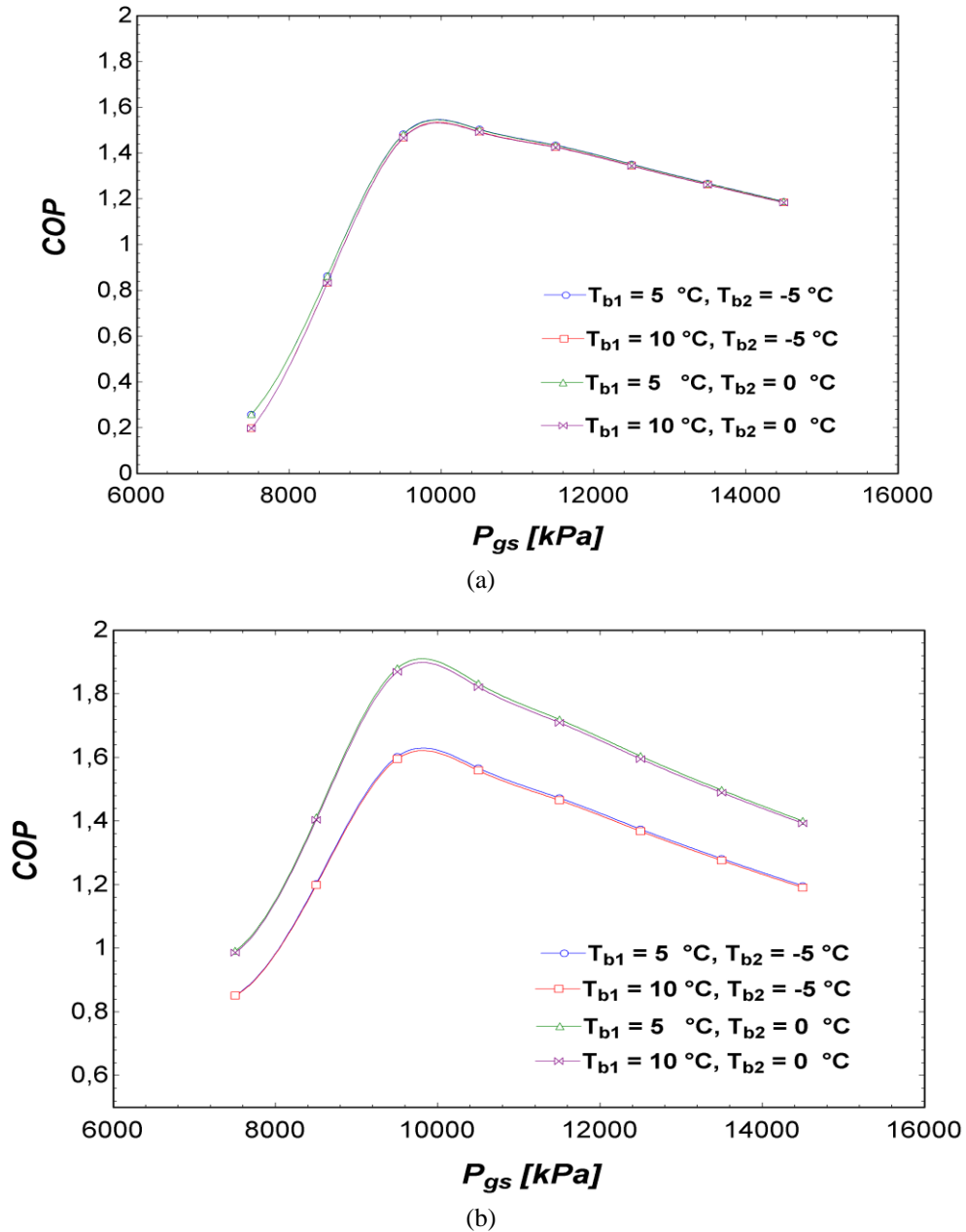
Bu çalışmada, iki farklı buharlaştırıcı sıcaklığına sahip soğutma sisteminde Tablo 5'te listelenen durumlar için gaz soğutucusu boyutları, buharlaştırıcıların boyutları ve COP değerleri elde edilmiştir. Her bir durum için, gaz soğutucusu basıncı 7500 kPa ile 14500 kPa aralığında değişmektedir. İç ısı değiştiricisiz ve iç ısı değiştiricili durumlar ayrı ayrı çalışılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Tablo 5. Mevcut çalışmada kullanılan parametreler

Durum	P_{gs} [kPa]	T_{gs} [°C]	T_{b1} [°C]	T_{b2} [°C]
1	7500-14500	42	5	-5
2	7500-14500	42	10	-5
3	7500-14500	42	5	0
4	7500-14500	42	10	0

A. Gaz soğutucusu basıncının COP'ye etkisi

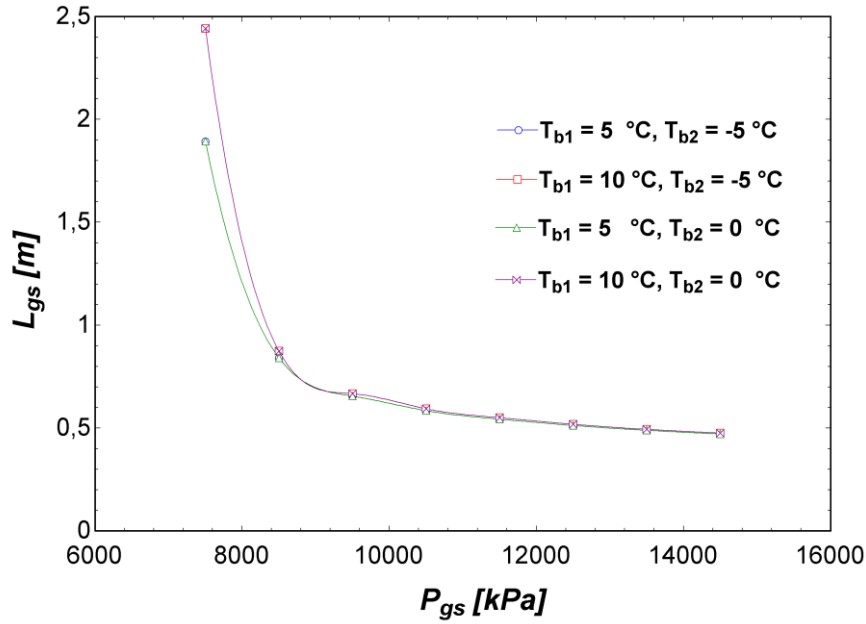
Şekil 5'te iç ısı değiştiricili ve iç ısı değiştiricisiz durumlarda COP ile gaz soğutucu basıncının değişimi gösterilmektedir. Genel olarak gaz soğutucusu basıncının artması ile COP değerleri artarken, belirli bir noktada maksimum değere ulaşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, maksimum COP değerini veren gaz soğutucusu basıncı ve bu basınçtaki çalışma parametreleri optimum olarak kabul edilmiştir. İç ısı değiştiricisi, düşük gaz soğutucu basınçlarında COP değeri neredeyse %310 oranında artırırken, basınç arttıkça bu artış oranı düşmektedir. İç ısı değiştiricisiz çalışılan durumlarda buharlaştırıcı 1 ve 2'nin sıcaklıklarının değişmesi çalışılan gaz soğutucusu basınçlarında COP'yi çok fazla etkilememektedir. Bu durum, CO₂'in termofiziksel özelliğinden dolayı çalışılan buharlaştırıcı sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Fakat iç ısı değiştiricili durumlarda, COP'i T_{b1}'in değişmesi ile çok az miktarda değişirken, T_{b2}'nin artması ile %10 ile %30 arasında artışa neden olmaktadır.



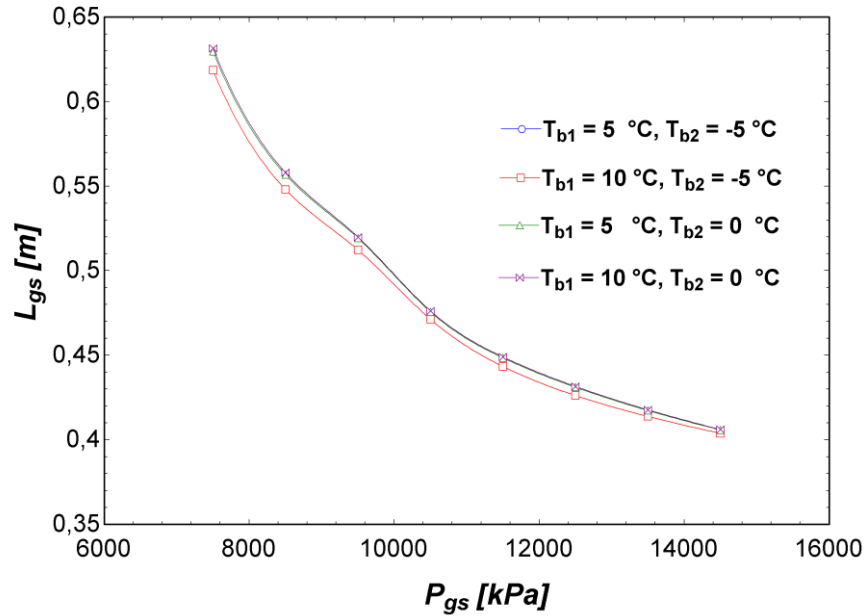
Şekil 5. Gaz soğutucusu basıncının COP'ye etkisi (a) iç ısı değiştiricisiz durum (b) iç ısı değiştiricili durum

B. Gaz soğutucusu basıncının gaz soğutucusunun uzunluğuna etkisi

Şekil 6'da gaz soğutucusu basıncının gaz soğutucusunun uzunluğuna etkisi gösterilmektedir. İç ısı değiştiricisiz ve iç ısı değiştiricili durumlarda gaz soğutucu basıncı arttıkça gaz soğutucusunun boyu azalmaktadır. Çalışılan durumlar göz önüne alındığında buharlaştırıcı 1 ve 2'nin sıcaklıklarının değişimi gaz soğutucusunun boyunu çok az miktarda etkilemektedir. İç ısı değiştiricisiz durumda $P_{gs} = 7500 \text{ kPa}$ olduğunda $T_{b2} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dan $T_{b2} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'e düşmesi ile gaz soğutucusu boyu yaklaşık olarak %21 azalmaktadır. Gaz soğutucusu basıncı arttıkça buharlaştırıcı sıcaklıklarının gaz soğutucusunun boyuna etkisi neredeyse aynıdır. İç ısı değiştiricisi eklenmesi ile çalışılan basınç aralığında %34 ile %20 arasında gaz soğutucusunun boyu kısalmaktadır.



(a)

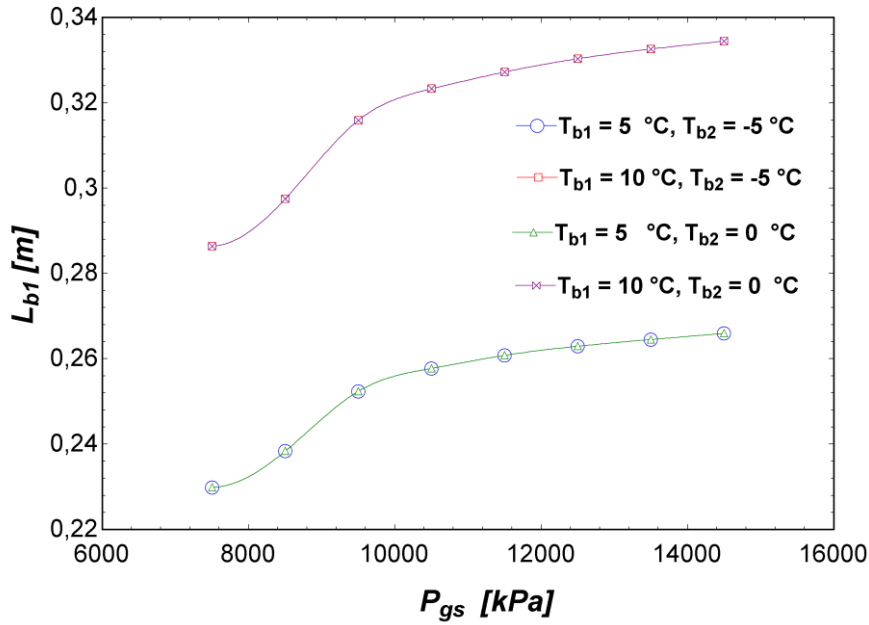


(b)

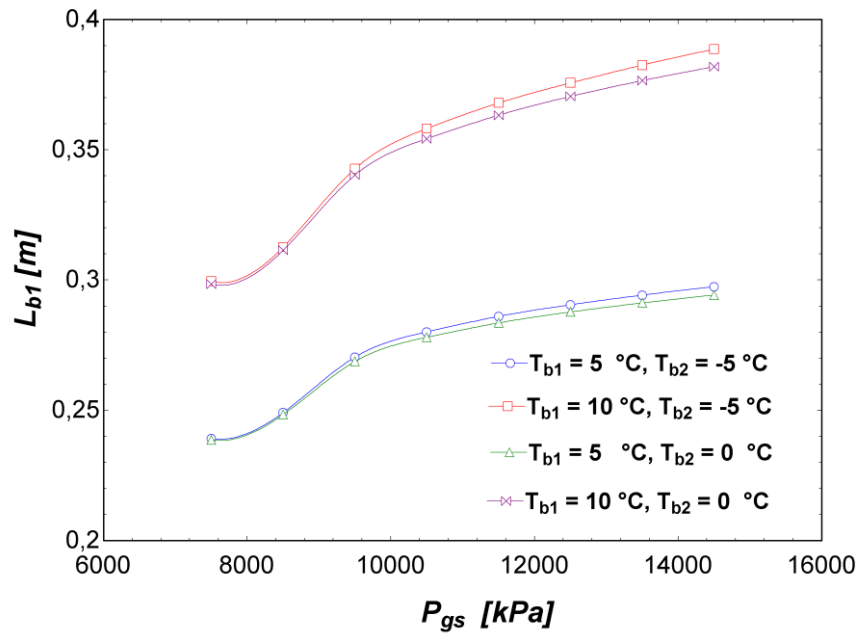
Şekil 6. Gaz soğutucusu basıncının L_{gs} 'e etkisi (a) iç ısı değiştiricisiz durum (b) iç ısı değiştiricili durum

C. Gaz soğutucusu basıncının buharlaştırıcı 1'in uzunluğuna etkisi

Şekil 7'de gaz soğutucusu basıncının buharlaştırıcı 1'in uzunluğuna etkisi gösterilmektedir. Gaz soğutucusunun basıncı arttıkça buharlaştırıcı 1'in uzunluğu artmaktadır. Buharlaştırıcı 1'in uzunluğu $T_{b1} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda $T_{b1} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye göre çalışılan gaz soğutucusu basınçlarında %21 civarında daha azdır. Buharlaştırıcı 2'nin sıcaklığının değişmesi ile buharlaştırıcı 1'in uzunluğu değişmemektedir. İç ısı değiştiricisi eklenmesi yaklaşık olarak %4 ve %13 arasında buharlaştırıcı 1'in boyunun uzamasına neden olmaktadır. İç ısı değiştiricili durumda buharlaştırıcı 2'nin sıcaklığının artması çok az miktarda buharlaştırıcı 1'in boyunun kışalmasına neden olmaktadır.



(a)

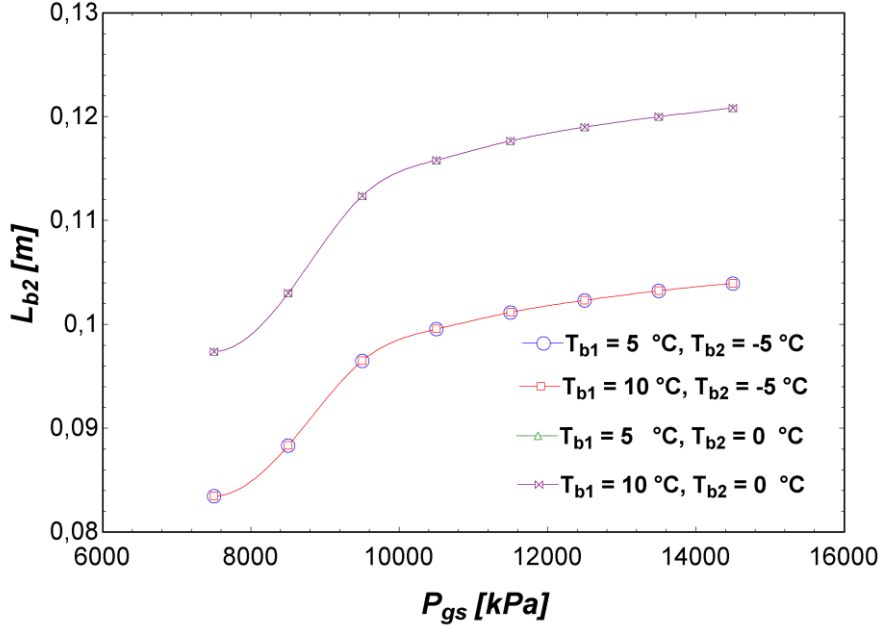


(b)

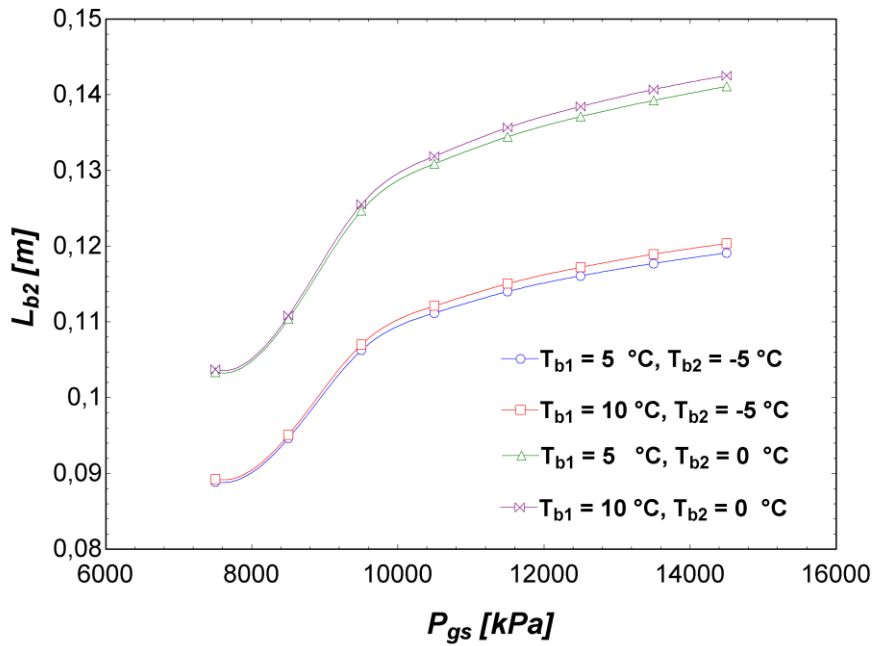
Şekil 7. Gaz soğutucusu basıncının L_{b1} 'e etkisi (a) iç ısı değiştiricisiz durum (b) iç ısı değiştiricili durum

D. Gaz soğutucusu basıncının buharlaştırıcı 2'nin uzunluğuna etkisi

Şekil 8'de gaz soğutucusu basıncının buharlaştırıcı 2'nin uzunluğuna etkisi gösterilmektedir. Buharlaştırıcı 2'nin boyu da gaz soğutucu basıncı arttıkça artmaktadır. Buharlaştırıcı 1'in sıcaklığının artması ile buharlaştırıcı 2'nin uzunluğu iç ısı değiştiricisiz durumda değişmemektedir, iç değiştiricili durum için ise çok az miktarda artmaktadır. İç ısı değiştiricisi kapasitesinin artmasından dolayı buharlaştırıcı 2'nin boyunun uzamasına ve dolayısıyla ısı transferi yüzey alanının artmasına neden olmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 8. Gaz soğutucusu basıncının L_{b2} 'e etkisi (a) iç ısı değiştiricisiz durum (b) iç ısı değiştiricili durum

E. Çalışılan durumların optimum gaz soğutucusu basıncında karşılaştırılması

İç ısı değiştiricili ve iç ısı değiştiricisiz durumlardaki optimum gaz soğutucusu basınçları ve bu gaz soğutucusu basıncındaki çalışılan parametrelere ait değerler Tablo 6'da listelenmiştir. Maksimum COP değerini veren optimum gaz soğutucusu basınçları EES programındaki optimizasyon modülü yardımıyla elde edilmiştir.

Tablo 6. İç ısı değiştiricili ve iç ısı değiştiricisiz durumlardaki optimum gaz soğutucusu basınçları ve bu basınçtaki çalışan parametrelere ait veriler

Durum	1		2		3		4	
	$T_{b,1} = 5\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{b,2} = -5\text{ }^\circ\text{C}$		$T_{b,1} = 10\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{b,2} = -5\text{ }^\circ\text{C}$		$T_{b,1} = 5\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{b,2} = 0\text{ }^\circ\text{C}$		$T_{b,1} = 10\text{ }^\circ\text{C}$ $T_{b,2} = 0\text{ }^\circ\text{C}$	
	IHX'siz	IHX'li	IHX'siz	IHX'li	IHX'siz	IHX'li	IHX'siz	IHX'li
P_{gs} [kPa]	10022	9711	10039	9711	9988	9685	9991	9678
COP_{max}	1,518	1,609	1,505	1,601	1,784	1,887	1,768	1,875
L_{gs} [m]	0,612	0,503	0,621	0,503	0,612	0,510	0,622	0,511
L_{b1} [m]	0,256	0,273	0,321	0,345	0,2556	0,271	0,320	0,343
L_{b2} [m]	0,0984	0,1077	0,0985	0,1085	0,1155	0,1263	0,1155	0,1271

Çalışılan tüm durumlarda, iç ısı değiştiricisi kullanımı ile optimum gaz soğutucusu basıncının yaklaşık olarak %3 düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, COP değerlerinde %6 civarında artış olmaktadır. COP_{max} ve optimum gaz soğutucusu basıncı, 1,887 ve 9685 kPa olarak $T_{b,1} = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ve $T_{b,2} = 0\text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilmiştir. Bu optimum gaz soğutucusu basıncında, gaz soğutucusunun boyu iç ısı değiştiricisi kullanımı ile yüzde %17 civarında azalırken, buharlaştırıcı 1'in boyu %6,02 ve buharlaştırıcı 2'nin boyu %9,35 artmıştır.

VII. TARTIŞMA

Bu çalışmada, iki farklı buharlaştırıcı sıcaklığına sahip iki buharlaştırıcılı kritik nokta üstü CO_2 soğutma çevrimi, farklı gaz soğutucusu basınçlarında ve farklı buharlaştırıcı sıcaklıklarında incelenmiştir. COP değerleri, gaz soğutucusu boyu ve buharlaştırıcı boyları elde edilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Optimum gaz soğutucusu basınçları EES programındaki optimizasyon modülü kullanılarak elde edilmiştir. Sonuç olarak,

- Gaz soğutucusu basıncının artması ile COP değerleri artarken, optimum değere erişildikten sonra COP değerleri azalmaktadır.
- Düşük gaz soğutucu basınçlarında, iç ısı değiştiricisi, COP 'i %310 civarında arttırırken, gaz soğutucusu basıncı arttıkça bu oran azalmaktadır.
- Gaz soğutucusu basıncı arttıkça gaz soğutucusunun boyu azalmakta, buharlaştırıcıların boyu uzamaktadır.
- İç ısı değiştiricisiz durumda $P_{gs} = 7500\text{ kPa}$ olduğunda $T_{b2} = 0\text{ }^\circ\text{C}$ 'dan $T_{b2} = -5\text{ }^\circ\text{C}$ 'e düşmesi ile gaz soğutucusu boyu %21 azalmaktadır.
- İç ısı değiştiricisi eklenmesi yaklaşık olarak %4 ile %13 arasında buharlaştırıcı 1'in boyunun uzamasına neden olmaktadır.
- Buharlaştırıcı 2'nin boyu iç ısı değiştiricili durumda çok az miktarda artmaktadır.
- COP_{max} ve optimum gaz soğutucusu basıncı, 1,887 ve 9685 kPa olarak $T_{b,1} = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ve $T_{b,2} = 0\text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Kim, M. H., Pettersen, J., & Bullard, C. W. (2004). Fundamental process and system design issues in CO_2 vapor compression systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 119-174. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.09.002>
- [2] Cabello, R., Sánchez, D., Llopis, R., & Torrella, E. (2008). Experimental evaluation of the energy efficiency of a CO_2 refrigerating plant working in transcritical conditions. *Applied Thermal Engineering*, 28(13), 1596–1604. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.10.026>
- [3] Özgür, A. E., Bayrakçı, H. C., & Akdağ, A. E. (2009). Kritik nokta üstü çevrimli CO_2 soğutma sistemlerinde optimum gaz soğutucu basıncı: yeni bir korelasyon. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 29(2), 23–28.

- [4] Ahammed, M. E., Bhattacharyya, S., & Ramgopal, M. (2014). Thermodynamic design and simulation of a CO₂ based transcritical vapour compression refrigeration system with an ejector. *Energy Economics*, 45, 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.06.010>
- [5] Fartaj, A., Ting, D. S. K., & Yang, W. W. (2004). Second law analysis of the transcritical CO₂ refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 45(13–14), 2269–2281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.07.001>
- [6] Llopis, R., Sanz-Kock, C., Cabello, R., Sánchez, D., & Torrella, E. (2015). Experimental evaluation of an internal heat exchanger in a CO₂ subcritical refrigeration cycle with gas-cooler. *Applied Thermal Engineering*, 80, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.040>
- [7] Karaçaylı, İ., & Şimşek, E. (2020). İç ısı değiştiricili transkritik CO₂ soğutma sisteminin farklı tasarım parametreleri için ekserji analizi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 389–399.
- [8] Yataganbaba, A., Kılıncarslan, A., & Kurtbaş, I. (2015). Exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 60, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.08.010>
- [9] Ünal, S., Erdinç, M. T., & Kutlu, Ç. (2016). Çift buharlaştırıcılı ve ejektörlü bir soğutma sisteminin termodinamik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4), 1039–1047. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278459>
- [10] Kutlu, Ç., Ünal, S., Erdinç, M. T., & Cihan, E. (2017). Energy and exergy analysis of bus refrigeration system using two-phase ejector with natural refrigerant R744. *International Journal of Exergy*, 22(4), 331–351. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2017.083946>
- [11] Erdinç, M. T., Kuru, M. N., Kutlu, Ç. & Ünal, Ş. (2021). İki buharlaştırıcılı transkritik soğutma sisteminde iç ısı değiştiricisi kullanımının incelenmesi. *Uluslararası Katılımlı 23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (1833–1840)*. Gaziantep.
- [12] Kuru, M. N., & Erdinç, M. T. (2022). İki buharlaştırıcılı karbondioksit (CO₂) - amonyak (NH₃) kaskad soğutma sisteminin termodinamik analizi ve optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 655-669.
- [13] Engineering Equation Solver Academic Professional, (2020). F-Chart Software, Klein SA.
- [14] Richter, M. R., Bullard, C. W., Hrnjak, P. S., & Phoenix, H. (2001). Comparison of R744 and R410A for residential heating and cooling applications general motors corporation. *Industrial Engineering*, 61801(217).
- [15] Dittus, F. W. (1930). Heat transfer in automobile radiators of the tubler type. *Univ. Calif. Pubs. Eng.*, 2, 443.
- [16] Kenning, D. B. R., & Cooper, M. G. (1989). Saturated flow boiling of water in vertical tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(3), 445–458.
- [17] Kays, W. M., & London, A. L. (1984). *Compact heat exchangers*. McGraw-Hill, New York.
- [18] Rich, D. G. (1975). The effect of the number of tube rows on heat transfer performance of smooth plate fin-and-tube heat exchangers, *ASHRAE Transactions*, 81(1), 307-317.
- [19] Liao, S. M., Zhao, T. S., & Jakobsen, A. (2000). Correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles. *Applied Thermal Engineering*, 20(9), 831–841. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00070-8)
- [20] Sarkar, J., Bhattacharyya, S., & Gopal, M. R. (2004). Optimization of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications. *International Journal of Refrigeration*, 27(8), 830–838. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.03.006>

Araştırma Makalesi - Research Article

2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik Asitin Korozyona Karşı İnhibisyon Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Inhibition Effect of 2-ethyl-4-methyl-1,3-thiazole-5-carboxylic Acid Against Corrosion

Mehmet Erman Mert^{1*}

Geliş / Received: 17/05/2022

Revize / Revised: 14/12/2022

Kabul / Accepted: 15/12/2022

ÖZ

Bu çalışmada, 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asitin (2E4MT5C) 0,5 M HCl çözeltisinde yumuşak çeliğin (MS) korozyon davranışına karşı inhibitör özellikleri elektrokimyasal ve teorik yöntemlerle araştırılmıştır. 7 günlük daldırma süresi boyunca 2E4MT5C içermeyen ve 5 mM 2E4MT5C içeren HCl çözeltilerinde elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri ve polarizasyon eğrileri elde edildi. Farklı derişimlerde (0,5; 1; 3 ve 5 mM) 2E4MT5C içeren HCl çözeltilerinde 1 saatlik daldırma süresi için gerçekleştirilen EIS ölçümlerinden elde edilen veriler vasıtasıyla adsorpsiyon izotermi çizilerek, adsorpsiyon denge sabiti ve adsorpsiyon serbest enerjisi belirlendi. Moleküler yapı ile elektrokimyasal davranış arasında ilişki kurmak ve adsorpsiyon mekanizmasını araştırmak için deneysel sonuçlar teorik parametrelerle karşılaştırıldı. 1 saatlik daldırma süresi için elde edilen sonuçlara göre, MS için polarizasyon direnci değerleri 2E4MT5C yokluğunda 39 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ve mevcudiyetinde ise 195,3 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ dir. 7 günlük daldırma süresi için elde edilen sonuçlara göre, MS için direnç değerleri 2E4MT5C yokluğunda 9,8 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ve mevcudiyetinde ise 38,3 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ dir. Teorik olarak hesaplanan HOMO ve LUMO değerleri -6,89 eV ve -1,78 eV dir. Dipol moment 5,96 Debye olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 2E4MT5C'nin yumuşak çelik korozyonuna karşı etkin koruma sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Korozyon, 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asit, DFT, EIS

ABSTRACT

In this study, electrochemical and theoretical approaches were used to explore the inhibitory characteristics of 2-ethyl-4-methyl-1,3-thiazole-5-carboxylic acid (2E4MT5C) against the corrosion behavior of mild steel in 0.5 M HCl solution. During a 7 days immersion time in HCl solutions with and without 5 mM 2E4MT5C, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements and polarization curves were obtained. The adsorption equilibrium constant and adsorption free energy were determined by drawing the adsorption isotherm using the data obtained from the EIS measurements performed for 1 hour immersion time in HCl solutions containing 2E4MT5C at different concentrations (0.5; 1; 3 and 5 mM). To demonstrate the relationship between molecular structure and electrochemical behavior, and to study the adsorption process, experimental data were compared to theoretical parameters. According to the results obtained for the 1-hour immersion time, the resistance values for MS were 39 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ in the absence of 2E4MT5C and 195,3 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ in the presence. According to the results obtained for the 7-days immersion period, the resistance values for MS are 9.8 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ in the absence of 2E4MT5C and 38.3 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ in the presence. Theoretically calculated E_{HOMO} and E_{LUMO} values are -6.89 eV and -1.78 eV. The dipole moment

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: memert@atu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0114-8707>)

İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana, Türkiye

was determined as 5.96 Debye. According to the findings, 2E4MT5C offers significant protection against mild steel corrosion.

Keywords- Corrosion, 2-ethyl-4-methyl-1,3-thiazole-5-carboxylic acid, DFT, EIS

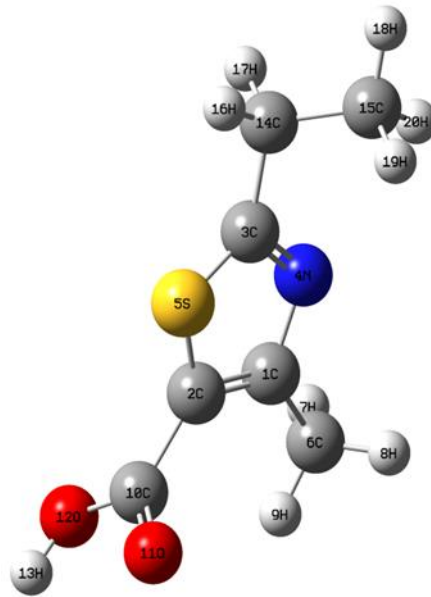
I. GİRİŞ

Demir alaşımları, makine ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle fiziksel ve kimyasal özellikleri yanında maliyet açısından da tercih edilmektedir [1]. Ancak bu malzemelerin kullanım ömrünü kısıtlayan en önemli sorun korozyondur [2]. Korozyon, metal ve alaşımların temas halinde buldukları çevreleri ile etkileşerek yükseltgenmesiyle, doğada mevcut kararlı bileşiklerini oluşturacak şekilde meydana gelen elektrokimyasal doğal bir süreçtir [3]. Korozyon ve zararlı etkilerini (can güvenliği, yapısal sağlamlık, mukavemet, ekonomik etkiler vb) önlemek için birçok teknik kullanılmaktadır [4-6]. Bu teknikler arasında inhibitör uygulamaları, özellikle asidik çözeltilerle temizlik yaparken kolay uygulanabilir ve ekonomik olması nedeniyle tercih edilmektedir [7, 8]. Korozi ortamına düşük derişimlerde inhibitör maddelerin eklenmesi ile metal ve çevre arasındaki etkileşim zayıflatılır ve çeşitli şekillerde (anodik inhibisyon, katodik inhibisyon, karma inhibisyon) koruma sağlanır. Etkin inhibitör tespitinin yapılabilmesi için deneysel işlemlerin teorik hesaplamalar ile desteklenmesinde özellikle adsorpsiyon mekanizmasının aydınlatılması vb. konularda kuantum mekanik yöntemlerden yararlanmakta fayda vardır [9-11]. Bu yöntemler, deneysel bulguların yorumlanması sırasında avantaj sağlar. Özellikle Yoğunluk Fonksiyon Teorisi (DFT) ile inhibisyon karakteristiklerinin belirlenmesi yaygın olarak gerçekleştirilmektedir. Yöntemde, inhibitör özelliği gösteren maddenin moleküler orbitallerinin enerjileri belirlenir, bunlar arasından elektronca dolu en yüksek enerjiye sahip olan orbital (highest occupied molecular orbital:HOMO), moleküler orbitallerden elektron içermeyen en düşük enerjili orbital (lowest unoccupied molecular orbital:LUMO) molekülün metal yüzeyine adsorpsiyonu ile ilgili ipuçları verirken, molekülün dipol momenti ve içerdiği her bir atomun taşıdığı Mulliken yükleri de belirlenebilir [12, 13]. Literatürde heterosiklik bileşiklerden azot, kükürt, oksijen ve konjüge çift bağ içeren moleküler yapıli inhibitörlerin oldukça etkin koruma sağladığı görülmektedir [8, 14-16]. Bir azot ve bir kükürt atomu bulunduran düzlemsel beşli halka yapısına sahip heterosiklik bileşiklerden“tiyazol” ve türevlerinin, korozyona karşı yüksek inhibisyon etkisi gösterdiği kanıtlanmıştır [17]. Ayrıca tıpta çeşitli uygulamalarda (terapatik, anti-enflmatuar, vb) kullanılır. Yaygın olarak B1 vitamini olarak bilinen tiamin, hidroklorür tuzu olarak 2-metilpirimidin-4-amin ile ilişkili bir tiyazol halkasına sahiptir, antimikrobiyal, diüretik, antitüberküler antibakteriyel ve antifungal gibi çeşitli aktiviteler gösterir. Bu çalışmada tiyazol türevlerinden, 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilikasitin (2E4MT5C) inhibitör olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. 2E4MT5C tercih edilmesinin sebeplerinden en önemlisi ise (EC) 1272/2008 Sayılı Tüzüğe göre tehlikeli madde veya karışım değildir [18]. Korozi ortam olarak 0,5 M HCl çözeltisi seçilmiştir. Spesifik olarak adsorpsiyon yeteneğine sahip olan klorür iyonlarını içeren bu ortamda çukurcuk korozyonunun önlenmesi önemlidir. Çukur korozyonu, malzemede oyukların veya "deliklerin" meydana geldiği yerel bir korozyon şeklidir. Oyuklanma, tespit edilmesi, tahmin edilmesi ve buna karşı tasarım yapılması daha zor olduğu için tek tip korozyon hasarından daha tehlikeli olarak kabul edilir. Çukur korozyonunun önlenmesinde pirimidin türevlerinin, tiyazol bileşiklerinin, imidazollerin inhibitör olarak kullanımı yaygındır. Bunun yanı sıra birçok çalışmada bu bileşiklerin türevlerinden hazırlanan schiff bazları da kullanılmıştır. Bu çalışmada ise tiyazol türevlerinden, 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asit araştırılmıştır. Yumuşak çeliğin (MS) 2E4MT5C içermeyen ve içeren 0,5 M HCl çözeltisindeki korozyon davranışı çeşitli daldırma sürelerinde (1-168 saat) elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve polarizasyon deneyleri ile belirlenmiştir. 2E4MT5C'nin MS yüzeyinde adsorpsiyonunu analiz etmek için deneysel ve teorik yöntemler kullanılmıştır. 2E4MT5C içermeyen ve içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde 7 günlük daldırma süreleri sonunda MS yüzeyinin morfolojik yapısının araştırılması için taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerinden yararlanılmıştır ve yüzeylerdeki sıvı temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Korozyon deneyleri elektrokimyasal teknikler ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen MS elektrotun kütlece yüzde bileşimi; 0.09645 C, 0.22423 Si, 0.41797 Mn, 0.02095 P, 0.04229 S, 0.02533 Cu, 0.03594 Ni, 0.01396 Cr, 0.00271 Mo, 0.00591 V, 0.00216 Sn, ve kalan Fe'dir. Ticari olarak temin edilen alaşım 5cm'lik çubuklar şeklinde kesilir ve bir ucu tornada delinerek buraya bakır bir tel tutturulur; bu tel çalışma elektronunun elektrokimyasal iş istasyonuna bağlanması için iletken uç olarak kullanılır. Ardından, delinmeyen alt yüzey açıkta kalacak şekilde tüm MS yüzeyi polyester ile kaplanır bu sayede her deneyde yüzey alanı 0,5 cm² olacak şekilde sabit kalır. Karşı elektrot olarak kullanılmak üzere toplam yüzey alanı 2cm² olan % 99.9 saflıktaki platin bir levha, platin bir tel ile

tutturulur, telin ucu sabitlemek amacıyla cam bir tüpe geçirilir ve polyester ile sabitlenir, elektrot iş istasyonuna bu uçtan bağlanır. Çalışma ve karşı elektrotlar bu sayede laboratuvar ortamında hazırlanmış olur, fakat referans elektrot ticari olarak temin edilir. Crison firmasına ait standart gümüş/gümüş klorür elektrot kullanılır. Tüm deneylerin öncesinde temiz bir yüzey ile çalışmak için MS yüzeyi pürüzsüz ve parlak olacak şekilde zımparalanır işleminde sırasıyla 100, 600 ve 1200 grid zımpara kağıtları ve Metkon marka otomatik zımpara makinesi kullanılır. Elektrokimyasal iş istasyonu CHI marka ve 660B model cihazdır. İnhibitör olarak kullanılan 2E4MT5C, ticari olarak temin edilmiştir. 2E4MT5C'nin optimize edilmiş moleküler yapısı Şekil 1'de verilmiştir. EIS ölçümleri açık devre potansiyelleri değerinde 1×10^5 Hz den başlayarak 6×10^{-2} Hz'e kadar 5 mV genlikte gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ZView eşdeğer devre modelleme programı ile analiz edilmiştir. Adsorpsiyon izoterminin belirlenmesi için EIS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri, MS'in 168 saat daldırma süresi sonunda 5 mM 2E4MT5C içermeyen ve içeren 0,5 M HCl çözeltilerindeki açık devre potansiyelinden itibaren 1×10^{-3} V s⁻¹ tarama hızı ile katodik ve anodik yönlerde ayrı ayrı gerçekleştirilen ölçümler daha sonra CHI marka 660B model cihazın kendi yazılımı vasıtasıyla grafik haline getirilmiştir. Deneyler sırasında sıcaklık 293 K dir. Deneysel çalışmalarda tekrar sayısı en az üç olmak üzere sapan veriler değerlendirme dışında bırakıldıktan sonra ortalama değere en yakın ölçüm sonucu "Şekil" olarak sunulmuştur. Taramalı elektron mikroskop analizleri "Carl Zeiss Evo 40" SEM ile alınmıştır. Sıvı temas açısı belirlemek için Biolin Scientific marka Attension Theta Lite model analiz cihazı kullanılmıştır. Çalışmadaki teorik hesaplamalar Gaussian 03 programında B3LYP/6-311++G(d,p) seviyesinde GaussView arayüzü aracılığı ile ortaya konulmuştur.

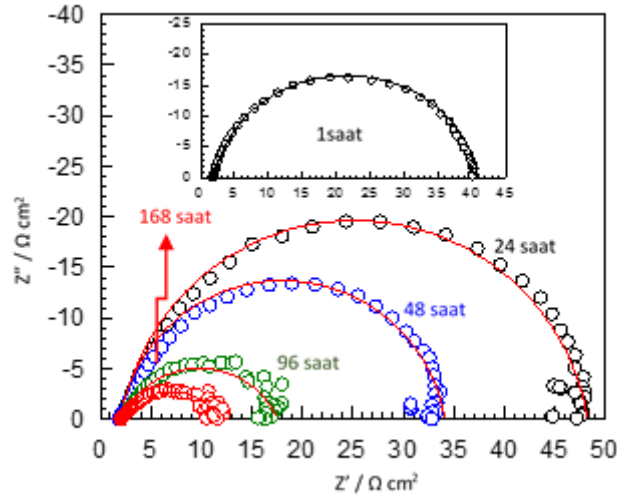


Şekil 1. 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asitin optimize moleküler yapısı

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

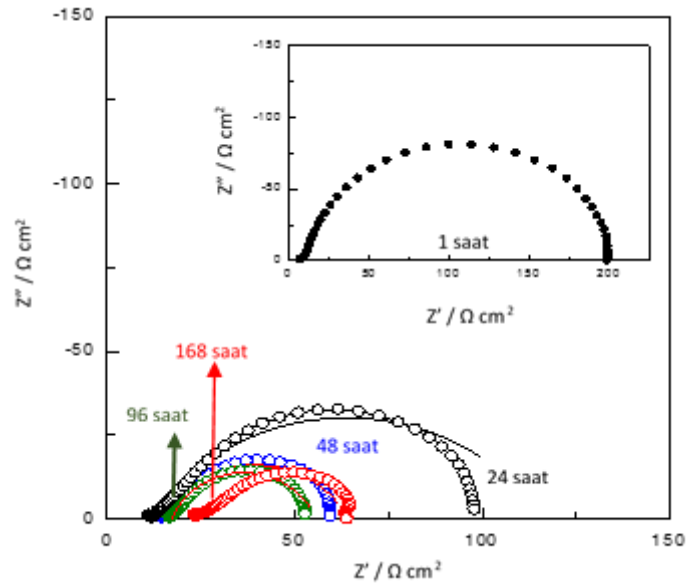
Şekil 1'de 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asitin moleküler yapısı görülmektedir. Heterosiklik yapıda kükürt ve azot gibi ortaklanmamış elektron çifti (oç) taşıyan atomların bulunması metal yüzeyine adsorpsiyonu hızlandırabilir. Tiyazol türevlerinin adsorpsiyon karakteristikleri incelendiğinde bu bölgelerin aktif merkezler gibi davranarak adsorpsiyonun buralardan meydana gelebileceği öne sürülmektedir [16, 19, 20].

MS elektrotun 1 saatlik daldırma süresinden itibaren 7 güne kadar farklı daldırma sürelerinde elde edilen elektrokimyasal impedans spektrumları (EIS) ve eşdeğer devre; Şekil 2 - 4'te sunulmuştur. Şekil 2'de, 1×10^5 Hz den itibaren başlamış olan yarı eliptik eğrinin, orta frekans bölgesinde devam ederek 100 Hz civarında kapanma eğilimi gösterdiği ve 6×10^{-2} Hz'e ulaşıldığında tamamen kapandığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, daldırma süresinin artmasıyla yumuşak çeliğin direnci azalmıştır. MS, korozif asidik ortam ve klorür iyonlarının spesifik adsorpsiyon yeteneği nedeniyle korozyona uğramıştır [19, 21].

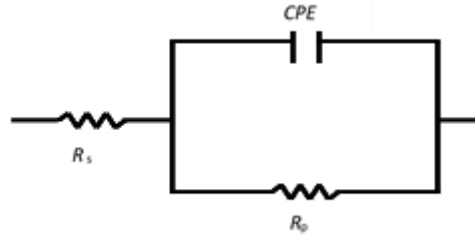


Şekil 2. MS'in farklı daldırma sürelerinde 0,5 M HCl'de elde edilen Nyquist eğrileri.

Şekil 3'te 5 mM 2E4MT5C içeren ortamdaki EIS sonuçları sunulmuştur. Farklı daldırma süreleri için 2E4MT5C içermeyen bütün çözeltilere kıyasla 2E4MT5C içeren ortamda polarizasyon direnci değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4'de sunulan eşdeğer devre modeli ile elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de t daldırma süresini, R_p polarizasyon direnci, CPE sabit faz elementi, $\eta\%$ inhibisyon etkinliğini, χ^2 ise deneysel veriler ile modelleme sonuçları arasındaki hataları gösteren kısaltmalardır. 2E4MT5C'nin 7 günlük daldırma süresi sonunda %74'lük koruma sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 3. MS'in farklı daldırma sürelerinde 5 mM 2E4MT5C içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde elde edilen Nyquist eğrileri.



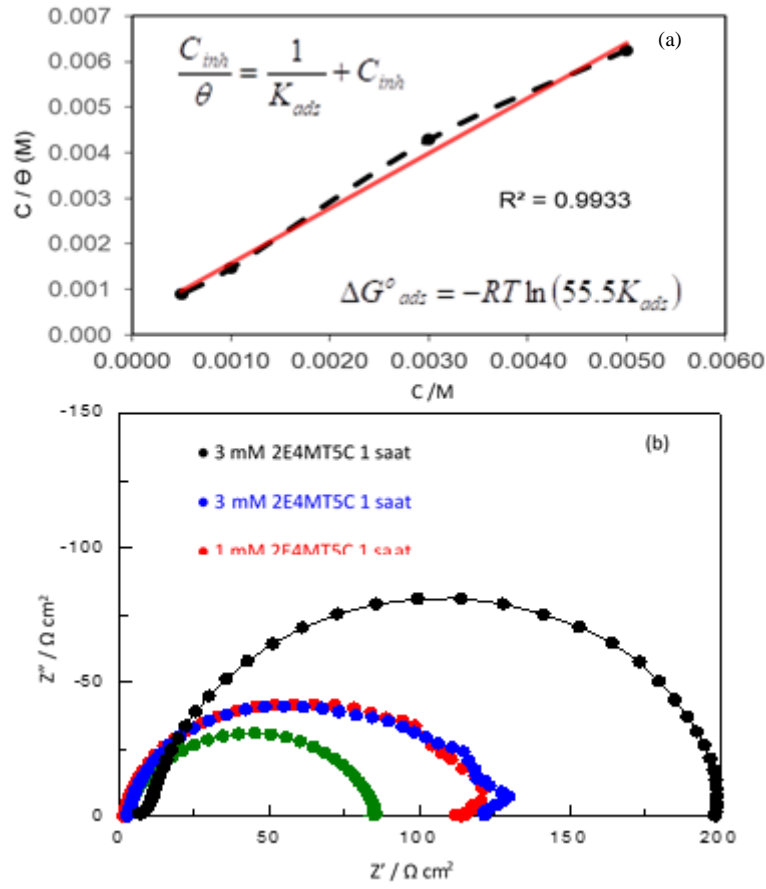
Şekil 4. EIS sonuçlarını temsil eden elektronik devre modeli: R_s çözelti direnci; R_p polarizasyon direnci, CPE sabit faz elementi

Tablo 1. EIS sonuçlarına ait eşdeğer devre elemanları.

HCl			2E4MT5C					
t/sa	$R_p / \Omega \text{ cm}^2$	CPE $10^{-6}/s^n \Omega^{-1} \text{ cm}^2$	t/sa	C/ mM	$R_p / \Omega \text{ cm}^2$	CPE $10^{-6}/s^n \Omega^{-1} \text{ cm}^2$	$\eta\%$	Chi ²
1	39,0	690,1	1	0,5	86,9	305,9	55	$3,1 \times 10^{-5}$
			1	1	123,8	206,8	69	$4,8 \times 10^{-5}$
			1	3	130,7	192,3	70	$3,4 \times 10^{-5}$
			1	5	195,3	129,2	80	$9,4 \times 10^{-5}$
24	46,1	1084,4	24	5	104,2	349,4	56	$3,2 \times 10^{-3}$
48	32,2	2934,6	48	5	48,7	1938,4	34	$2,7 \times 10^{-5}$
96	15,5	7940,3	96	5	40,3	1855,1	62	$3,9 \times 10^{-5}$
168	9,8	9973,8	168	5	38,3	1904,1	74	$6,4 \times 10^{-5}$

2E4MT5C'nin MS yüzeyine adsorpsiyonunun aydınlatılması için farklı derişimlerde elde edilen EIS sonuçlarından faydalanılarak izoterm eğrisi oluşturulmuştur [16, 22, 23]. Sonuçlar farklı izoterm modellerine uygulanmış ve en yüksek R^2 değeri (0,9933) ile Langmuir adsorpsiyon izotermine uymuştur. Elde edilen izoterm Şekil 5 a'da ve ölçüm sonuçları Şekil 5 b'de verilmiştir. Şekil 2, 3, 5 b ve Tablo 1 kıyaslanarak 1 saatlik daldırma süresinin ardından 2E4MT5C içeren HCl çözeltilerinde elde edilen EIS ölçümlerinin sonuçları değerlendirildiğinde; 0,5; 1; 3 ve 5 mM 2E4MT5C içeren ortamlardaki R_p değerlerinin sırasıyla; 86,9; 123,8; 130,7; 195,3 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ olduğu tespit edilmiştir. Chi² değerlerinin ise literatürde kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmektedir [9, 12, 20]. Tablo 1 değerlendirildiğinde 1 saatlik daldırma süresinin ardından 0; 0,5; 1; 3 ve 5 mM 2E4MT5C içeren ortamlardaki CPE değerlerinin sırasıyla 690,1 $\times 10^{-6}$; 305,9 $\times 10^{-6}$; 206,8 $\times 10^{-6}$; 192,3 $\times 10^{-6}$ ve 129,2 $\times 10^{-6}/s^n \Omega^{-1} \text{ cm}^2$ 'dir. Literatürde artan R_p ile CPE değerindeki azalma, metal yüzeyinde adsorbe edilen su moleküllerinin inhibitör moleküllerle yer değiştirmesine ve koruyucu bir tabaka oluşturmasına bağlanmaktadır [9, 12, 20]. 2E4MT5C'nin 1 saat daldırma süresi sonunda en yüksek koruma etkinliği %80 iken 168 saat sonunda bu değer %74 olduğu tespit edilmiştir, en etkin korumanın 5 mM 2E4MT5C içeren ortamda gerçekleştiği görülmüştür.

İnhibitör derişiminin yüzey kaplanma kesrine oranlanması ve elde edilen değerlerin inhibitör derişimlerine göre grafiğe geçirilmesi ile elde edilen Langmuir adsorpsiyon izotermi vasıtasıyla belirlenen adsorpsiyon denge sabiti (K_{ads}) değeri 2500 M^{-1} iken ΔG°_{ads} değeri de $-28,843 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır [2, 5]. Bu değerlerin büyüklüğü 2E4MT5C'nin MS'in yüzeyine kuvvetlice tutunduğunun ve aralarında fiziksel olarak etkin bir adsorpsiyonun olabileceğini belirtmektedir. Literatürde de belirtildiği gibi ΔG°_{ads} 'nin $40-45 \text{ kJ mol}^{-1}$ den az olması etkileşimin fiziksel olarak gerçekleştiğini düşündürmektedir [2, 5, 20]

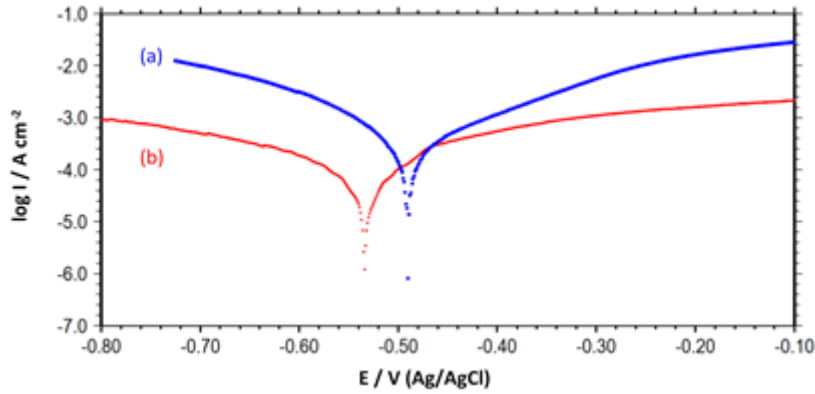


Şekil 5. Langmuir adsorpsiyon izotermi (a) ve MS'in farklı derişimlerde 2E4MT5C içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde elde edilen Nyquist eğrileri (b)

2E4MT5C'nin MS'in korozyon davranışına polarize koşullardaki etkisi, yarı logaritmik akım yoğunluğu-potansiyel eğrileri ile incelenmiştir. Bu amaçla açık devre potansiyelinden itibaren ayrı ölçümler olacak şekilde katodik ve anodik yönlerde polarize edilen MS elektrotun elektrokimyasal davranışları Şekil 6'da verilmiştir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi [1, 2, 10] ile belirlenen korozyon akım yoğunluğu değerleri 2E4MT5C içermeyen ve içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde sırasıyla yaklaşık $2,7 \times 10^{-3}$ ve $7,9 \times 10^{-5}$ A cm⁻² olarak belirlenmiştir. Bu veriler ile hesaplanan inhibisyon etkinliği (η) % 97 dir. EIS ölçümlerinden 168 saat sonunda 5 mM inhibitör içeren ortamda η ise % 74 dür. Bu iki yöntem sonuçlarına göre hesaplanan % η verilerinin birbirinden farklı tespit edilmesi literatürde çok sık olmamakla birlikte, karşılaşılan bir durum olarak görülmektedir. Fouada ve ark. [24] elektrotun iki ölçüm tekniğinde farklı yüzey durumuna dikkati çekmektedir. EIS, açık devre potansiyelinde gerçekleştirilirken, polarizasyon ölçümlerinde, elektrot potansiyeli hücre geometrisinden, çözelti iletkenliğinden, referans elektrot yerleşiminden vb. kaynaklanan düzgün olmayan akım dağılımlarında polarize edilmektedir. Nazari ve ark. [25] ise EIS ve polarizasyon ölçümleri sonucunda söz konusu η değerlerini sırasıyla % 61,4 ve % 84,2 olarak belirlemiştir. El aufir ve ark. [26] tarafından sentezlenen 3 farklı tiyazol türevi için gerçekleştirilen bir çalışmada, MS'in HCl çözeltisindeki korozyon davranışları incelenmiştir. 0.5 mM inhibitör derişimlerinde; metil (E)-5-(4-klorofenil)-2-(((E)-4-metilbenziliden)hidrazono)-2,3-dihidrotyazol-4-karboksilat içeren ortamda belirlenen korozyon akım yoğunluğu $97,58 \times 10^{-6}$ A cm⁻²; metil (E)-5-(4-klorofenil)-2-(((E)-4 nitrobenziliden)hidrazono)-2,3-dihidrotyazol-4-karboksilat içeren ortamda $81,30 \times 10^{-6}$ A cm⁻² ve metil (E)-2-(((E)-4-klorobenziliden)hidrazono)-5-(4 klorofenil)-2,3-dihidrotyazol-4-karboksilat içeren ortamda ise 60×10^{-6} A cm⁻² olarak belirtilmiştir. İnhibitör içermeyen 1 M HCl çözeltisinde MS için belirlenen korozyon akım yoğunluğu ise bu değerlerden oldukça yüksektir (507×10^{-6} A cm⁻²). Yazarlar sentezledikleri tiyazol türevlerinin korozyona karşı etkin inhibisyon değeri göstermesini, yapıarda bulunan kükürt, azot, oksijen ve aromatik halkalar sayesinde moleküllerin yüzeye kuvvetli adsorpsiyonu ile ilişkilendirmiştir. Tiyazol türevlerinin inhibisyon etkisinin araştırıldığı bir başka çalışma ve Gong ve ark. [7] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 2-amino-4-

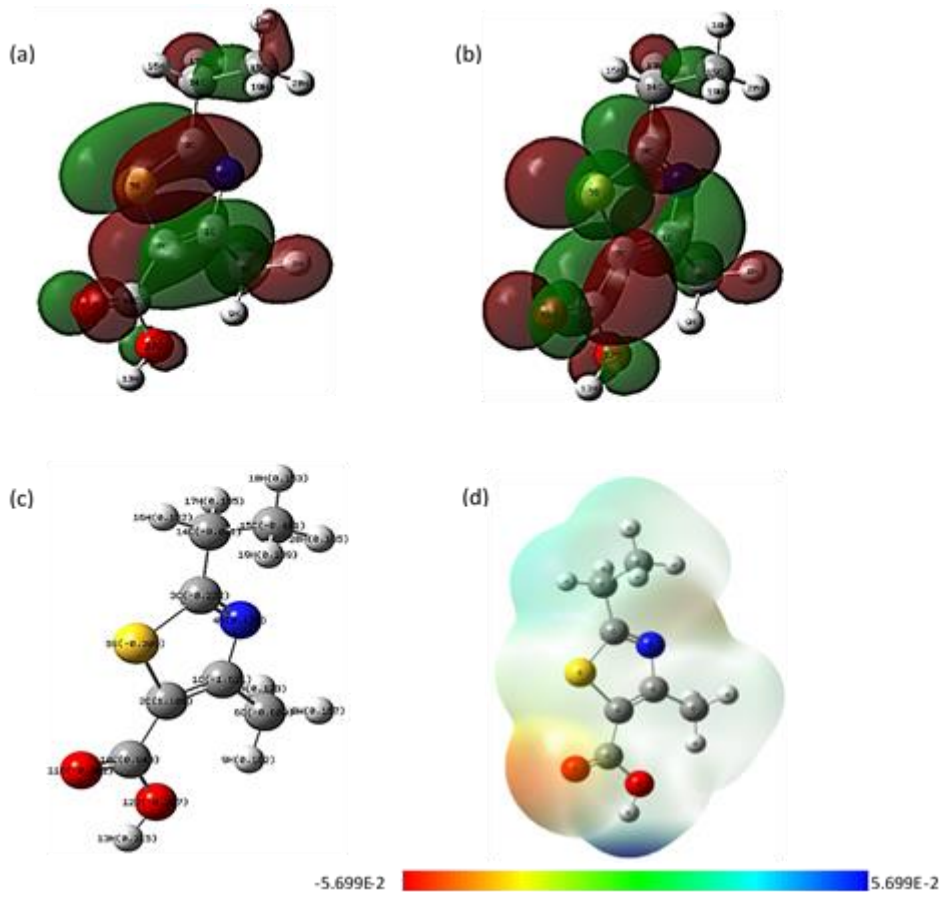
(4-metoksifenil)-tiyazol kullanıldı. 2-amino-4-(4-metoksifenil)-tiyazol içeren ortamlarda MS'in korozyon davranışı 0,5 M H₂SO₄ ve 1 M HCl çözeltilerinde değerlendirildi ve çalışılan en yüksek derişim olan 2.5 mM için sırasıyla 67.9 x10⁻⁶ A cm⁻² ve 19 x10⁻⁶ A cm⁻² akım yoğunluğu değerleri tespit edildi. İnhibitör içermeyen ortamlarda bu değerlerin sırasıyla 777 x10⁻⁶ A cm⁻² ve 174 x10⁻⁶ A cm⁻² olduğu belirtildi.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, 2E4MT5C varlığında hem anodik hem de katodik akım yoğunluğu değerlerinin azaldığı ayrıca, MS'in korozyon potansiyelinin 2E4MT5C içermeyen ve içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde fazla değişmemekle beraber farkın 80 mV'dan az olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda 80 mV'luk farkın altındaki değerler için inhibitörler "karma inhibitör" olarak adlandırılmaktadır, bu nedenle 2E4MT5C için de karma inhibitör betimlemesi yapılmaktadır [3, 20, 27].



Şekil 6. MS'in 168 saat daldırma süresi sonunda 2E4MT5C içermeyen (a) ve içeren (b) 0,5 M HCl çözeltilerindeki polarizasyon eğrileri.

Elektrokimyasal deney sonuçları 2E4MT5C'nin HCl çözeltisinde MS'in korozyonunu inhibe etme etkinliğine sahip olduğunu göstermiştir. İnhibisyon mekanizması ve adsorpsiyonun aydınlatılması için ayrıca 2E4MT5C molekülü teorik olarak da irdelenmiştir. DFT, moleküler dinamik, vb. teknikler kullanılarak korozyon inhibisyonu sağlayan moleküllerin koruma etkinliğinin elektrot yüzeyiyle etkileşimlerine dayandırılarak, adsorpsiyon mekanizmasının irdelenmesi 90'lı yıllardan itibaren önem arz eden bir konu olmuştur [4, 5]. Literatürde, inhibitörlerin adsorpsiyon davranışları aydınlatılırken genellikle elektrostatik potansiyel yüzeyi (MEP) sunulur ve bu yüzey haritası üzerinden elektrofilik/nükleofilik bölgeler gösterilerek inhibitör-metal etkileşimleri açıklanabilir [28-30]. Ayrıca LUMO, HOMO enerjileri ve bunlar arasındaki fark ise gerek adsorpsiyonun kuvveti gerekse molekülün kararlılığıyla ilgili bilgiler sağlamaktadır. Bu sebeple; 2E4MT5C için bazı teorik parametreler belirlenmiştir. Şekil 7'de HOMO, LUMO yüzeyleri, her bir atomun Mulliken yükleri ve MEP görülmektedir. MEP in negatif (kırmızı renk) bölgeleri elektrofilik reaktiviteyi (elektronca zengin), ve pozitif (mavi renk) bölgeleri nükleofilik reaktivite (elektronca fakir) ilgilidir. Ayrıca MEP yüzeyindeki diğer renkler hafifçe elektron eksik bölgeleri açık mavi, hafifçe elektronca fazla bölgeleri sarı ile nötr bölgeleri ise yeşil renk ile gösterilebilir [31].



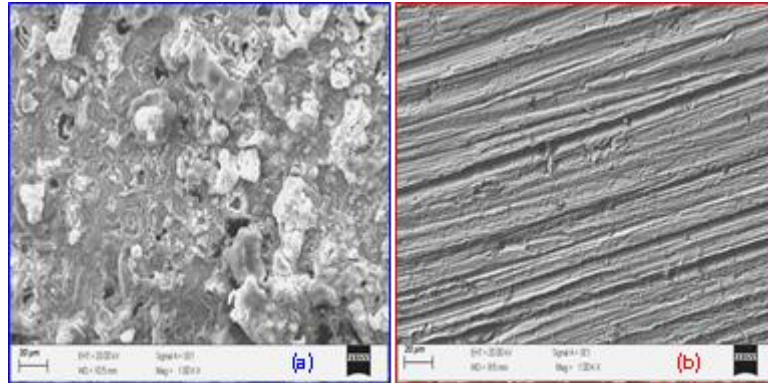
Şekil 7. 2E4MT5C'nin HOMO yüzeyi (a), LUMO yüzeyi (b), atomların Mulliken yükleri (c), MEP (d)

Şekil 7'de HOMO ve LUMO yüzeylerinin molekülün tamamını kaplayacak biçimde dağıldığı görülmektedir fakat etil grup (-C₂H₅) üzerinde orbital dağılımı daha zayıftır. Büyük bir olasılıkla, 2E4MT5C'in HOMO'ü metalik yüzeye doğru yönelir, oksijen atomlarının bulunduğu bölgenin nükleofilik bölge olarak davrandığı ve MS yüzeyine adsorpsiyonun bu kısımdan meydana geldiği düşünülmektedir (Şekil 7). Teorik verilere ait bilgiler Tablo 2'de görülmektedir. LUMO ve HOMO enerjileri sırasıyla -1,78 eV ve -6,89 eV olarak tespit edilmiştir. Söz konusu orbitallerin enerji farkı 5,11 eV'dur. 2E4MT5C'in dipol momentini 5,96 Debye dir. 2E4MT5C'in yüksek dipol momentini sayesinde MS yüzeyine güçlü adsorplandığı düşünülmektedir [26]. Elektronegatiflik ($\chi = -1/2(E_{\text{HOMO}} + E_{\text{LUMO}})$) değeri 4,34; kimyasal sertliği ($\eta = -1/2 (E_{\text{HOMO}} - E_{\text{LUMO}})$) 2,56 ve kimyasal yumuşaklığı ($s=1/ \eta$) 0,39 olarak belirlenmiştir. Literatürde tiyazol ve türevi bileşiklerin elektronegatiflik, kimyasal sertlik vb. sayısal değerlerinin bu çalışmada belirlenen değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir [32]. Elektronegatiflik (χ), metalle paylaşılan elektron çiftini çekmek için moleküldeki bir atomun eğilimi gösterir. Sertlik (η) ve yumuşaklık (σ) kavramları, moleküler kararlılığı ve reaktiviteyi ölçmek için ihtiyaç duyulan önemli parametrelerdir. Sert bir molekül geniş bir enerji aralığına sahiptir, yumuşak bir molekül ise küçük bir enerji aralığına sahiptir [31]. 2E4MT5C'in yapısındaki C=N ve C=C bağlarının π -elektronları, S ve O üzerindeki oç'lerin de MS yüzeyine adsorpsiyonu kuvvetlendirdiği düşünülebilir [33-35].

Tablo 2. 2E4MT5C molekülü için hesaplanan parametreler

IUPAC adlandırma	2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asit
Kapalı formül	C ₇ H ₉ NO ₂ S
E _{HOMO} (eV)	-6,89
Dipol moment (Debye)	5,96
Molekül kütlesi (amu)	171,220
E _{LUMO} (eV)	-1,78
ΔE	5,11
Elektronegatiflik (χ)	4,34
Kimyasal sertlik (η)	2,56
Kimyasal yumuşaklık (s)	0,39

2E4MT5C'in MS yüzeyine adsorpsiyonu çok ince bir inhibitor film oluşumuna neden olabilir ve bu film MS'yi korozif ortamdan koruyabilir. MS'in yüzey morfolojisi 2E4MT5C varlığında oldukça değişmiştir. Şekil 8'de SEM görüntülerinden anlaşılacağı üzere 2E4MT5C içermeyen ortamda 7 günlük daldırma süresinde HCl çözeltisinin korozif etkisi ile MS yüzeyi bozunurken, 2E4MT5C içeren ortamda yüzeyin korozyona karşı etkili şekilde korunduğu gözlenmiştir. Şekil 8.a'da yüzey oldukça heterojen ve çukurcuklar, korozyon ürünleri vb. gözlenirken, Şekil 8.b'de homojen bir yüzey yapısı dikkati çekmektedir.

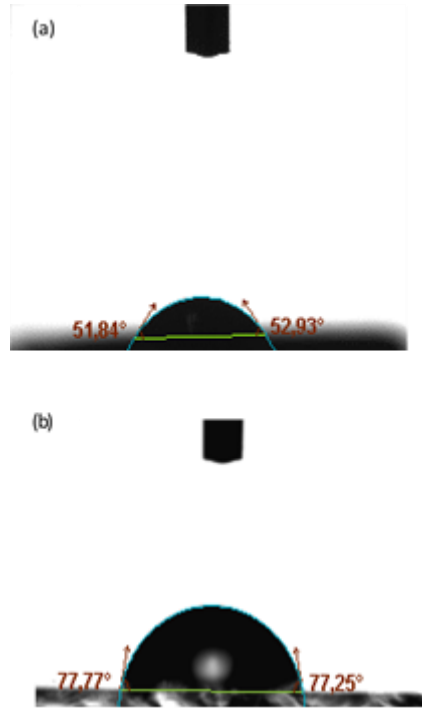


Şekil 8. MS'in 168 saat daldırma süresi sonunda 2E4MT5C içermeyen (a) ve içeren (b) 0,5 M HCl çözeltilerindeki SEM görüntüleri

Şekil 9'da MS'in 168 saat daldırma süresi sonunda 2E4MT5C içermeyen (a) ve içeren (b) 0,5 M HCl çözeltilerindeki sıvı temas açısı ölçümleri görülmektedir. Bu ölçümler hem yüzey pürüzlülüğü hem de hidrofilik-hidrofobik davranışın anlaşılması açısından önemlidir.

Şekil 9.a'da ortalama temas açısı 52° iken Şekil 9.b'de yaklaşık 77° dir. Bu durum 0,5 M HCl çözeltisinde 7 gün bekletilen MS'in korozyona uğradığı için 2E4MT5C içeren ortama kıyasla daha pürüzlü ve heterojen bir morfolojiye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Temas açısı ölçümlerinin Şekil 9'da sunulan SEM görüntüleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Deneysel olarak elde edilen bulgular, teorik veriler ve yüzey analizleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde genel olarak 2E4MT5C'in MS'in HCl çözeltisindeki korozyon davranışını inhibe ettiği görülmektedir.



Şekil 9. MS'in 2E4MT5C içermeyen (a) ve içeren (b) 0,5 M HCl çözeltisinde 7 gün sonunda belirlenen temas açıları

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asitin (2E4MT5C) asidik ortamda yumuşak çeliğin korozyon davranışına inhibisyon etkisi incelenmiştir. Elektrokimyasal ölçüm sonuçlarına göre 7 günlük daldırma süresine rağmen 2E4MT5C yaklaşık %74'lük inhibisyon etkinliği ile MS'i korozyona karşı korumaktadır. Tafel polarizasyon yöntemi ile elde edilen korozyon hızları kıyaslandığında; 2E4MT5C içermeyen ve içeren ortamlarda değerler yaklaşık 30 kat azaldığı tespit edilmiştir. Adsorpsiyon izoterminin Langmuir modeline uygun olduğu görülmüştür. DFT ile belirlenen Mulliken yükleri değerlendirildiğinde; adsorpsiyonun 2E4MT5C'in azot ve oksijen uçlarından gerçekleştiği düşünülmektedir. SEM görüntülerinden 2E4MT5C içermeyen ortama maruz kalan MS yüzeyinin korozyona uğradığı için oldukça pürüzlü olduğu, 2E4MT5C içeren ortamda ise daha homojen bir yüzey olduğu tespit edilmiştir. Yüzey temas açılarından elde edilen bulgular da SEM görüntülerini destekler niteliktedir.

Kısaca; 2-etil-4-metil-1,3-tiyazol-5-karboksilik asitin yumuşak çeliğin HCl çözeltisindeki korozyon davranışını inhibe ettiği anlaşılmaktadır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlara göre; 2E4MT5C'in özellikle asit içeren çözeltilerle yapılan temizleme işlemlerinde, asit sirkülasyonunun olduğu boru sistemlerinde, etkin bir korozyon inhibitörü olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Salcı A., Yüksel H.&Solmaz R., (2022). Experimental studies on the corrosion inhibition performance of 2-(2-aminophenyl)benzimidazole for mild steel protection in 1 M HCl solution, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 134 104349.
- [2] Nayak P., Kumari P.P.&Rao S. A., (2022). Electrochemical approach to interfacial adsorption and inhibitory performance of (2E)-2- [(1H-Imidazole 2yl) methyldene] Hydrazine-1-carbothioamide for corrosion mitigation, *Chemical Data Collections*, 38.
- [3] Alamry K. A., Aslam R., Khan A., Hussein M. A.&Tashkandi N. Y., (2022). Evaluation of corrosion inhibition performance of thiazolidine-2,4-diones and its amino derivative: Gravimetric, electrochemical, spectroscopic, and surface morphological studies, *Process Safety and Environmental Protection*, 159 178-197.

- [4] Tiwari N., Mitra R. K.&Yadav M., (2021). Corrosion protection of petroleum oil well/tubing steel using thiadiazolines as efficient corrosion inhibitor: Experimental and theoretical investigation, *Surfaces and Interfaces*, 22 100770.
- [5] Oubaaqa M. *et al.*, (2021). Insight into the corrosion inhibition of new amino-acids as efficient inhibitors for mild steel in HCl solution: Experimental studies and theoretical calculations, *Journal of Molecular Liquids*, 334.
- [6] Dil G., Göksenli A., Yüksel B.&Muhaffel F., (2020). Isıl İşlemin Akımsız Ni-B/Ni-B-W Dupleks Kaplamanın Korozyon Direncine Etkisinin Analiz Edilmesi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (2).
- [7] Gong W., Yin X., Liu Y., Chen Y.&Yang W., (2019). 2-Amino-4-(4-methoxyphenyl)-thiazole as a novel corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium, *Progress in Organic Coatings*, 126 150-161.
- [8] Gong W., Xu B., Yin X., Liu Y., Chen Y.&Yang W., (2019). Halogen-substituted thiazole derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 0.5 M sulfuric acid at high temperature, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 97 466-479.
- [9] Zhang J. *et al.*, (2021). Combining experiment and theory researches to insight into anti-corrosion nature of a novel thiazole derivatives, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 122 190-200.
- [10] Hou Y., Zhu L., He K., Yang Z., Ma S.&Lei J., (2022). Synthesis of three imidazole derivatives and corrosion inhibition performance for copper, *Journal of Molecular Liquids*, 348.
- [11] El Ibrahimy B., Baddouh A., Oukhrib R., El Issami S., Hafidi Z.&Bazzi L., (2021). Electrochemical and in silico investigations into the corrosion inhibition of cyclic amino acids on tin metal in the saline environment, *Surfaces and Interfaces*, 23.
- [12] Pal S., Ji G., Lgaz H., Chung I.-M.&Prakash R., (2020). Lemon seeds as green coating material for mitigation of mild steel corrosion in acid media: Molecular dynamics simulations, quantum chemical calculations and electrochemical studies, *Journal of Molecular Liquids*, 316.
- [13] Machado Fernandes C. *et al.*, (2020). Use of a theoretical prediction method and quantum chemical calculations for the design, synthesis and experimental evaluation of three green corrosion inhibitors for mild steel, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 599.
- [14] Farahati R., Ghaffarnejad A., Mousavi-Khoshdel S. M., Rezaia J., Behzadi H.&Shockravi A., (2019). Synthesis and potential applications of some thiazoles as corrosion inhibitor of copper in 1 M HCl: Experimental and theoretical studies, *Progress in Organic Coatings*, 132 417-428.
- [15] Bhaskaran, Pancharatna P. D., Lata S.&Singh G., (2019). Imidazolium based ionic liquid as an efficient and green corrosion constraint for mild steel at acidic pH levels, *Journal of Molecular Liquids*, 278 467-476.
- [16] Ongun Yüce A., Doğru Mert B., Kardaş G.&Yazıcı B., (2014). Electrochemical and quantum chemical studies of 2-amino-4-methyl-thiazole as corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution, *Corrosion Science*, 83 310-316.
- [17] Thakur A.&Kumar A., (2020). A Review On Thiazole Derivatives As Corrosion Inhibitors For Metals And Their Alloys, *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 07 (07), 3702-3712.
- [18] Sigma Aldrich. (2020). Safety Data Sheet. <https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/sds/aldrich/cbr00267>.
- [19] Manivel A., Ramkumar S., Wu J. J., Asiri A. M.&Anandan S., (2014). Exploration of (S)-4,5,6,7-tetrahydrobenzo[d]thiazole-2,6-diamine as feasible corrosion inhibitor for mild steel in acidic media, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (1), 463-470.
- [20] Abd El-Lateef H. M., Sayed A. R.&Shalabi K., (2022). Studying the effect of two isomer forms thiazole and thiadiazine on the inhibition of acidic chloride-induced steel corrosion: Empirical and Computer simulation explorations, *Journal of Molecular Liquids*, 356.
- [21] Soltani N., Tavakkoli N., Khayat Kashani M., Mosavizadeh A., Oguzie E. E.&Jalali M. R., (2014). Silybum marianum extract as a natural source inhibitor for 304 stainless steel corrosion in 1.0 M HCl, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (5), 3217-3227.
- [22] Fattah-alhosseini A.&Noori M., (2016). Corrosion inhibition of SAE 1018 carbon steel in H₂S and HCl solutions by lemon verbena leaves extract, *Measurement*, 94 787-793.
- [23] Bagga M. K., Gadi R., Yadav O. S., Kumar R., Chopra R.&Singh G., (2016). Investigation of phytochemical components and corrosion inhibition property of Ficus racemosa stem extract on mild steel in H₂SO₄ medium, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4 (4), 4699-4707.
- [24] Fouda A. S., Al-bonayan A. M., Eissa M., Eid D. M., (2022). Electrochemical and quantum chemical studies on the corrosion inhibition of 1037 carbon steel by different types of surfactants, *RSC Advances*, 12, 3253-3273.

- [25] Nazari M. H., Shihab M. S., Havens E. A., Shi X., (2020). Mechanism of corrosion protection in chloride solution by an apple-based green inhibitor: experimental and theoretical studies, *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1 (7), 1-19.
- [26] El aoufir Y. *et al.*, (2020). Evaluation of inhibitive and adsorption behavior of thiazole-4-carboxylates on mild steel corrosion in HCl, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 606-618.
- [27] Özkır D.&Kayakırılmaz K., (2020). The Inhibitor Effect of (E)-5-[(4-(benzyl(methyl)amino)phenyl)diazenyl]-1,4-dimethyl-1H-1,2,4-triazol-4-ium zinc(II) Chloride, an Industrial Cationic Azo Dye, onto Reducing Acidic Corrosion Rate of Mild Steel, *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 11 (3), 257-272.
- [28] Berisha A., (2020). Experimental, Monte Carlo and Molecular Dynamic Study on Corrosion Inhibition of Mild Steel by Pyridine Derivatives in Aqueous Perchloric Acid, *Electrochem*, 1 (2), 188-199.
- [29] Berisha A., Podvorica F. I., Mehmeti V., Syla F.&Vataj D., (2015). Theoretical and Experimental Studies of The Corrosion Behavior of Some Thiazole Derivatives Toward Mild Steel in Sulfuric Acid Media, *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 34 (2), 1-8.
- [30] Hegazy M. A., Hegazy M. M., Awad M. K.&Shawky M., (2021). Chemical, electrochemical, theoretical (DFT & MEP), thermodynamics and surface morphology studies of carbon steel during gas and oil production using three novel di-cationic amphiphiles as corrosion inhibitors in acidic medium, *Journal of Molecular Liquids*, 337.
- [31] Sagdinc S. G., Zor S.&Yıldız E., (2018). Corrosion Inhibition on Stainless Steel of Benzamide and Thioacetamide and Quantum Chemical Studies on The Density Functional Theory *XVth International Corrosion Symposium*, 266-286.
- [32] Tüzün B.&Bhawsar J., (2021). Quantum chemical study of thiazole derivatives as corrosion inhibitors based on density functional theory, *Arabian Journal of Chemistry*, 14 (2).
- [33] Ansari K. R., Quraishi M. A.&Singh A., (2015). Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid by some pyridine derivatives: An experimental and quantum chemical study, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 25 89-98.
- [34] Doğru Mert B., (2017). Yumuşak Çeliğin Korozyon Davranışı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32 (2), 145-152.
- [35] Kosari A. *et al.*, (2014). Electrochemical and quantum chemical assessment of two organic compounds from pyridine derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution under stagnant condition and hydrodynamic flow, *Corrosion Science*, 78 138-150.

Derleme Makalesi - Review Article

Düzenli Depolama Alanlarından Sızıntı Suyunun Mikrodalga Işınlama ile Arıtılmasına Genel Bakış

Overview of Treatment of Leachate from Landfill Sites by Microwaveirradiation

Ali Alhrishawi^{1*}, Şükrü Aslan²

Geliş / Received: 07/01/2022

Revize / Revised: 15/06/2022

Kabul / Accepted: 01/08/2022

ÖZ

Artan kentleşme, yaşam standartlarının yükselmesi ve nüfus artışı, katı atık üretimini yükseltmektedir. Katı atıkların kaynağında etkin bir şekilde ayrıştırılması, organik atıkların düşük maliyet ve işletme kolaylığı ile düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesini cazip kılmaktadır. Ancak, düzenli depolama sahalarından kaynaklanan karmaşık yapılara ve yüksek konsantrasyonda kirleticilere sahip olan sızıntı suları, çevresel bir sorun teşkil etmektedir. Sızıntı suyu biyolojik ve fiziksel/kimyasal yöntemlerle arıtılabilir. Arıtma hedeflerine bağlı olarak, düzenli depolama sahalarında genellikle birleşik sistemler uygulanır. Mikrodalga (MD) radyasyon teknolojisi, hızlı ve seçici ısıtma kapasitesi, gelişmiş organik karbon mineralizasyonu/ayırışması/çözünürlüğü ve amonyak-azotu buharlaşması nedeniyle atıksu ve sızıntı suyunun arıtılmasında son yıllarda yaygın olarak çalışılmaktadır. Sıcaklık yükselme hızı, hedef sıcaklık, uygulama süresi, MW gücü çöp sızıntı suyunun ayrışmasını etkiler. Çalışmalar, MW radyasyonunun diğer yöntemlerle kombinasyonunun, sızıntı suyundaki organik maddenin ayrışmasını arttırdığını göstermiştir. İleri Oksidasyon Süreçlerinde (İOPS) güçlü serbest radikal oluşumu, sızıntı suyundaki organik maddelerin etkin ve güçlü bir şekilde çözünmesini sağlamaktadır. Hibrit MD-PS (persülfat)süreci, sızıntı suyu hacmi ve kirletici uzaklaştırma oranı dikkate alındığında, depolama sahası sızıntı suyunun arıtılması için uygulanabilir bir yöntem olarak görülmektedir. Bu derleme çalışmasında, düzenli depolama sahasında oluşan sızıntı suyunun arıtımında uygulanan MD süreci güç tüketimi, verimlilik ve işletme maliyeti açısından incelenmiştir. Ayrıca sızıntı suyu arıtımında daha etkin ve verimli kombine MD/İOS süreçleri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Dezentegrasyon, Hibrit MD/İOS süreci, MD radyasyonu, Sızıntı suyu arıtımı*

ABSTRACT

Increasing urbanization, rising living standards, and population growth are increasing the rate of solid waste production. An effectively source separation of solid wastes makes attractive to dispose of organic wastes in a landfill area with a low cost and ease of operation. However, the leachates, which have complex structures and high concentration of pollutants, originating from landfill sites poses an environmental problem. The leachate could be treated by biological and physical/chemical methods. Depending on the treatment goals, integrated systems are often applied in the sanitary landfill sites. Microwave (MW) radiation technology is widely studied in the treatment of wastewater and leachate in recent years due to its rapid and selective heating capacity, enhanced organic carbon mineralization/decomposition/solubility and ammonia-nitrogen evaporation. The rate

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: alihussin2294@uomisan.edu.iq (<https://orcid.org/0000-0003-4099-9042>)

Department of Civil Engineering, College of Engineering, Misan University, Iraq

²İletişim: saslan@cumhuriyet.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8735-8029>)

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

of temperature rise, target temperature, application time, and power of MW affects the decomposition of landfill leachate. Studies indicated that the combination of MW radiation with other methods enhanced the decomposition of organic matter in the leachate. Formation of strong free radical in the Advanced Oxidation Processes (AOPs) process ensures effective and powerful dissolution of organic substances in the leachate. The hybrid MW-PS (persulphate) process is seen as an applicable method for the treatment of landfill leachate, considering the leachate volume and pollutant removal rate. In this review study, the MW process applied in the treatment of leachate generated in the landfill area was examined in terms of power consumption, efficiency, and operating cost. In addition, more effective and efficient combined MW/AOPs processes in the leachate treatment were also evaluated.

Keywords- *Disintegration, Hybrid MW/AOP processes MW radiation, Landfill leachate treatment*

I. GİRİŞ

Gereksiz veya istenmeyen yan ürünler ve atık oluşumu, çoğu üretim işleminin kaçınılmaz bir sonucudur. Küresel ölçekte yılda $7-9 \times 10^9$ ton atık üretilmektedir. Belediye katı atıkları, evlerden kaynaklanan belirli bir atık kategorisidir ve raporlama standardına bağlı olarak ticari ve endüstriyel atıklar içerebilir [1]. Dünya Bankası istatistiklerinde, yıllık kentsel katı atık üretiminin yaklaşık 2×10^9 ton olduğu ve 2050 yılına kadar her yıl artarak $3,4 \times 10^9$ tona yükseleceği öngörülmektedir [2]. Farklı kirleticiler içeren katı atıklar, ekolojik çevre için tehdit oluşturduğundan bertarafı yasal olarak düzenlenmektedir. Oluşan katı atıkların ilk aşamada kaynağa azaltılması, bileşenlerine ayrılması, geri kazanılması ve uygun yöntemler ile bertarafı, en ekonomik ve çevresel açıdan en az zararlı yaklaşım olarak kabul edilmektedir.

Evsel nitelikli katı atık (EKA) bertaraf yöntemleri (depolama, yakma, kompostlama vd.) arasında düzenli depolama ve yakma en yaygın olanlarıdır [3]. EKA'nın bertarafında yakma, genellikle gelişmiş ülkelerde veya bölgelerde uygulanmaktadır. Yakma, işlenmiş EKA miktarını önemli ölçüde azaltmasına rağmen, daha iyi yakma performansı için EKA'nın ayrılması ve yakma sonucu açığa çıkan gazın atmosfere salınmadan önce arıtılması gerekmektedir. Ayrıca, EKA'nın yakma işleminden önceki depolama periyodunda oluşan sızıntı suyu, yönetim stratejisinin maliyetini daha da artırmaktadır [4]. Gelişmekte olan ülkelerde, yakma işlemi, politik, ekonomik kalkınma, eğitim, vatandaş bilinci ve muhalefeti nedeni ile ancak yüksek maliyet ve yerleşime yakın bölgelerde olmamak üzere sınırlı olduğundan, düzenli depolama, dünyanın birçok yerinde EKA bertarafı için daha rasyonel bir yaklaşımdır [4]. Mevcut EKA bertaraf seçenekleri arasında, işletme kolaylığı, daha düşük bakım gideri ve vasıfsız işgücü gerektirmesi nedeniyle genellikle düzenli depolama, gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerde tercih edilmektedir [3, 5].

Kentsel katı atık düzenli depolama sahaları genellikle evsel, tehlikeli atık sınıfına girmeyen endüstriyel ve ticari katı atıklar ile tehlikeli olmayan çamurlar için kullanılmaktadır [6]. Çevre üzerindeki potansiyel zararlı etkilerine rağmen düzenli depolama, atık yönetimi planlarında da kullanılmaktadır [7]. Büyük şehirlerin ve endüstriyel bölgelerin çoğunda EKA ve tehlikeli katı atık miktarında artış görüldüğünden, düzenli depolama alanlarında oluşan sızıntı sularının çevre açısından sorun olmasını engellemek için arıtımı ve kontrolü kritik olarak değerlendirilmektedir [8-11].

Geleneksel bir anaerobik çöp depolama alanında, yeterli önlemler ile sızıntı suyunun yeraltı suyuna geçişini ve depolama sahasına dışarıdan su girmesini önlemek için tedbirler alınmaktadır [12]. Sürekli azalan su içeriği, deponi sahasında mikrobiyal aktiviteyi önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Anaerobik çöp deponi alanında EKA'nın 8-10 yıl stabilizasyon süresinde yüksek hacimde sızıntı suyu üretilmektedir [4].

Çöp deponi alanının işletim süresine göre sızıntı suyu niteliği farklılık göstermektedir. Düzenli çöp deponi alanlarında oluşan yüksek organik madde içeriğine sahip sızıntı sularının anaerobik çürütülmesi ile biyogaz elde edilmektedir. Biyogaz hacminin yükseltilmesi ve kirletici derişiminin arttırılması için oluşan sızıntı suyu, çöp deponi sahalarında geri devredilmektedir. Sızıntı suyu içeriğinde biyolojik parçalanabilir organik madde derişiminin geri devir ile arttırılması, anaerobik çürütmede oluşan biyogaz hacminin yükselmesini sağlamaktadır.

Atıkların, yenilenebilir enerji kaynakları olarak değerlendirilmesi günümüzde ekonomik açıdan oldukça önemli görülmektedir. Türkiye'de yenilenebilir enerji ve atıklardan (Jeotermal, rüzgar, katı biyokütle, güneş,

biyogaz ve atık kaynakları) elektrik enerjisi üretim oranı yıllara göre artış göstermektedir ve 2019 yılında %14,7 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır [13].

Türkiye’de 2016 yılına kadar mevcut 25 adet (İstanbul’da 3, Ankara’da 2, Adana, Bursa, Kayseri, Konya, Gaziantep, Kocaeli, Elazığ, Hatay, Trabzon, Malatya, Antalya, Tokat, Aksaray, Uşak, Amasya, Bolu, Kırıkkale ve Denizli illerinde birer adet) çöp gazı tesisinin kurulu gücü 151,7 MW’dır ve bu değer ülkemiz kurulu gücünün % 0,2’i kadardır[14]. 2014 yılında hizmete giren Sivas çöp deponi alanında 350 ton/gün atık toplanmakta ve 2100 MW/ay elektrik üretimi yapılmaktadır [15]. Çanakkale çöp deponi alanı enerji üretim tesisi,yenilenebilir elektrik üretimi için 3,6 MW’lık üretim lisansı alınarak, ilk etapta 1,2 MW kurulu gücünde bir tesis kurularak bakanlık kabulü yapılmış ve işletmeye alınmıştır [16]. 2018 yılı itibari ile İzmir’de 3 adet, Konya’da 2 adet, İstanbul ve Van’da 1 adet olmak üzere sızıntı suyundan enerji üretim tesisi işletmeye alınmıştır.

Enerji üretiminin daha düşük maliyet ve uzun dönemde çevresel açıdan daha kabul edilebilir yöntemler ile gerçekleştirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu kapsamda, atık maddelerin hacminin azaltılması, enerji elde edilmesi ve sonuçta kalıntı atıkların daha ekonomik ve uygulanabilir yöntemler ile bertarafı, daha çevreci bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Günümüzün en önemli sorunlarından birisi enerji gereksiniminin karşılanmasında, yenilenebilir kaynakların kullanımı yaygınlaştırılmaya çalışılmakta ve yönetimler tarafından önemli destekler sağlanmaktadır.

Çöp sızıntı suları, yüksek organik madde içeriği ile önemli enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Ülkemizde de son yıllarda EKA’ların düzenli deponi alanlarında bertarafında anaerobik çürütme sonucu oluşan biyogaz toplanmakta ve enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Sızıntı sularının geri devri ile organik madde ayrışması ve oluşan biyogaz hacmi yükselmektedir. Sızıntı suyu niteliği, çöp deponi alanı işletimi süresince farklılık göstermekte, biyolojik parçalanabilir organik madde içeriği azalmakta ve sonuçta BOI₅/KOI oranı düşmektedir. Çöp deponi alanlarının işletim süresi arttıkça, daha kararlı organik madde içeriğine sahip sızıntı sularının artımı güçleşmektedir. Biyolojik zor parçalanabilir kararlı organik maddelerin artımında/ön parçalanmasında (dezintegrasyonunda) farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu derleme çalışmasında, çöp deponi sahalarında oluşan yüksek kirletici derişimine sahip sızıntı sularının dezintegrasyonunda, mikrodalg radyasyonu (MD) ve bileşik (hibrit) MD ile birlikte uygulanabilecek ileri oksidasyon süreçlerinin (İOS) etkinliği, işletim koşulları ve uygulanabilirliği araştırılmıştır.

A. Farklı Ülkelerde Üretilen EKA Miktarı ve Uygulanan Bertaraf Yöntemleri

2016 yılında üretilen toplam atığın 2×10^9 tonunu EKA oluşturmaktadır [1,2]. Son 1 yılda dünya nüfusu, $2,9 \times 10^9$ ’dan 3×10^9 artış göstermesine rağmen EKA üretimi, $0,68 \times 10^9$ ton’dan $1,3 \times 10^9$ tona, kişi başına üretim ise 0,64 kg/gün’den 1,2 kg/gün’e artarak 10 yılda yaklaşık olarak iki katına yükselmiştir [17]. Yaklaşık 4,3 milyar kent nüfusunun, 2025 yılına kadar 1,42 kg/kişi/gün EKA üreteceği tahmin edilmektedir [18]. Yaşam kalitesine ve alışkanlıklarına göre ülkelerde kişi başı katı atık üretimi farklılık göstermektedir.

Küresel olarak, belediye katı atıklarının yaklaşık %71’i düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmektedir[19]. Ortalama olarak Avrupa’da 2012 yılında 486 kg/kişi/yıl katı atık üretildiği ve atıkların yüksek oranda düzenli depolama alanlarında bertaraf edildiği belirlenmiştir [20]. Avrupa Birliği (AB), 2015 döngüsel ekonomik eylem planında, 2025 yılına kadar belediye atıklarının %55’inin, 2030’a kadar %60’ının ve 2035 yılına kadar ise %65’inin geri dönüştürülerek yeniden kullanıma hazırlanması ön görülmektedir [21]. Dünyada atık üretiminin 2050 yılına kadar 27 milyar ton olması beklenmekte ve Asya ülkelerinden Çin (0-0,49 kg/kişi/gün) ve Hindistan (0,50-0,9 kg/kişi/gün) küresel ölçekte toplam atığın üçte birini üretmektedir [2,22]. Hindistan’ın 10 büyük şehrinde yapılan çalışmada katı üretiminin 0,37-0,62 kg/gün.kişi aralığında değiştiği belirlenirken 25.351 ton/gün katı atık üretilmektedir [18]. Katı atığın % 91,4’ü düzenli depolama alanlarında toplanırken, geri kalanın % 8,6’sı yakılmakta (yüzde 6,4) veya kompostlaştırılmaktadır (% 2,2) [23]. ABD’de %52,6 EKA [24] ve Suudi Arabistan Krallığı’nda evsel ve endüstriyel atıkların yaklaşık %85’i, düzenli depolama ile bertaraf edilmektedir [25].

2012 yılında, Avrupa’da kişi başına EKA üretimi en yüksek İsviçre’de ve en düşük Romanya’da olmak üzere toplam 246 milyon ton EKA (487 kg/kişi. yıl) üretilmiştir [26]. Üye ülkelerde atık kabul uygulamalarının geliştirilmesi ile birçok Avrupa ülkesinde (İrlanda, Çekya, Slovenya, Norveç, Birleşik Krallık, Danimarka, İzlanda, Avusturya ve Finlandiya) atık hacminde önemli ölçüde düşüş sağlanmış ve ayrıca yasa dışı atık depolama sayısında da azalma olmuştur [27].

2012 yılında 28 AB üye ülkesinde, iyileştirilen tüm atıkların %34'ü çöp deponi sahasına gönderilirken, %42'si geri dönüştürmeye, %4'ü yakmaya ve %15'i kompostlaştırmaya veya anaerobik çürütmeye tabi tutulmuştur [26]. Deponi Alanı Direktifi 1999/31/EC [28]'ne göre üye devletlerin 16 Temmuz 2016'da çöp sahasına gönderilen biyolojik olarak parçalanabilen evsel atık (BPEA) miktarını, 1995'te üretilen toplam BPEA miktarının %35'i oranında azaltmasını gerekmektedir. 2015 yılına kadar Avusturya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Almanya, Macaristan, İrlanda, Lüksemburg, Hollanda, İspanya ve İsveç belirlenen hedeflere ulaşmıştır [29,30].

Türkiye'de yıllara göre toplanan atık miktarındaki artış değişkenlik göstermesine rağmen nüfus artışı, üretim çeşitlenmesi vd. etkenlere bağlı olarak atık miktarı sürekli yükselmektedir. 2016 yılında toplam belediye atık miktarı 31.584.000 ton iken 2018 yılında yaklaşık olarak %1,98 artış göstererek 32.209.000 tona ulaşmıştır. Toplanan çöplerin yaklaşık olarak %60'tan daha yüksek oranı, 2014 yılından itibaren düzenli çöp depolama alanlarına gönderilmektedir [31]. Türkiye'de toplam kapasitesi 1,2 milyar m³ olan 174 düzenli depolama tesisinde, 31,9 milyon tonu tehlikeli atık olmak üzere, 77,8 milyon ton atık bertaraf edilmiştir [31]. Tablo 1'de bazı ülkelerde EKA üretimi ve uygulanan bertaraf yöntemleri sunulmuştur.

Tablo 1. Bazı ülkelerde EKA üretimi ve uygulanan arıtma yöntemleri sunulmuştur.

Ülke/Bölge	Kg Çöp/Kişi/ gün	%Yakma	% Depolama	%*Kompost veya **çürütme	%Diğer	Not	Kaynak
Avrupa Birliği	1,35	27,8	24,1	45,5	2,6	Veriler farklı çalışmalardan alınarak ortalamaları hesaplanmıştır.	[20,19]
Hindistan	0,24 - 0,85	50				Teorik olarak, Hindistan'da belediye atıkların işleme yöntemleri, atığın kompostlanabilirlik özelliklerine göre genellikle %50 kompostlanabilir olarak kabul edilir.	[32,33]
Çin	0,5	45	52	3	--	Yaklaşık olarak %90 çöp, arazide tedbir alınmadan depolanmaktadır ve düzenli çöp deponi alanı sınırlı sayıdadır.	[21,34]
Güney Kore	0,94 – 1,05	24,9	13,5	-	61,6 geri dönüşüm	-	[35]
Japonya	0,98	79			21geri dönüşüm	Japonya'da üretilen toplam evsel katı atığın %94'ü, başta yakma ve geri dönüşüm olmak üzere bertaraf edilmektedir.	[36,37]
ABD	2,9	8	63	25	4	Kişi başı atık, üretilen toplam nüfusa oranı olarak hesaplanmıştır (387 milyon ton EKA/300 milyon kişi).	[38]
ABD	1,81	12,8	52,6	34,6	-	kg/kişi/gün	[24, 39-42]
Brezilya	1,062	-	40	-	-	2014 yılında Brezilya'da çöplükler, her belediye için nihai bertarafın %28'si olmak üzere; kontrollü depolama alanları %32 ve düzenli depolama alanları %40.	[42]
Latin Amerika ve Karayipler	0,99	<1	16,5	*52 ; **26	4,5	Uygulama ülkelere göre farklılıklar göstermekte ve yerleşim yerlerinde geri kazanım önem kazanmaktadır. Montevideo, Uruguay ve Bogota ve Medellin, Kolombiya, atıklarının yaklaşık %15'ini geri dönüştürmekte, Mexico City ve Rosario gibi şehirlerde, Arjantin'de atıkların %10'undan fazlası kompostlaştırılmaktadır.	[2,17]
Orta Doğu ve Kuzey Afrika	0,81	<1	23	*%52,7; **4	% 19,8	Ülkeler arasında önemli farklılıklar olmasına rağmen, çoğu ülkede kırsal alanlarda atıkların ortalama % 74'ü toplanmakta. Katar'da atıkların tamamı toplanırken, Tunus'da atıkların %5'i ve Mısır Arap Cumhuriyeti'nde ise % 15'i toplanmakta. Kırsal alanlarda atıklar depolanmakta (doğal çöküntülerde, eski taş ocaklarında, kanyonlar vd.) yasa dışı çok sayıda atık bertaraf alanı bulunmaktadır.	
Türkiye	1,13	-	69,4	0,38 kompost	13,2 geri kazanım 0,40 diğer	% 20,2 belediye çöplüğü; % 0,002 yüzeysel su kaynaklarına	[31]
Birleşik Arap Emirlikleri/Abu Dhabi	1,6	6	34	12	48		[43]

B. Çöp Deponi Alanı Sızıntı Suyu Özellikleri ve Miktarı

Düzenli çöp deponi alanlarında atıklar, günlük ara katman toprak örtüsü serilmek sureti ile kat kat dökülmektedir. EKA bileşimi, iklimsel özellikler, yağış, nihai üst örtü tabakasının geçirimsizlik derecesi, depo yaşı vb. faktörler, sızıntı suyu miktarını ve özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [44, 45]. Sızıntı suyu kalitesi, atıkların depolanması sonrası geçen süre ile önemli ölçüde değişmektedir. Atık içeriğindeki kirleticilerin miktarı sınırlıdır, bu nedenle yaklaşık 2-3 yıl işletim süresi ile sızıntı suyu içeriğinde en yüksek derişime ulaşır ve daha sonraki yıllarda kirlilik kademeli olarak azalır [46].

Atıklar depolandıktan hemen sonra mikrobiyal ayrışma ile açığa çıkan ısı, deponi alanında sıcaklığın hızla yükselmesini sağlamaktadır [5]. Atıkların deponi sahasına biriktirilmesi esnasında atmosfer ile teması sonucu organik maddelerin ayrışması, aerobik koşullarda başlamakta ve basit şekerler hızla parçalanırken, lignin ve tanin gibi doğal polimerlerin biyolojik ayrışması, daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu aşamada kimyasal ara ürünlerle birlikte içeriğinde büyük çoğunluğu CO₂, amonyak (NH₃) ve önemli miktarda su bulunan gaz karışımı, oluşmaktadır [47]. Her bakterinin optimum büyüme sıcaklığı vardır ve bu sıcaklıktan daha düşük/yüksek derecelerde, enzim engellenmesi veya hücre duvarı parçalanması nedeniyle bakteriyel büyüme sınırlanmaktadır. Ayrıca, Ca₃(PO₄)₂ ve NaCl gibi birçok tuzun çözünürlüğü sıcaklıkla artarken, sızıntı suyu içeriğindeki CaCO₃ ve CaSO₄ gibi bileşiklerin çözünürlüklerinde ise azalma görülür [5]. Depolama sahası yaşlandıkça, nispeten daha kısa bir başlangıç aerobik periyodundan, asidik ve ardından metanojenik olarak iki farklı alt faza sahip daha uzun süreli anaerobik bozunma periyoduna geçiş olur [48] ve biyolojik ayrışma sonucu organik karbon, CH₄ ve CO₂'e dönüştürülür [49]. Çöp sahasında, anaerobik çürüme ile organik madde, NH₃, inorganik tuz, klorlu bileşikler, toksik metaller vb. içeren atığın biyolojik parçalanması ile oldukça yüksek kirletici derişimine sahip sızıntı suyu (yağmur suyunun katı atıklardan sızması nedeniyle üretilen sulu atık) oluşur [50,51]. Atıkta yeterli nem içeriği, mikroorganizma ve bozunabilir madde bulunması, EKA'nın ayrışmasına neden olur ve gaz ve kötü koku üretir [49].

Sızıntı suyu oluşumu, yıllık yağış yüksekliğinin %20-50'si [52] aralığında olması beklenirken Akdeniz iklim kuşağında, sızıntı suyu için 0,15-0,20 m³/ton EKA değerleri verilmektedir. İstanbul ve Bursa katı atık düzenli depolama alanlarında üzeri kapatılmamış, aktif hücrelerden oluşan sızıntı suyu miktarı 10-12 m³/ha-gün, ABD New York eyaleti düzenli depolama sahalarda oluşan sızıntı suyu miktarı ise 20-30 m³/ha-gün olarak belirlenmiştir [45].

Klasik depolama alanlarındaki kapalı anaerobik ortamda, EKA'nın bozunma hızının düşük olması, stabilizasyon süresinin uzamasına neden olmaktadır. Sürenin kısaltılmasında deponi alanlarının biyoreaktör olarak işletilebilmesi için oluşan sızıntı suyunun geri devri ile bozunmayı hızlandırma önerilmektedir. Düzenli depolama sahalarda kullanılan en yaygın geri devir sistemleri; yüzey püskürtme, yatay hendekler ve dikey kuyu yöntemleridir [3].

Geri devir, sızıntı suyu yönetimi için ucuz bir seçenek olarak kabul edilir. Geri devir, stabilizasyona yol açan organik maddenin daha hızlı biyolojik bozunmasında ve biyogaz emisyon oranlarında yükselme sağlar, sızıntı suyu miktarını azaltır ve sızıntı suyundaki organik ve inorganik içeriği filtreler [53]. Sızıntı suyu geri devrinin kontrollü bir reaktör sisteminde nem içeriğini artırır, metanojenler ve katı/sıvılar arasında besin ve enzim dağılımı sağlar [54]. Yeniden devredilen sızıntı suyu hacmi, ilk atık yatak hacminin %30' u olduğunda, CH₄ üretiminde ve KOİ derişiminde önemli düşüş gözlenmektedir [55].

Sızıntı suyunun aşırı geri devri, doymunluk, göllenme ve asidik koşulların oluşması (metanojenik aktivite engellenebilir) gibi sorunların ortaya çıkmasına neden olabilir [56]. Depolanan çöpün nem içeriğindeki artış, substratların ve besinlerin yeniden dağılımını ve depolama alanındaki mikro ortamlar arasında mikroorganizmaların yayılmasını kolaylaştırarak anaerobik bozunma süreçlerini iyileştirir ve CH₄ üretim hızında artışa yol açar [57]. Özellikle büyük ölçekli depolama alanlarında, sızıntı suyu içeriğindeki organik madde yükseldiğinde, mikrobiyal parçalanma hızı artar ve sonuçta yüksek CH₄ hacmi ile enerji üretimi iyileşir, emisyon azalır ve geri kazanım sağlar. Sızıntı suyu geri devri ile atık yapısında CH₄ üretim hızı %15'ten %700'e çıkarılabilmektedir [58]. İstanbul Odayeri çöp deponi alanında yapılan çalışmada geri devir ile metanojenik aktivitedeki artış sonucu oluşan biyogaz CH₄ fraksiyonunda yaklaşık %10 artışa neden olduğu belirlenmiştir [59].

Sızıntı sularındaki organik maddenin büyük kısmını ağırlıklı olarak kolloidlerle ilişkili yüksek moleküler ağırlıklı hümitik benzeri bileşiklerden oluşur [60]. Yüksek miktarlarda biyolojik olarak bozunabilir, ancak aynı zamanda biyobozunmaya karşı dirençli organik maddeleri ve ayrıca nutrientleri, ağır metaller, klorlu

organik ve inorganik tuzları içerebilir [5, 61-64]. Sızıntı suyunda aromatik hidrokarbonlar, fenoller, klorlu alifatikler, böcek ilaçları ve plastitler gibi çeşitli moleküler toksik bileşikler bulunmaktadır [63, 65-66]. Ayrıca sızıntı suyu, uçucu yağ asidi (UYA) ve çöp sahasındaki organik maddenin anaerobik bozunmasının bir sonucu olarak üretilen UYA'nın diğer basit yan ürünlerini de içerebilir [49].

Sızıntı suyu özellikleri; biyolojik parçalanabilirlik ve toksisite, BOI, KOI, BOI/KOI oranı (biyoparçalanma indeksi), pH, askıda katı maddeler, uçucu katılar, azot ve metaller gibi en önemli kalite parametreleri ölçülerek belirlenebilir. Sızıntı suyu BOI/KOI oranı; kimyasal, biyolojik veya fiziksel arıtma yöntemi seçiminde önemli bir parametredir [67].

Sızıntı suyu özellikleri (pH, BOI, KOI ve BOI/KOI gibi) depolama sahası yaşlandıkça önemli ölçüde değişir [68,66]. Örneğin BOI ve KOI derişimleri, sızıntı suyundaki organik atıkların parçalanması nedeniyle depolama sahası yaşının artması ile azalmaktadır[69]. Genç deponi alanlarında KOI derişimi çok yüksektir ve BOI₅/KOI oranı kompleks organiklerin bozunması nedeniyle 0,5'ten büyüktür. Deponi sahası yaşı arttıkça, alanda anaerobik koşullar altında bakterilerin organik madde tüketimi nedeniyle BOI₅/KOI oranı 0,2'den daha düşüktür[46, 30]. Çoğu biyolojik olarak parçalanabilen organiklerin stabilite aşamasında bozunduğu düşünülürken, biyolojik olarak parçalanamayan veya zor parçalanabilen organiklerin sabit kaldığı düşünülerek, BOI/KOI oranı deponi işletim süresi ile zamanla azalır [70]. Özellikle genç çöp sızıntı sularında yüksek KOI derişimleri (>10.000 mg/L) ve yüksek BOI/KOI oranları (0,5-1) gözlenirken, yaşlı çöp deponi alanlarında 4000 mg/L'nin altında KOI derişimi ve 0,1'den düşük BOI/KOI oranları belirlenmiştir [66, 68]. Genel olarak, Brezilya'da sızıntı suları, yüksek organik madde derişimine sahip olarak tanımlanmasına rağmen bazı çöp deponi sahaslarında düşük BOI₅ derişimleri görülmektedir. Örneğin Muribeca çöp sahasında organik bileşiklerin yüksek oranda zor parçalanabilir bileşiklerden (örneğin humik ve fulvik asitler) oluştuğu belirlenmiştir. Metanojenik fazda olduğu tespit edilen yaşlı düzenli depolama sahaslarının BOI/KOI oranlarının < 0,1'den küçük olduğu (0,022) belirlenmiştir [63, 71-72]. Sızıntı suyu pH'ı, deponi yaşı ile birlikte yükselir ve ağır metal derişimleri, sızıntı suyunun artan pH'ı nedeniyle zamanla artan bir katılma hızına işaret eder [73,74].

NH₄-N derişimi, incelenen düzenli depolama sahaslarında 800-5.210 mg/L aralığında gözlenmiştir [71,72]. İrlanda'da, BOI₅, KOI, NH₄-N ve klorürün ortalama derişimlerinin, genç deponi alanı sızıntı suyunda eski depolama alanlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Genç, orta ve yaşlı çöp sahasları için ortalama KOI derişimi sırası ile 1.100 mg/L'den 693 mg/L'e ve 221 mg/L'e düşmekte ve benzer şekilde BOI₅ (110 mg/L'den 69 mg/L ve 14 mg/L'e) ve NH₄-N derişimlerinde (352 mg/L 'den 218 mg/L ve 98 mg/L) azalma olduğu görülmektedir [27]. İsveç, Göteborg bölgesinde üç belediye çöp sahasından gelen sızıntı sularında, 35 öncelikli kirlenici ve bir dizi düzenlenmemiş yapıda alkoller, eterler, ketonlar, kısa zincirli fenoller, benzensülfonamidler ve fosfat esterleri, çöplük sızıntılarının ortak bileşenlerini içeren 200'den fazla organik bileşik ve bileşik grubu olduğu belirlenmiştir [60]. Hindistan'da, özellikle Yeni Delhi'de, sızıntı sularının pH'ı 7,6 civarında olduğundan şehir çöplüklerinin çoğu, alkali olarak kabul edilir. Sızıntı sularında bulunan en yüksek metalik derişim, demir 12 ppm'ken, BOI₅ ve KOI değerleri sırasıyla 1.500 mg/L ve 10.400 mg/L olarak ölçülmüştür [75]. İran'da, özellikle Hemedan şehrinde, aktif ve kapalı saha sızıntı sularındaki ortalama BOI₅ seviyeleri sırasıyla 8.634 ve 9.217 mg/L, KOI ise sırasıyla 11.774 ve 11.920 mg/L olarak bulunmuştur. Kapalı saha sızıntı suyu KOI derişiminin yüksek olması, katı atıkların ayrışmasını yavaşlatan eski atık sıkıştırma ve konsolidasyon ile ilişkilendirilmiştir. Yüksek BOI₅ değeri, her iki alanda da stabilizasyon sürecinin çok yavaş bir bozunma oranı ile erken aşamalarında olduğunu göstermektedir [76]. Mısır, İskenderiye düzenli depolama alanında sızıntı suyu BOI₅ derişimi,9.620-11.700 mg/L ve KOI 12.850-16.350 mg/L olarak ölçülürken,0,69 BOI₅/KOI oranı, sızıntı suyunun anaerobik çürütme için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir [77]. Polonya'da sızıntı suyundaki ana kirleniciler; organik madde ve NH₃ olarak açıklanırken artan deponi alanı yaşı ile sızıntı suyundaki KOI derişimi 1.800 mg/L'den 610 mg /L'ye azalırken, BOI₅/KOI oranı 0,4'den daha düşük ve NH₄-N derişimi 98 mg/L'den 364 mg/L'ye artış gösterdiği belirlenmiştir [78].

Depolama sahasının yaşı, kirlenicilerin yapısı ve birikimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmasına rağmen [66,79] sızıntı suyunun bileşimindeki farklılıklar sadece depolama sahası yaşına değil, aynı zamanda atık stabilizasyon derecesine ve deponi sahasına sızan su hacmine de bağlıdır. Sızıntı suyundaki kirlenici yükü genellikle depolama sahasının ilk işletme yıllarında (2-3 yıl) maksimum değerlere ulaşır ve sonraki yıllarda giderek azalır [80,81]. Sızıntı suyunun geri devri, nispeten düşük derişimlerde bozunabilir karbon bileşikleri, ancak yüksek derişimlerde NH₃ [82] içeren stabilize sızıntı suları üretmektedir ve bu nedenle KOI ve BOI giderilmesine rağmen NH₃-N derişimi yükselmektedir [55].

Sızıntı suyu özelliklerinin deponi alanı işletim süresine göre değişimi Tablo 2'de gösterilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi yaşlı düzenli deponi alanlarında oluşan sızıntı suyu düşük BOİ/KOI oranları ile biyolojik zor parçalanabilir organik madde içeriğine sahiptir [83,84]. Sızıntı suyu pH ve inorganik madde içeriğinde de artış görülmektedir [85,86]. Büyük miktarlarda bozunabilir organik madde içeren genç çöp deponi alanlarında, ana fermentasyon ürünleri olarak UYA üreten hızlı anaerobik fermentasyon meydana gelir. Asidik fermentasyon, katı atığın yüksek nem veya su içeriği ile geliştirilmiştir. Organik içeriğin %95'ine kadar önemli miktarı, serbest UYA'nın salınması, depolama sahasının erken ilk dönemleri olarak bilinen asidik fazda gerçekleşir [5]. Asitler, alkoller, aldehitler, UYA, hümkik asitler ve fulvik asitler, çözünmüş organik madde içeriğinde belirlenen bileşikler arasındadır. UYA bileşikleri; asetik asit, propiyonik asit, n-butirik asit, izobütirik asit, en-valerik asit, izovalerik asit, n-kaproik asit vb. sızıntı suyu içeriğinde yer almaktadır [87]. Bu bileşikler, biyolojik olarak kolayca parçalanabilir ve organik maddenin yüksek oranını (%95) oluşturur [5]. Fermentasyonun asit fazının bir sonucu olarak, daha genç depolama alanlarında oluşan sızıntı suyu, tipik olarak önemli miktarlarda uçucu asitlerin varlığı ile karakterize edilir. Hümkik ve fulvik benzeri fraksiyonlar, olgun depolama alanlarından sızıntı suyundaki organiklerin büyük bir yüzdesini oluşturur [78]. Sistemdeki yüksek UYA derişimlerinin hidroliz sürecini engellediği gözlemlenmiştir ve süreç pH'ı uygun olduğunda dahi UYA birikimi, katı organik substratın daha yavaş hidroliz hızına yol açabilir [88]. Sonuç olarak, anarobik çürütme öncesinde sızıntı suyunda UYA'nın giderilmesi için etkili bir ön arıtma tekniğinin geliştirilmesine gereksinim duyulmaktadır [89].

II. SIZINTI SUYU ARITIMI

Tablo 2'den görüldüğü gibi sızıntı suyunun bileşimi son derece değişken ve heterojendir [103, 5] ve yasal bertaraf gerekliliklerini karşılamak için içeriğindeki oldukça karmaşık organik bileşenlerin parçalanmasında tek bir yöntem yetersizdir [49]. Sızıntı sularının arıtımında, biyolojik reaktör öncesi atıksu içeriğindeki engelleyici bileşik derişimlerinin azaltılması gerekmektedir. Deponi sahası yaşı arttıkça sızıntı suyundaki organik madde derişimi azalır ve NH₃-N derişimi artar [104]. Eski sahalardan gelen çöp sızıntı suları, genellikle biyolojik olarak parçalanabilen atık substratların azot içeren fraksiyonlarının hidrolizi ve fermentasyonundan kaynaklanan NH₃ ile yüksek oranda kirlenmiştir [82]. En kararlı (olgun) sızıntı suyu, yüksek NH₃-N (400-5.000 mg/L), KOİ (5.000-20.000 mg/L) derişimine sahip olmasına rağmen BOİ/KOİ < 0,1 oranı daha düşük [5, 105] olduğundan geliştirilmiş sızıntı suyu yönetimi için birleşik süreçler kullanılmaktadır. Depolama sahasının yaşı ile organik madde bileşimi arasındaki mevcut ilişki, uygun bir arıtma süreci seçmek için faydalı bir kriter sağlayabilir. Sızıntı suyu arıtımında en önemli parametreler organik madde ve azot içeriği, deponi sahasının yaşı ile doğrudan ilişkilidir.

Genç sızıntı suyu arıtımında biyolojik yöntemler, KOİ, NH₄⁺-N ve ağır metallerin gideriminde kabul edilebilir seviyede etkindir. Stabilize (daha az biyolojik olarak parçalanabilen) sızıntı suyu arıtımında ise refrakter organik maddelerin gideriminde, fiziko-kimyasal yöntemler, biyolojik arıtma öncesi etkili bir arıtma adımı olarak görülmektedir. Entegre kimyasal-fiziksel-biyolojik süreçler (herhangi bir sırada), yöntemlerin tekil olarak uygulanması ile olabilecek sınırlamaları iyileştirmesi sonucu, bileşik arıtmanın daha yüksek veriminde gerçekleşmesini sağlamaktadır [5]. Ancak, farklı yöntemler ile arıtılabilmesine rağmen, yüksek inşaat ve işletme maliyetleri, geniş alan gereksinimi ve yüksek enerji tüketimi, sızıntı suyu arıtımında en önemli sorun olarak görülmektedir. Mevcut sınırlamalar, sızıntı suyunun arıtılmasını dünya çapında çözümü zor bir sorun haline getirmektedir [69, 96]. Sızıntı suyu özellikleri, alıcı ortam deşarj seçenekleri, uygulanabilir teknolojiler, maliyet, arıtma tesislerinin seçimini ve inşasını etkileyen önemli husus olduğundan arıtma yöntemini belirlemede oldukça karmaşık faktörlerin göz önünde tutulması gerekmektedir [51].

Biyolojik arıtım verimini yükseltmek için biyokütle aktivitesini düşüren sızıntı suyu içeriğindeki kirleticilerin uzaklaştırılmasında koagülasyon-flokülasyon, adsorpsiyon gibi klasik yöntemler tercih edilmektedir. Biyolojik yöntemler ile parçalanabilir organik maddelerin giderimi sağlanırken [106, 107], adsorpsiyon [91] ile iz derişimde biyolojik parçalanamayan kirleticilerin giderimine çalışılmaktadır. Adsorbent dozu derişimi, MD uygulama süresi ve gücü, kirleticiler (KOİ, NH₃-N, bulanıklık, askıda katı vd.) gideriminde etkin parametrelerdir [25, 108-111]. Yüksek pH (11,0) ve uzun havalandırma süresi sonunda (18 saat) sızıntı suyunda NH₃ derişimi önemli seviyelerde azaltılabilmektedir [82]. Koagülasyon-flokülasyon gibi yöntemler, biyolojik arıtım ünitesine gelen kirlilik yükünün azaltılması, arıtmayı engelleyen toksik bileşiklerin uzaklaştırılması ve membran reaktörlerin daha etkin olmasını sağlamak amacı ile uygulanmaktadır [94, 112].

Uygulanan koagülasyon ve flokülasyon yöntemi ile biyolojik reaksiyonu engelleyen, ağır metaller, fenoller vd. gibi toksik kirleticiler kimyasal çamur yapısında tutulurken aynı zamanda organik madde, NH₄ ve

fosfor gibi nutrientlerde uzaklaştırılmaktadır. Alüm ve kireç ile koagülasyon ve flokülasyon süreçleri etkin bir ön arıtma sağlamaktadır [113]. Koagülasyonda, pH ayarlaması yapılmadan stabilize sızıntı suyu için demir klorür ile %59, alüm kullanılarak %75 KOİ giderme verimine ulaşılrken, taze sızıntı suyu için KOİ giderme verimi alüm ile %55 ve ferrik klorür için %35 olarak tespit edilmiştir. 210 dak. karıştırma süresinde, optimum 6 g/L alüm dozu ile ön arıtılan olgun sızıntı suyu için uçucu kül adsorpsiyonu sonucu KOİ giderme verimi %28, toplam KOİ giderme verimi ise %82 olarak belirlenmiştir [114]. 3 g/L derişiminde alüminyum koagülasyonu ile optimal KOİ giderimine ulaşılmıştır [48]. Kısmen stabilize edilmiş sızıntı suyu için %75'in üzerinde KOİ giderme verimine ulaşılmaktadır. Sızıntı suyu pH'ı 10,0 için ise 2 g/L demir dozunda yaklaşık %80 KOİ giderimi tespit edilmiştir [48]. Demir tuzlarının, alüminyum tuzlarından KOİ gideriminde daha etkin olduğu görülmektedir (%56'ya kadar) [115]. pH 6,0 ve 1,2 g/L FeCl₃ dozunda KOİ giderimi yaklaşık %64'e ulaşmaktadır[99]. 52,5g Ca(OH)₂/L kireç dozunda düşük çamur hacmi (%30) oluşurken KOİ'nin %66,3'ü, bulanıklığın %98'i ve rengin %80'inin giderimi sağlanmıştır. 12 g/L FeCl₃ dozunda %62,5 KOİ, %92,5 bulanıklık ve %82 renk giderme verimine ulaşılrken çamur hacmi %21 daha düşük elde edilmiştir. Alüm, renk, bulanıklık ve KOİ giderimindeki etkinliği çok düşük olmasına rağmen Ni, Pb ve Cr gideriminde sırasıyla %95, %94 ve %93 verimle çok uygun görünmektedir [116]. pH 6,0 ve 10 g/L dozunda, pıhtılaştırıcı polialüminyum klorür (PACl) %59 KOİ ve %57 TOK, pH 8,0 ve 7 g/L FeCl₃ dozunda ise %53 KOİ ve %52 TOK giderimine ulaşılmıştır [100]. 2 g/L alüm dozunda %68 AKM, %78 renk, %33 KOİ ve %14 NH₄-N giderme verimine ulaşılrken, aynı FeCl₃ dozunda giderme verimi %92 AKM, %82 renk, % 28 KOİ ve % 26 NH₄-N olarak belirlenmiştir [117].

NH₃ sıyırma/flokülasyon/membran biyoreaktör/ters osmoz (TO) birleşik sisteminin farklı kombinasyonlarında giriş KOİ derişimi 8.500-19.200 mg/L aralığında değişen sızıntı suyunun arıtılması ile çıkış suyunda 4 mg KOİ/L'den daha düşük seviyelere ulaşılabilceği belirlenmiştir [118].

Özellikle yaşlı çöp deponi sahalarında oluşan sızıntı suyundaki biyolojik parçalanamayan organik maddelerin gideriminde etkin TO ünitesi öncesi koagülasyon-flokülasyon yöntemi uygulanmaktadır [94, 112]. Modifiye edilmiş aktif karbon adsorpsiyonu ile sızıntı suyundan yaklaşık %99 NH₃ ve %86 Zn giderimi sağlanmıştır [119].

İyi bilinen fiziko-kimyasal yöntemler ve biyolojik arıtma, ikincil kirlilik, düşük kirlenici giderme verimi ve/veya daha uzun reaksiyon süresi gibi olumsuzluklara sahiptir. Son yıllarda seçici olmayan ve güçlü oksitleyici türlerle dayanan ileri oksidasyon süreçleri (İOS) ile arıtımı güç, sızıntı sularının kirlenici giderme verimini iyileştirmek için çalışmalar yapılmaktadır [120].

MDradyasyon teknolojisi, geleneksel ısıtma yöntemlerinden daha hızlı reaksiyon süresine ve daha düşük güç gereksinimine sahip olduğu için son yıllarda sızıntı suyu arıtımında İOS ile birlikte kullanılmaktadır [121,122]. Temassız ısıtma, seçici malzeme ısıtma ve içten dışa ısıtma, geleneksel termal yöntemlere göre MD ısıtmanın faydaları olarak tanımlanmaktadır [123]. Malzemelerin dielektrik özellikleri, MD enerjisinin ve çözelti pH'ının verimi etkilediği bildirilmektedir. Su, MD enerjisini kolayca absorbe etmek için yüksek bir dielektrik sabitine ($\epsilon=80,4$) sahip olduğundan, MD enerjisi ile iyi ısıtılabilir [121, 124]

Tablo 2. Deponi işletim süresine göre sızıntı suyu özelliklerinin değişimi

Deponi alanı yaşı	pH	BOI/KOI	TKN- TN(mg/L)	TÇK mg/L	NTU	Renk/PtCo	NH ₃ -N veya NH ₄ -N (mg/L)	Ağır metal mg/L	Kaynaklar
-	7,9	0,2	TKN:12	9.600	340	7.600	NH ₃ -N= 1250*,1750**	-	[48]
22	7,7	0,033	-	-	-	-	NH ₄ -N =3,5	Fe:30; Mg:3.000;Ni:3,70;	[90]
>4	7,1	0,6	-	-	-	-	NH ₄ -N = 1.140	Fe: 23,2; Cu:10,4; Zn:59,4; Pb:3,1	[91]
-	6,7	0,75	-	-	-	-	NH ₄ -N = 2.760	-	[86]
-		0,09 ^a -0,205 ^b	-	-	1,546 ^a ; 8,55 ^b	3,334-1,936	NH ₃ -N= 483-300	Fe: 7,9; Zn:0,6	[92]
-	6,7	0,16	-	-	-	1,152	NH ₄ -N = 1.780	Fe:10,3; Zn:1,066; Pb: 0,447	[93]
18	8,4	0,23	-	-	-	-	NH ₄ -N = 2.132	Cu: 0,15; Zn:0,42; Pb: <0,05	[94]
-	8,2	0,07	-	7,120	-	-	-	Fe:3,41; Zn:2,3; Pb:0,02; Ni:0,17	[95]
18	7,9	0,18	-	-	-	-	NH ₃ -N=1.750	-	[84]
-	8,3	0,04	-	-	-	-	NH ₃ -N=1.240	-	[96]
-	7,8	0,59	TKN:2.624	-	-	26.690	NH ₄ -N= 2.281	Fe:10,37; Zn:0,96; Pb:0,71;Cr:1,85; Ni:0,95	[46]
9-14	7,4	0,14	-	2,027	-	-	NH ₃ -N= 1.803	Fe:11,16; Zn:3; Pb:0,3; Ni:1,339; Cu:0,15	[83]
-	8,2	0,09	-	-	106,9	-	NH ₄ -N= 342	Fe:2,6; Zn:0,07	[97]
5	8,0	0,13	TKN:1.570	23,500	1,000	-	NH ₃ -N = 270 ^c ; 560 ^d	Zn:1,6; Pb:0,66; Cd: 0,3	[98]
-	8,1	0,11	TKN:5.236	-	-	-	NH ₃ -N= 3.156	Fe:21,5; Zn:1,5; Cd:1,7	[99]
-	8-8,5	0,10	-	3,400	177	koyu kahverengi	-	Fe: 1,6; Mg: 118,5; Cd: 0,09; Ag:0,346	[100]
> 10	7,38	0,35	TN:2.641	-	1,200	-	-	-	[101]
3	8,4	0,22	TKN: 385	13,000	-	-	NH ₄ -N= 175	Pb:0,078; Cd:0,085; As:0,08; Cr ⁺⁶ :0,025	[102]

TKN: Toplam Kjeldahl Azotu, TÇK: Toplam Çözülmüş Katı, NTU: Bulanıklık, *: Yaşlı düzenli deponi alanı **: Genç düzenli deponi alanı; a: Aerobik deponi alanı, b: Anaerobik deponi alanı; c: Kurak dönemlerde; d:Yağışlı dönemler

III. MD RADYASYONU

Son yıllarda, MD radyasyonu, geleneksel ısıtmaya göre daha verimli ısıtma sağladığından, atıksu arıtımında kullanılmaktadır. Geleneksel ısıtmada, enerji ortama/malzemeye öncelikle konveksiyon, iletim ve malzemenin yüzeyinden ısı yayımı gibi çeşitli olayların neden olduğu bir termal enerji gradyanı yoluyla aktarılır [125]. Bununla birlikte, MD ısıtması, dipol ve ara yüzey polarizasyonunun neden olduğu moleküler düzeydeki etkileşimlerden kaynaklanır [126]. MD radyasyonunda 12,24 cm dalga boyu ile en yaygın kullanılan frekans 2450 MHz' de [127] oluşan elektromanyetik alanda molekül, saniyede $2,45 \times 10^9$ kez yer değiştirerek yalıtım malzemesinin hızlı ve verimli bir şekilde ısıtılmasına olanak tanır [128]. MD'nın termal olmayan etkisi, polar moleküllerin enerjik hareketine yol açar ve moleküler uyarımın dönme enerjisi ile oksitleyiciler tarafından seçici olarak absorbe edilerek sıcak noktaların oluşumu sonucu, bağların kolayca kırılmasını sağlayan radikallerin üretiminin teşvik edilmesine neden olur [12, 130].

MD radyasyonu, kok fabrikası atıksuyundan $\text{NH}_3\text{-N}$ gidermek [131], remazolün neden olduğu atıksudaki altın sarısı pigmentini parçalamak [132] ve derişik atıksulardan Bor giderimi ve geri kazanımı için uygulanmıştır [133]. MD işletim süresi, sıcaklık ve karıştırma/karıştırma koşulları, sızıntı suyu dezentegrasyonunda önemli işletim faktörleridir [134, 135]. Sızıntı suyu tarafından absorplanan MD enerji miktarı, onu ısıtmak için kullanılan zaman ve güç miktarı ile orantılıdır. Kalorimetrik denklem, bu ilişkiyi Eşitlik 1 ile açıklamaktadır [136].

$$W_{\text{abs}} \times t = [B \times C_p \times \Delta T \times M] \quad (1)$$

Eşitlikte W_{abs} : Absorplanan MD gücü; t: radyasyon süresi; B = birim dönüştürme katsayısı; C_p : ısı kapasitesi; ΔT : akışkan için ortalama sıcaklık artışı ve M: sıvı kütlesi olarak tanımlanmaktadır.

Çamurun MD ile pirolizi, çamur depolama, ekili arazilere uygulanması ve yakma gibi mevcut arıtma tekniklerine göre önemli çevresel avantajlara sahip görünmektedir. Piroliz, ağır metalleri karbon içeren katı yapısında konsantre ettiğinden, çamur yapısından metallerin salınması, yakma sonucu elde edilen küllerde olduğu kadar önemli değildir [137, 138].

MD ile dezentegrasyonda, hedef sıcaklık, sıcaklık yükselme hızı, uygulama süresi vb. işletim koşulları atık içeriğindeki organik maddenin çözünürlüğünü etkilemektedir [139-141]. 160-180 °C gibi yüksek sıcaklıklar ve uzun uygulama süreleri (30-60 dak.), atık biyolojik çamurların parçalanmasında optimum işletim koşulları olarak belirtilmesine rağmen [142], yüksek sıcaklıklarda organik madde yapısının bozulması ile anaerobik çürütme sürecinde CH_4 gaz hacminde azalmaya neden olmaktadır. Öte yandan, yüksek sıcaklıkların (180°C) düşük moleküler ağırlıklı şekerlerin ve amino asitlerin polimerize olmasına ve Maillard reaksiyonları (karamelizasyon) yoluyla yeniden kalsitran polimer benzeri organik bileşikler oluşturmaya neden olması, MD sürecini takip eden anaerobik çürütme süreç performansını bozmaktadır [139, 141]. Çözünür KOİ'nin CO_2 'e dönüşümü meydana gelebileceğinden, 120°C' nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda çözünür KOİ'de bir azalma olasıdır [143].

Çöp deponi sahası sızıntı suyu için en uygun arıtma teknolojisinin seçimi, esas olarak sızıntı suyunun özelliklerine (KOİ, BOİ/KOİ, depolama yaşı vd.) bağlıdır. MD gücü 100 W'dan 300 W'a yükseltildiğinde, ham sızıntı suyunda BOİ₅/KOİ oranının 0,122'den 0,462'ye yükselmesi, sızıntı suyunun biyolojik arıtıma uygun olduğunu göstermektedir [144]. MD güç seviyesi [145] ve uygulama süresi arttıkça sızıntı suyu kirletici parçalanma ve BOİ/KOI oranının yükselmesini sağlamaktadır. MD gücü 200 W'dan 800 W'a yükseltildiğinde KOİ giderme verimindeki artış %72'ye ulaşmaktadır [146].

600 W güç ve 4 dak. MD uygulama süresinde, sızıntı suyundan KOİ giderimi % 20 daha yüksek elde edilmiştir [146]. TOK (toplam organik karbon) azalması, farklı MD güçleri (128 W, 325 W ve 550 W) için karşılaştırıldığında, çalışmada belirlenen en yüksek güç olan 550 W'da belirlenmiştir [147]. MD ışıması ile yaşlı depolama sahası sızıntı suyundan organik maddenin parçalanmasında 16 dak. radyasyon süresi ve 450 W güç uygulandığında KOİ, renk ve UV giderimi sırasıyla %10, %12 ve %13,5 olarak belirlenmiştir [1]. Eşit süre ve sıcaklık için MD ve geleneksel ısıtma yöntemleri önemli farklılıklar göstermektedir. 400 W güç ve 30 dak. uygulama süresi için geleneksel ısıtmaya göre MD radyasyonu ile KOİ (% 90) ve $\text{NH}_3\text{-N}$ (% 70) giderme oranından daha yüksek tespit edilmiştir [147]. UYA gideriminin artan radyasyon enerjisi ve radyasyon süresi ile arttığı belirtilirken, 8 dak. uygulama süresi ve 800 W güçte, UYA giderimi, % 31,8'den daha yüksek belirlenmiştir [89]. Geleneksel ısıtmaya göre MD süreci ile % 3 KOİ, % 24,0 UV254 ve % 21,2 renk uzaklaştırma verimleri daha yüksek elde edilmiştir [4].

Yüksek pH ve sıcaklıklarda NH_4 , NH_3 'e dönüşmektedir. Yüksek pH seviyelerinde MD radyasyonunun, organik bileşikler etkilemeden NH_3 'ü önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir [131]. NH_3 giderimi, düşük pH koşullarında daha yüksek enerji gerektirmektedir [131, 148]. Alternatif elektromanyetik alan, H_2O gibi polar malzemelerin dipollerinin dönmeye neden olmakta, moleküller arasındaki sürtünme büyük miktarda ısı üretmekte ve sonuçta kaptaki çözeltinin sıcaklığı hızla yükselmektedir. Uzun MD radyasyon süresinin daha yüksek sıcaklık sağlaması ile daha hızlı molekül hareketini ve daha hızlı kütle transferini indüklemesi sonucu NH_3 -N'in sıvı ortamından uzaklaşmasını temin etmektedir [125, 149]. pH 11, 750 W güç ve 3 dak. radyasyon süresinde uçucu NH_3 'ün %98'i su ortamından uzaklaştırılmaktadır [131]. Başka bir çalışmada da pH 11, 700 W güç ve 4 dak. radyasyon süresinde NH_3 giderme verimi %90,1 olarak bulunmuştur [148]. Sonuç olarak, MD sıcaklığının yükseltilmesi, sudaki moleküler hareketi artırmakta ve yüksek pH seviyelerinde uçucu moleküler NH_3 gaz formuna dönüşmektedir [125,145]. MD uygulama süresinin artması NH_3 -N'in giderme veriminin yükselmesini sağlamaktadır [147]. 78 kJ MD enerjisi, pH 11 ve 120 sn. radyasyon ve 10 dak. havalandırma süresi sonunda sentetik çözeltiden maksimum % 81,7 ve çöp sahası sızıntı suyundan maksimum %70 NH_3 giderimi elde edilmiştir [134]. Tablo 3'te farklı MD işletme koşullarında sızıntı suyu arıtma verimleri sunulmuştur.

Çalışmalar, MD ile birlikte uygulanan diğer süreçler, sızıntı suyu içeriğindeki zor parçalanabilir organik bileşiklerin biyolojik parçalanabilir bileşiklere dönüştürülmesinde tek başına MD uygulamasından daha etkin olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. MD işletme koşullarında sızıntı suyu arıtma verimleri

MD işletim koşulları	Başlangıç Derişim (mg/L), Renk (cm^{-1})	Sonuç Derişim (mg/L), Renk (cm^{-1})	Verim (%)	Kaynak
700 W; 12 dak.	KOI = 2.530 BOI ₅ /KOI = 0,122	KOI = 2.034,12 BOI ₅ /KOI = 0,214	KOI = 19,2	[144]
800 W; 50 dak.	KOI = 4.062,8	KOI = 3.981,5	KOI = 2	[150]
800 W; 8 dak.	KOI = 1.066,6	KOI = 8.050	KOI = 20	[146]
900 W; 30 dak.	KOI = 20.000 NH ₄ = 1.000	KOI = 2.000 NH ₄ = 300	KOI = 90 NH ₄ = 70	[147]
800 W; 8 dak.	UYA = 2.140	UYA = 1.459	UYA = 31,82	[89]
450 W; 8 dak.	KOI = 1.690 UV ₂₅₄ = 6.170 Renk = 3.350 BOI ₅ /KOI = 0,008	KOI = 1.639,6 UV ₂₅₄ = 5,92 Renk = 2,64 BOI ₅ /KOI = 0,022	KOI = 2,99 UV ₂₅₄ = 4,05 Renk = 21,2	[4]
78 KJ; 2 dak., 95 °C 450 W; 16 dak.	NH ₄ = 4.000 KOI = 1467,05; UV ₂₅₄ = 11,75 Renk = 0,67	NH ₄ = 1.680 KOI = 1320 UV ₂₅₄ = 10,7 BOI ₅ /KOI = 0,52	NH ₄ = 58 KOI = 10 UV ₂₅₄ = 8,9 Renk = 22	[134] [1]

A. MD ile Birlikte Uygulanan Yöntemler

Fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin birlikte uygulanması ile oluşan geleneksel arıtma yöntemleri, biyolojik olarak parçalanamayan ve inorganik materyallerin çöp sızıntı suyundan giderilmesinde etkisiz olduğundan ultra filtrasyon (UF) ve TO, İOS; Fenton, foto-Fenton, UV-fotokataliz, ozon vd. ile çöp sızıntı sularının arıtımında olası çözümler üzerinde çalışılmaktadır [73,151-153]. Ozon, hidrojen peroksit (H_2O_2) ile oksidasyon ve UV radyasyonu (fotoliz olarak adlandırılır) Fenton, ultrases vd. gibi İOS süreçleri ve bunların kombinasyonları (hibrit) olgun ve toksik sızıntı suyu arıtımında kullanılmıştır [72,152].

Hibrit sistemler, son yıllarda sızıntı suyu arıtımında daha yüksek verimleri ile daha yaygın hale gelmiştir [45, 118, 154]. 80 kg/m³ sülfamik asit derişimi, 3,4 kW MD gücünde ve 3 dak. karıştırma süresinde çıkış suyu BOI₅/KOI oranı 0,05'ten 0,36'ya (% 620) yükselmesinin, biyolojik arıtma verimliliğinde gelişme olabileceğini göstermektedir [155]. MD/peroksisülfat (3,5 mg/L) ile 85 °C, 450 W güç ve 10 dak. temas süresinde sızıntı suyunun parçalanması ile biyolojik parçalanabilirlik 0,01'den 0,23'e yükselmiştir [4]. İOS'lerinde serbest radikal zincir reaksiyonları ve organik madde yapı bozunması denklem (2-5) ile [49, 156-158], farklı oksidantlar/birleşik UV sistemi ile MD mekanizması Şekil 1'de sunulmuştur.



KO: kimyasal oksitleyici (H_2O_2 , $S_2O_8^{2-}$, vd.); R•: serbest radikal; AS: atıksu.

İOS'leri, sızıntı suyu içeriğindeki refrakter organikleri daha basit formlara dönüştürmek için uygun arttırma stratejileridir, KOİ ve renk parametresinin kontrol edilmesini sağlar. Genel olarak İOS'lerinin etkinliği, hidroksil radikalleri ($\bullet OH$) yaratma kapasitesi ile ilgilidir [159]. Ozon veya H_2O_2 , serbest radikal reaksiyonu başlattığında, çözeltilde art arda oksidasyon meydana gelir ve radikaller, hedef moleküllerin çoğuyla hızla reaksiyona girer. Radikal, kirlenici derişimleri, sıcaklık ve OH^- iyonu İOS'lerin kinetik hızını etkiler [160]. 2,8 ve 1,95 V (pH: 0-14) aralığında, referans elektroda karşı oksidasyon potansiyeline sahip radikaller, sızıntı suyunun arıtılmasında etkin oksitleyici ajan olarak işlev görür [161] ve reaktif radikaller organik kirlenicileri hidrojen ekstraksiyonu, elektron transferi, radikal ekleme ve radikal toplanması olarak dört şekilde parçalar [162]. Serbest radikaller, $\bullet OH$ 'nin O_2 ile reaksiyona girebilen ve organik peroksil radikaline ($ROO\bullet$) dönüşebilen organik bileşiklerle reaksiyona girmesiyle alkil (R) veya alkol (R-OH) üretilir [163]. $\bullet OH$, sulu ortamda organik ve organometalik kirlenicilerin seçici olmadan parçalanması ile CO_2 , H_2O ve inorganik iyonlara tam mineralizasyonu hedeflenir [164-166]. $\bullet OH$, ortamda birikmeyen ancak diğer oksidantlara dirençli organik kirlenicilerle verimli bir şekilde reaksiyona girebilen ve hız sabitleri 10^6 - $10^{10} M^{-1} s^{-1}$ ile sonuçlanan oldukça reaktif bir türdür [167]. Türlerine göre oksitleme kapasiteleri Tablo 4' de sunulmuştur.

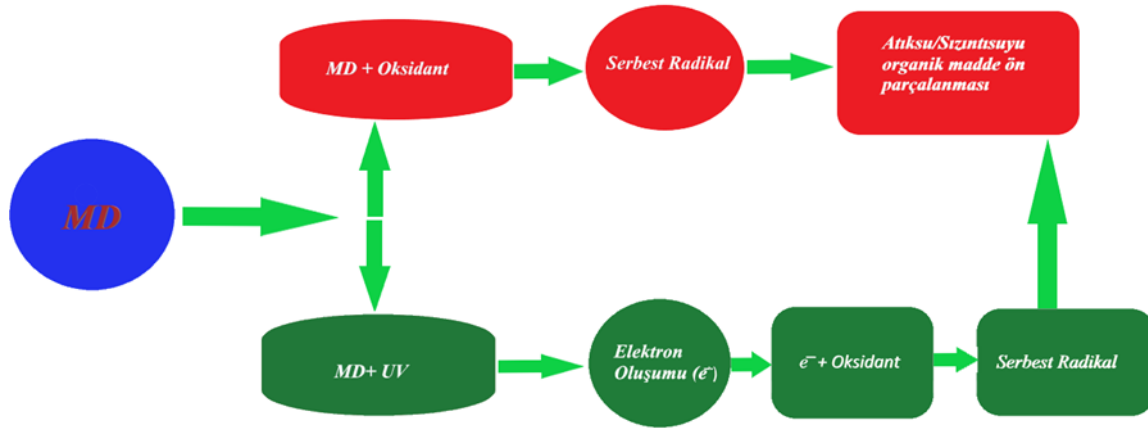
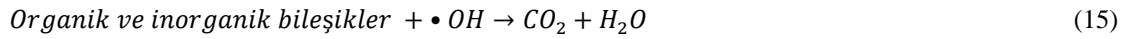
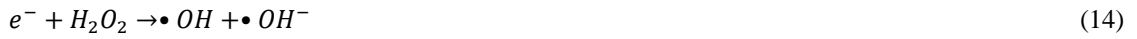
Tablo 4. Farklı oksitleyicilerin oksitleme kapasiteleri [168, 169]

Oksitleyiciler	Formül	Elektro kimyasal oksidasyon potansiyeli (E° (V))
Titanyum dioksit	TiO_2	3,02
Flor	F	3,06
Hidroksil radikalleri	OH^\bullet	2,80
Atomik oksijen	O	2,42
Ozon	O_3	2,08
Hidrojen peroksit	H_2O_2	1,78
Hipoklorit	ClO^-	1,49
Klor	Cl/Cl_2	1,36
Klordioksit	ClO_2	1,27
Mangandioksit	MnO_2	1,23
Oksijen	O_2	1,229
Brom	Br	1,065

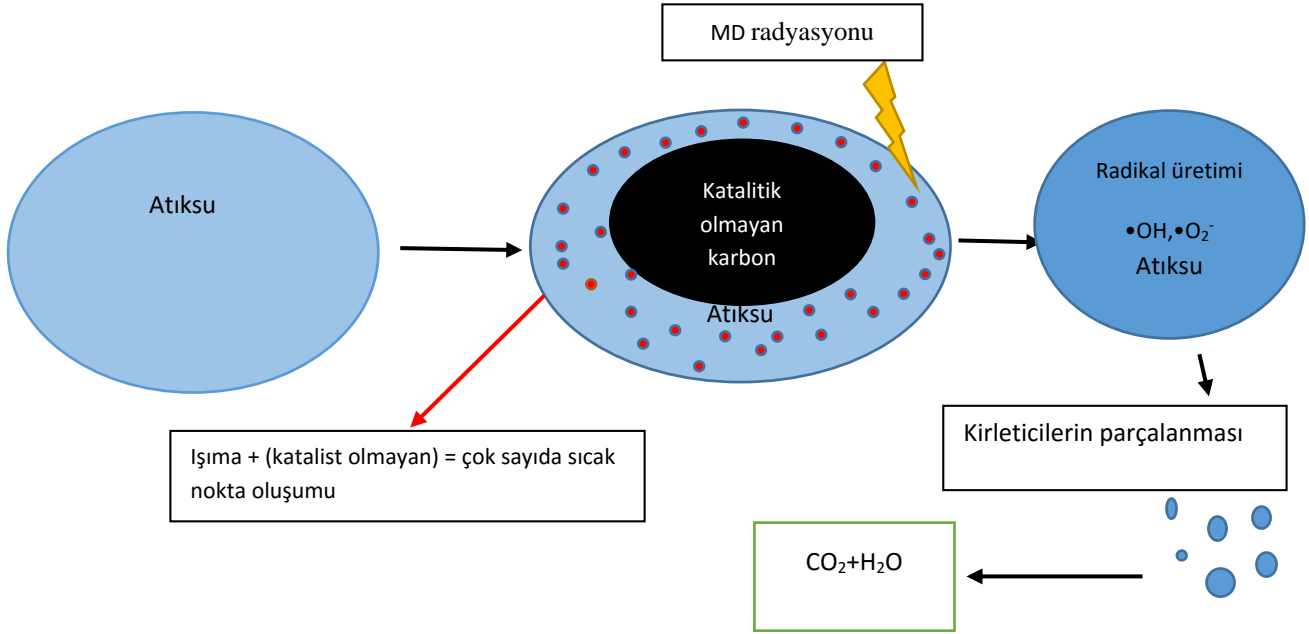
Denklem (5)'te görüldüğü gibi radikaller tarafından organik maddelerin oksidasyonu ile toplam mineralizasyon gerçekleştirilir. MD radyasyonu, bazı katalizör olmayan (karbon bileşikleri) MD absorplayıcılar, katalizör görevi görebilir. MD, klimalar ve karbon nanotüpler (CNT'ler) gibi karbon malzemelerle çalıştığında, yüzeyde birçok "sıcak nokta" oluşabilir [170,171]. Sıcak noktaların (karbon malzemeleri gibi) sıcaklığı genellikle 1200 °C veya daha fazlasına ulaşabilir ve bu durum reaktant moleküllerinin yanmasına ve CO_2 , H_2O ve bazı basit inorganik iyonlara oksitler [171,172]. Ayrıca, "sıcak noktalarda" bulunan H_2O molekülleri, $\bullet OH$ ve $\bullet H$ 'ye pirolizlenebilir. Daha sonra sulu çözeltilde $\bullet H$, denklemlerde (6-7) gösterildiği gibi $\bullet O_2^-$ oluşturmak üzere O_2 molekülleri ile birleşebilir [17,174]. Güçlü oksitleme kapasitelerine sahip bu radikaller, kalıntı kirlenicileri veya ara ürünleri ayrıca CO_2 , H_2O ve inorganik türlere ayrıştırabilir [171,174]. Şekil 2'de MD ve katalist olmayan (karbonlu bileşik) arasındaki etkileşimi göstermektedir [175].



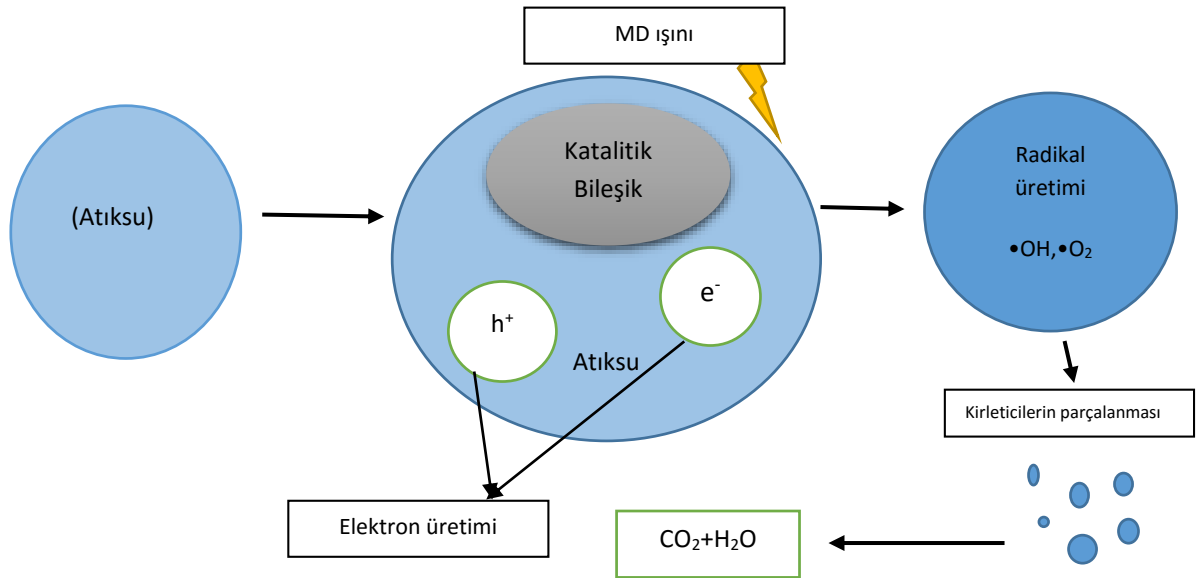
İçsel katalizörler (geçiş metal oksitleri, yarı iletkenler ve ferromanyetik metaller gibi), çeşitli kimyasal işlemlerde önemli katalitik kapasiteye sahiptir. Valans bandındaki (VB), e^- uyarılarak, katalizörlerde iletim bandına (CB) aktarılacağından, katalizörler, e^- ve h^+ çiftleri oluşturulmasında, doğrudan MD ışınması ile uyarılabilir. Bu nedenle fırın radyasyonunu katalizörlerle birleştirmek, katalizörlerin katalitik kabiliyetini ve organik kirleticilerin ayrışma verimliliğini artırabilir. Daha sonra, VB'deki h^+ ve CB'deki e^- , sırasıyla H_2O , çözünmüş OH^- ve O_2 ile reaksiyona girerek güçlü oksitleyici $\bullet OH$ ve diğer oksitleyici aktif gruplar oluşturur, bu da denklemlerde (8-15) gösterildiği gibi mineralizasyona kadar sürekli oksidasyon yoluyla kirleticileri parçalayabilir [176-179]. MD ve katalizörler arasındaki etkileşim Şekil 3'de sunulmuştur [176, 180].



Şekil 1. Kirleticilerin MD ile hibrit arıtma mekanizması [49]



Şekil 2. MD ve katalizör olmayanlar (karbonlu malzemeler) arasındaki etkileşim [175]



Şekil 3. Serbest radikaller oluşturmak için mikrodalga ve katalizörler arasındaki etkileşim [177,180]

B. Hibrid MD/İOS Uygulamaları

İOS ile birleştirilen MD radyasyonu, organik kirlenmelerin doğrudan mineralizasyonunu artırmakta veya organik kirlenmelerin biyolojik parçalanma potansiyelini güçlendirmektedir [181, 182]. Süreçte, güçlü serbest radikaller, •OH ($E_0 = 2.8$ V) ve $SO_4^{\cdot-}$ ($E_0 = 2.6$ V), sızıntı suyu içeriğindeki organik maddelerin etkili ve güçlü bir şekilde çözünmesini sağlar [183, 184]. Persülfat (PS) ve H_2O_2 , MD oksidasyon araştırmalarında kullanılan en yaygın oksitleyicilerdir [126]. $SO_4^{\cdot-}$, organik kirlenmelerin oksidasyonu için •OH'den daha seçicidir ve ayrıca,

SO₄²⁻ tarafından oksidasyon yoluyla daha iyi mineralizasyon elde edilebilir. Nispeten yüksek stabilitesi, suda çözünürlüğü ve düşük maliyeti nedeniyle PS, saha uygulamalarında SO₄²⁻ kaynağı olarak yaygın olarak kullanılır [185]. Oksitleyici radikaller içeren bazı kimyasal bileşikler, tek başlarına düşük oksidasyon kapasitesine sahip olmalarına rağmen sıcaklık, UV, ultrases veya MD tarafından etkinleştirilerek oksitleme kapasiteleri artırılabilir [151, 186-188]. Kimyasal bağların parçalanmasına neden olabilen 4,1 eV enerjiye sahip UV olduğu için 10⁻³ eV enerjiye sahip MD'nin değil UV'nin •OH'ı indüklediği düşünülmektedir [18,173]. MD enerjisi, UV ışığıyla sulu çözeltide •OH oluşumunu arttırmaktadır [189].

Radyasyon süresi ne kadar uzun olursa organik kirleticilerin uzaklaştırılması o kadar yüksek olmaktadır. 1M PS, 500 W/85 °C ve 70 dak. temas süresinde MD ile kümülatif toplam organik karbon giderimi yaklaşık 45 mg/L'ye ulaşırken, KOİ derişimi 254 mg/L'den 115 mg/L'ye azalmaktadır [123]. 33,3 mg/g Fe iyonu ve ~ 720 W MD için radyasyon süresinin 10 dak.'dan 30 dak.'ya yükseltilmesi ile KOİ ve NH₃-N uzaklaştırılması sırasıyla % 95,6 ve %88,6 olmasına rağmen 33,3 mg/g'nin üzerinde Fe derişimi ve 720 W'nin üzerinde MD gücünde, kararlı duruma ulaşıldığından, KOİ ve NH₃-N gideriminde artış belirlenmemiştir [147]. Radyasyon süresinin 10 dak.'dan kısa olması, yüksek radyasyon süresinden daha etkin olduğu açıklanmıştır. Bu, proses sıcaklığındaki kademeli artış ve peroksidisülfat (PDS) radikallerinin miktarındaki yükselme nedeniyle artan SO₄²⁻ üretimi ve oksidasyon hızı ile açıklanmaktadır [120].

Aktifleştirilmiş PDS, artan sıcaklık ve azalan pH ile MD aktivasyonu yoluyla önemli miktarda SO₄²⁻ oluşturabilir (Denklemler 16-18) [190, 191]. Bu, PS vd. gibi kimyasal katkı maddelerinin bozunmasının büyük ölçüde T tarafından kontrol edildiğini ve bu bağımlılığın pratikte reaktör tasarımı büyük ölçüde etkilediğini göstermektedir, k_{obs} için sıcaklık (T) bağımlılığı Arrhenius denklemi (9) kullanılarak değerlendirilmiştir [185]. MD ile birlikte uygulanan kimyasal maddelerin (M) (H₂O₂, PS vd.) verimliliğini (MD+PS, MD+H₂O₂, MD+pH, vd.) tanımlamada kullanılan sinerji indeksi, Eşitlik 19 ile hesaplanabilir [120,192].



$$k_{obs} = S \cdot e^{-E_a/(GT)} \quad (18)$$

$$\text{Sinerjistik İndeks (f)} = \frac{K_{(KM+MD)}}{K_{KM} + K_{MD}} \quad (19)$$

Eşitliklerde; K_{KM}: kimyasal madde için hız sabiti; K_{MD}: MD için hız sabiti; K_(KM+MD): kimyasal madde ve MD için hız sabiti; k_{obs}: parçalanma hızı dak⁻¹; S: ön ekponansiyel sabit dak⁻¹; E_a (J/mol) = aktivasyon Enerjisi; G: 8,314 J/mol; K: Ünlversal gaz sabiti; T: Sıcaklık olarak tanımlanmaktadır; Sıcaklığa bağlı ve M tarafından ölçülen hız sabiti, K_{obs}, yalancı birinci dereceden bir hız sabiti Eyring eşitliği ile belirlenmektedir [185].

MD radyasyonu, kirleticilerin oksidasyonu için gerekli olan eşik enerjisini azaltmasına rağmen reaksiyonun doğasını değiştirmez. E_a'ya eşit veya daha yüksek olan MD işlemine yaklaşık 2,6 kat daha fazla sayıda molekül dahil olduğundan, reaksiyon kinetiğini kolaylaştırmaktadır [120]. Tablo 5'de arıtma seçeneği kombinasyonları ve çöp sızıntı suyunun arıtılması için hibrit sistemleri içeren araştırmalar sunulmuştur. Tablo'dan görüldüğü gibi sızıntı suyu arıtımında hibrit uygulamalar, sadece MD uygulamalarına göre daha yüksek kirletici giderme verimlerine sahiptir.

MD, fenton oksidasyonunu arttırmakta ve sulu çözeltide kolloidal flokülasyonu geliştirmektedir. Organik madde giderimi temel olarak oksidasyon ile NH₃-N giderimi ise flokülasyon ve adsorpsiyon ile gerçekleşmektedir. En yaygın çevresel endokrin bozucu türlerden biri olarak belirtilen, bifenol A'nın (BPA) fenton'un MD ile güçlendirilmiş oksidasyonu ile giderilebileceği belirtilmektedir [193,194]. MD radyasyon enerjisinin artmasıyla BPA giderimi hızı kademeli olarak artmaktadır [108,110]. BPA giderim hızı ile birlikte H₂O₂ bozunma hızı artmaktadır [195]. Eşit BPA giderim hızına ulaşmak için farklı MD gücü kullanıldığında, reaksiyon süresinde önemli farklılıklar bulunmaktadır [130]. Örneğin, BPA %90 giderme verimine ulaşmak için 100 W'ta 12,0 dak.'da gerçekleşirken, 300 W gücünde 4,0 dak. reaksiyon süresi yeterli olmaktadır. 300 W'tan daha yüksek enerji seviyelerinde (500 W) •OH'in etkin olarak kullanılamaması nedeni ile eşit BPA giderme verimine ulaşmak için önemli farklılık gözlenmemiştir [196-198].

Tablo 5. MD ve MD birleşik süreçler ile çöp deponi alanı sızıntı suyu arıtım verimleri

İşletim Koşulları	Deponi alan yaşı/Ülke	Başlangıç Kirlenme Derişimi (mg/L)	Kirlenme Derişimi (mg/L)	Son Kirlenme Derişimi (mg/L)	Giderme Verimi		Kaynak
					Birleşik Arıtım	Tek Kademe Arıtım	
*MD: 85 °C; 30 dak.; Güç: 550 W; 1 M Sodyum Persülfat	27 yıl/Çin	BOI ₅ /KOI: 0,05 TOK: 57,7	TOK: 11,9 BOI ₅ /KOI: 0,12		Renk: 86 TOK: %79,9 UV ₂₅₄ : %79	Renk: % 18 (SPS) TOK: %19 (SPS) UV ₂₅₄ : %22 (SPS)	[199]
*MD: 550 W; 120 dak.; 1 M	16 yıl/ Tayvan	UV ₂₅₄ : 1,65 Renk:121 TOK: 56,5	UV ₂₅₄ : 0,702 Renk: 5 TOK:11,3		UV ₂₅₄ : % 55 Renk: % 96 TOK: % 80	-	[200]
MD:775 W; 120 dak.; 1 M, *MD: 480W; 3 dak.; *MD: 300 W; Kimyasal: Fe atıkları: 2 g/L FeSO ₄ ; 1,5 g/L Kimyasal: 0,02 mol/L Fe ⁺² -DTA, 0,1 mol/L H ₂ O ₂ ve 6 g/L GAK	- / Çin	KOI: 11.928	611,5		KOI: % 48,7	-	[201]
*MD: 90 °C; 30 dak. Kimyasal; 0,1 M SPS	- / Güney Kore	KOI: 2.350 BOI ₅ /KOI: 0,12 TOK: 437	KOI:1.022,25 BOI ₅ /KOI: 0,46 TOK: 65,55		KOI: % 56,6 TOK: % 85	KOI: % 19,6 (MD) KOI: %26,2 (Fenton)	[144]
*MD: 800 W; 30 dak. Kimyasal: 0,3 mol/L PS	-/ Çin	KOI: 4.062,8	KOI: 109,6		KOI: % 97,3	KOI: %30	[150]
*MD: 750 W; 30 dak.; Kimyasal: 33.32 mg/g GAC, Fe iyon taşıyıcı	-/ Çin	KOI:20.000 NH ₃ : 1.000 UYA: 2.140	KOI: 873 NH ₃ : 113,7 UYA: 1.459,052		KOI: % 95,6 NH ₃ : % 88,6 UYA: %31,8	KOI:%30 (MD) NH ₃ %20 (MD) UYA: %28 (MD)	[147]
*MD (MH): 625 W, 8 dak; havalandırma hızı 0,5 L/dak	-/ Çin	UYA: 2.140	UYA: 1.459,052		UYA: %31,8	UYA: %28 (MD)	[89]
*MD (MH): 78 KJ, 750 W, 120 dak, pH 11, 10 dak havalandırma	-/ Kanada	NH ₄ : 4.000	NH ₄ : 732		NH ₄ : %81,7	NH ₄ : % 53,1 (MD)	[134]
*MD ^p : 450 W, 16 dak. Kimyasal: 50 mmol/L PS	26/Çin	KOI: 1.467,05 UV ₂₅₄ :11,75 Renk: 0,67	KOI: 660,17 UV ₂₅₄ : 2,93 Renk: 0,005		KOI: 55 UV ₂₅₄ : %75 Renk: %99,2	KOI: % 8,9 (MD) UV ₂₅₄ :%10,2 (MD) Renk:% 13,86 (MD)	[1]

* sonuçlar en yüksek değerler olarak sunulmuştur; DTA: disodyum etilenediamintetraasetik acit; AK: aktif karbon; GAK: granül aktif karbon; a: hibrit arıtım kirlenme derişimi;b: oranlar grafiklerden alınmıştır; MH: MD-hidrotermal; PDS: peroksidisülfat;; K-F: koagülasyon-flokülasyon (FeCl₃);SPS : Sodyum Persülfat

C. Maliyet

Reaktör işletimi için elektrik ve oksitleyici gereksinimi, MD/MD-hibrit sistemlerde önemli olduğundan sızıntı suyu arıtımı için MD sistemlerinin seçiminde maliyet analizi kritiktir. Sızıntı suyu arıtımında kimyasal maliyeti ve MD güç gereksinimi hesabında eşitlik (20-23) kullanılır [49, 78, 84, 85, 206, 207].

$$\text{Enerji tüketimi(Kwh)} = \frac{\text{MD Güç} \times \text{süre}}{1000 \times 60} \quad (20)$$

$$\text{Giderilen organik atık için elektrik maliyeti} \frac{\$}{\text{mg}} = \frac{\text{Enerji} \times \text{Elektrik fiyatı}}{\text{Giderilen kirlenici derişimi} \times \text{kirlenici hacmi}} \quad (21)$$

$$\text{Giderilen organik atık için kimyasal maliyeti} \frac{\$}{\text{mg}} = \frac{\text{Gerekli kimyasal miktarı} \times \text{kimyasal fiyatı}}{\text{Giderilen kirlenici derişimi} \times \text{hacim}} \quad (22)$$

$$\text{Giderilen organik madde/Güç/katalist} = \frac{\text{Kirlenici derişimi(Giriş-Çıkış)} \times \text{Hacim}}{\text{Tüketilen Güç} \times \text{Katalist miktarı}} \quad (23)$$

Arıtılan sızıntı suyu için koagülant madde dozu maliyeti, demir klorür, kireç ve alüm için sırası ile 3,6 \$/m³, 5,25 \$/m³, 5,85 \$/m³ olarak hesaplanmıştır [116]. Kireç ile (ağırlıkça %10) çöp deponi sızıntı suyundan AKM, KOİ ve ağır metaller, sırasıyla %82, %19 ve %60 oranında uzaklaştırılmıştır. Kireç ile ön arıtmanın sermaye ve işletme maliyeti sırasıyla 175 \$/m³ ve 5 \$/m³ olarak bulunmuştur [90].

Sızıntı suyu arıtımında MD ısıtma, ekonomik olarak uygulanabilir maliyetlidir [131]. Refrakter bileşiğin bileşik adsorpsiyon ve İOS/PS ile arıtma maliyeti, enerji maliyetine kıyasla, kimyasal maliyeti daha önemlidir ve toplam maliyet 41 \$/m³ olarak bulunmuştur [208]. MD/PS süreçleri ile arıtma maliyeti ise 6,37 \$/m³ olarak belirtilmektedir [199]. Biyolojik arıtım için daha kolay bozunabilen basit organik asit elde edilmesinde ve daha düşük biyolojik bozunabilir organik bileşiklerin oksidasyonunda, 6,03 \$/m³ maliyeti olan MD oksidasyon işleminin, sonraki bir ön işlem olarak daha uygun olduğu açıklanmaktadır [199]. MD/aktifleştirilmiş PS sürecinin optimum koşullarda işletim maliyeti 29,4 \$/L atıksu, konvansiyonel ısı ile aktive edilen PS süreci kullanılarak işletme maliyetinin ise 18,8 \$/L atık su olarak açıklanmaktadır [109]. MD-Fe0/H₂O₂ bileşik süreç işletme maliyetinin esas olarak Fe0 ve H₂O₂ kimyasal reaktiflerinin tüketiminden kaynaklandığı ve bu nedenle arıtma maliyetinin 1 ton işlem başına yaklaşık 0,1 \$ olması nedeni ile MD-Fe0/H₂O₂ bileşik süreç, sızıntı suyunun arıtılması için ekonomik olarak uygun bir ön arıtma yöntemi olarak önerilmektedir [203].

IV. SONUÇ

Nüfus artışı, insan ihtiyaçlarının çeşitlenmesi ve ihtiyaçların karşılanması gerekliliği, çok farklı kaynak kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Geçmiş, teknolojik uygulamalar, kaynak tüketimini azaltmadığından, sürdürülebilir gelişme ve canlılar için mevcut sağlıklı yaşam koşullarını iyileştirmek amacı ile daha uygun yaklaşımların zorunlu olduğu görülmektedir. İnsan ihtiyaçlarını karşılamak için etkin sistemler kurulmalı ve çevresel verimlilik için optimize edilmelidir.

Ekonomik gelişme sonucu kaynakların tüketimi ile oluşan; katı, gaz ve sıvı atıklar, yeterli/yetersiz arıtım sonrası veya arıtılmadan, alıcı ortamlar; hava, toprak ve suya verilmektedir. Alıcı ortamların kirlenmesi ile uzun dönemde ortaya çıkan çevresel kirlilik, ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Kaynakların kontrollü kullanılması ve mümkün olduğunca atıkların azaltılması ile sürdürülebilir gelişme ve üretim sağlanabilir. Oluşan atıkların geri kazanımı, tekrar kullanımı ve üretim süreçlerinde değerlendirilmesi ile kaynak tüketimi azaltılabilir.

Sıfır Atık yaklaşımı tüm ürünler veya yan ürünlerin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi için kaynak tedarik zincirinin yeniden şekillendirilmesini kapsadığından katı atık sorununu çözmenin etkili bir yoludur. Sıfır atık yaklaşımı, ihtiyaç olmayanın reddedilmesi, atık azaltımı, tekrar kullanımı, geri dönüşümü ve çürütmeyi içermektedir.

Düzenli depolama atık yönetimi, arazi kullanımları ve atık emisyonları nedeniyle, akıllı sürdürülebilir şehirlerin geliştirilmesinde politika yapıcılar ve planlayıcılar için önemli bir zorluktur. Düzenli depolama için çerçeve geliştirmek, atık miktarı ve özellikleri hakkında yaklaşım gerektirir.

EKA içeriğindeki plastik, cam, metal ve kağıt gibi malzemeler geri dönüşümde değerlendirilirken, organik içerikli atıklar düzenli deponi alanlarında çürütmeye tabi tutulmakta ve anaerobik ortam koşullarında CH₄ gazı elde edilmektedir. Anaerobik çürütme sonucunda ve yağış etkisi ile heterojen içeriğe sahip yüksek

hacimde sızıntı suyu oluşmaktadır. Sızıntı suyu, deponi alanında nem oranını belirli seviyede tutmak amacıyla geri devredilirken enerji üretiminin artmasını da sağlamaktadır.

Heterojen ve biyolojik parçalanması zor organik madde içeriği ile sızıntı suyu, arıtımı oldukça güç bir atıksu olarak nitelendirilmektedir. İçeriğindeki yüksek derişimdeki organik madde, CH₄ gazı elde edilmesinde enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Biyolojik olarak zor parçalanabilir organik bileşiklerin ön işlemler ile parçalanması, anaerobik çürütme ile CH₄ gaz hacminde artış sağlanabilir. Çöp deponi alanlarında sızıntı suyunun alana geri devri sonucu, çıkış suyunda biyolojik parçalanabilir organik madde derişimi azalmakta ve BOI/KOI oranı düşmektedir. Biyolojik parçalanabilir refrakter organik madde içeriği ve ayrıca yüksek NH₄-N derişimi ile sızıntı suyunun alıcı ortama deşarj öncesi arıtımı gerekmektedir.

Deponi alanı işletimi ile BOI/KOI oranı düşük ve ağır metal içeriğine sahip atık sıvının arıtımı için farklı yöntemler araştırılmaktadır. Kirletici derişimi yüksek atık sıvıların arıtımında kimyasal madde kullanımı, kimyasal atık çamur oluşumuna neden olmaktadır. Adsorpsiyon, iyon değiştirme ve TO gibi yöntemlerin sızıntı suyu arıtımında uygulanması ile de artırılması gereken, derişimi oldukça yüksek, atık sıvı oluşmaktadır.

MD pirolizi gibi yenilikçi teknolojilerin kullanımı ile bazı zorlu atık yönetim sorunlarının üstesinden gelinebilir. Arıtma çamurlarının ve çöp deponi alanlarında oluşan sızıntı sularının dezentegrasyonu konusunda çok sayıda araştırma sürdürülmektedir. Termal ve atermal etkileri nedeniyle MD teknolojisi, çöp sızıntı suyunun arıtımında önemli bir yöntem olarak kabul edilmesine rağmen MD ile hibrit süreçler, çok daha yüksek verimde işlemlenmektedir. Çalışmalar, hedef sıcaklık, sıcaklık yükselme hızı, MD gücü ve uygulama süresinin, atık dezentegrasyonunda önemli olduğunu göstermektedir. Atık niteliğine göre MD/İOS uygulamasının optimize edilmesi, daha yüksek verimde arıtım sağlarken, aynı zamanda CH₄ gaz hacminde de artış sağlayacaktır. Hibrit MD/İOS sürecinin iyileştirilmesi ile daha ekonomik ve uygulanabilir bir yöntemle ulaşılabilir. MD-PS birleşik süreci ise sızıntı suyu hacmi ve kirletici giderme hızı göz önüne alındığında, deponi sahasında sızıntı suyu arıtımında gelecekte uygulanabilecek yöntem olarak görülmektedir. MD süreci ile fiziko-kimyasal-biyolojik biyoremediasyonun birleştirilmesi, çöp sızıntı suyunun sürdürülebilir ve uygun maliyetli arıtım, sorununun çözümünde etkin bir yaklaşım olabilir.

Sıfır atık yaklaşımında da çöp deponi alanında organik maddenin çürütülmesi gerçekleşirken, süreç sonunda oluşan artırılması güç sızıntı suyu arıtımı ve yan ürün elde edilmesi söz konusu olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Chen, W., Wang, F., He, C., & Li, Q. (2020). Molecular-level comparison study on microwave irradiation-activated persulfate and hydrogen peroxide processes for the treatment of refractory organics in mature landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122785.
- [2] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. *World Bank Publications*.
- [3] Chen, G., Wu, G., Li, N., Lu, X., Zhao, J., He, M., & Wang, S. (2021). Landfill leachate treatment by persulphate related advanced oxidation technologies. *Journal of Hazardous Materials*, 132655.
- [4] Gu, Z., Chen, W., Li, Q., Wang, Y., Wu, C., & Zhang, A. (2018). Degradation of recalcitrant organics in landfill concentrated leachate by a microwave-activated peroxydisulfate process. *RSC advances*, 8(57), 32461-32469.
- [5] Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-493.
- [6] Mojiri, A., Aziz, H. A., Zaman, N. Q., Aziz, S. Q., & Zahed, M. A. (2016). Metals removal from municipal landfill leachate and wastewater using adsorbents combined with biological method. *Desalination and Water Treatment*, 57(6), 2819-2833.
- [7] Mojiri, A., Ziyang, L., Hui, W., Ahmad, Z., Tajuddin, R. M., Amr, S. S. A., & Farraji, H. (2017). Concentrated landfill leachate treatment with a combined system including electro-ozonation and composite adsorbent augmented sequencing batch reactor process. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 253-262.
- [8] Jayanthi, M., Duraisamy, P., Sharma, K. K., & Paramasivam, K. (2012). Potential impacts of leachate generation from urban dumps on the water quality of Pallikaranai Marsh-the only surviving freshwater wetland of Chennai city in India. *Indian Journal of Innovations and Developments*, 1(3), 186-192.

- [9] Karak, T., Bhagat, R. M., & Bhattacharyya, P. (2012). Municipal solid waste generation, composition, and management: the world scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(15), 1509-1630.
- [10] Ramaiah, B. J., Ramana, G. V., & Datta, M. (2017). Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. *Waste Management*, 68, 275-291.
- [11] Sharholly, M., Ahmad, K., Mahmood, G., & Trivedi, R. C. (2008). Municipal solid waste management in Indian cities—A review. *Waste management*, 28(2), 459-467.
- [12] Han, Z., Ma, H., Shi, G., He, L., Wei, L., & Shi, Q. (2016). A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China. *Science of the Total Environment*, 569, 1255-1264.
- [13] TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu. (2021). *İstatistik Veri Portalı*, <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Cevre-ve-Enerji-103>.
- [14] Çelebi, M., Dökmetaş, B., Sönmez, B., & Akçam, N. (2017). Belediye Atıklarından Çöp Gazı (LandFill Gas-LFG) Elde Edilerek Elektrik Enerjisi Üretilmesi ve Ülkemizdeki Örneklerinin İncelenmesi. *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2017)*. 29-30 September, s. 695-701, Baku-Azerbaijan.
- [15] Sivas Belediyesi. (2019). *Çevre Koruma ve Kontrol ve Müdürlüğü Sunumu*, 35s.
- [16] Çanakkale Valiliği. (2021). <http://www.canakkale.gov.tr/cop-deponi-alani-enerji-uretim-tesisinin-acilisi-gerceklestirildi>
- [17] Mihai, F. C., & Taherzadeh, M. J. (2017). Introductory chapter: Rural waste management issues at global level. *Solid Waste Management in Rural Areas. InTech: Rijeka, Croatia*, 1-10.
- [18] Ayub, S., & Khan, A. H. (2011). Landfill practice in India: A review. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 3(4), 270-279.
- [19] Zacarias-Farah, A., & Geyer-Allély, E. (2003). Household consumption patterns in OECD countries: trends and figures. *Journal of Cleaner Production*, 8(11), 819-827.
- [20] Lee, P., Sims, E., Bertham, O., Symington, H., Bell, N., Pfaltzgraff, L. & O'Brien, M. (2017). Towards a circular economy: waste management in the *EU Report, Brussels*.
- [21] Mourelatou, European Environment Agency. (2018). *A. Mourelatou, European Environment Agency Environmental indicator report 2018: In support to the monitoring of the Seventh Environment Action Programme Publications Office of the European Union, Luxembourg (2018)*
- [22] Modak, P. (2010). *Municipal Solid Waste Management: Turning waste into resources. Shanghai Manual-A Guide for Sustainable Urban Development in the 21st Century*
- [23] Liu, Z. H., Tao, C. Y., Liu, R. L., Sun, D. G., & Zou, Z. H. (2007). Study on Treatment of Landfill Leachate Aided by Microwave Fenton Process [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 3.
- [24] Sun, W., Wang, X., Decarolis, J. F., & Barlaz, M. A. (2019). Evaluation of optimal model parameters for prediction of methane generation from selected US landfills. *Waste Management*, 91, 120-127.
- [25] Ouda, O. K., Raza, S. A., Nizami, A. S., Rehan, M., Al-Waked, R., & Korres, N. E. (2016). Waste to energy potential: a case study of Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 328-340.
- [26] Eurostat. (2015). Eurostat: *the statistical office of the European Union situated in Luxembourg*. <<http://ec.europa.eu/eurostat>>
- [27] Brennan, R. B., Healy, M. G., Morrison, L., Hynes, S., Norton, D., & Clifford, E. (2016). Management of landfill leachate: The legacy of European Union Directives. *Waste management*, 55, 355-363.
- [28] Eur – lex. europe.eu. (1999). Council Directive 1999/31/EC of 26th April 1999 on the landfill of waste (online) available from <http://eur-lex.europa.eu/> (Accessed 02/02/2014).
- [29] EEA. (2013). European Environment Agency. *Towards a green economy in Europe. EU environmental policy targets and objectives 2010–2050. file:///C:/Users/0109448s/Downloads/Towards%20a%20green%20economy%20in%20Europe%20(1).pdf (accessed 15 May 2015)*.
- [30] EPA. (2000). *Landfill Manuals Landfill Site Design*. Wexford, Ireland, 154.
- [31] TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu. (2021). *Atık İstatistikleri, 2020*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>
- [32] Sharma, K. D., & Jain, S. (2019). Overview of municipal solid waste generation, composition, and management in India. *Journal of Environmental Engineering*, 145(3), 04018143.
- [33] Kumar, S., Smith, S. R., Fowler, G., Velis, C., Kumar, S. J., Arya, S., & Cheeseman, C. (2017). Challenges and opportunities associated with waste management in India. *Royal Society open science*, 4(3), 160764.

- [34] Ding, Y., Zhao, J., Liu, J. W., Zhou, J., Cheng, L., Zhao, J., & Hu, Z. T. (2021). A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization. *Journal of Cleaner Production*, 126144.
- [35] Lee, S. H. (2020). South Korea's Experience with Smart Infrastructure Services: *Bus Management System (No. IDB-MG-854)*.
- [36] MOE. (2011). Result of actual condition survey on general waste disposal in FY2010. (in Japanese). http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html. (Accessed 1 February 2017).
- [37] Pariatamy, A., Tanaka, M., Islam, A., Rasul, G., Manandhar, P., Parveen, J. A., & Ahmed, N. (2014). Municipal solid waste management in Asia and the Pacific Islands. *Environmental Science, Springer, Singapore*, 201.
- [38] Themelis, N. J., & Mussche, C. (2013). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the United States, China and Japan. In *2nd International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining, Houthalen-Helchteren. October*, (pp. 14-16).
- [39] Alfaia, R. G. D. S. M., Costa, A. M., & Campos, J. C. (2017). Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management & Research*, 35(12), 1195-1209.
- [40] US EPA. (2015). *Report on the 2015 US Environmental Protection Agency (EPA) International Decontamination Research and Development Conference*.
- [41] Gonçalves, A. T. T., Moraes, F. T. F., Marques, G. L., Lima, J. P., & Lima, R. D. S. (2018). Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 13.
- [42] Oudejans, L. (2017). Report on the 2016 US Environmental Protection Agency (USEPA) International Decontamination Research and Development Conference.
- [43] Abu Dhabi Statistics Centre. (2018). Statistical Yearbook of Abu Dhabi 2018. Retrieved 20 May 2016 from https://www.scad.gov.abudhabi/Release%20Documents/SY_B_2018_EN_9Sep.pdf
- [44] Koda, E., & Żakowicz, S. (1998). Physical and hydraulics properties of the MSW for water balance of the landfill. *3rd International Congress on Environmental Geotechnics. September*, 1.
- [45] Öztürk, İ., Onay, T. T., Çallı, B., Mertoglu, B., & Yıldız, Ş. (2010). Sızıntı Suyu Yönetimi İhtisas Komisyonu Taslak Çalışma Raporu, Türkiye.
- [46] Akgul, D., Aktan, C. K., Yapsakli, K., & Mertoglu, B. (2013). Treatment of landfill leachate using UASB-MBR-SHARON-Anammox configuration. *Biodegradation*, 24(3), 399-412.
- [47] Bilgili, M. S., Demir, A., & Özkaya, B. (2006). Quality and quantity of leachate in aerobic pilot-scale landfills. *Environmental Management*, 38(2), 189.
- [48] Tatsi, A. A., Zouboulis, A. I., Matis, K. A., & Samaras, P. (2003). Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, 53(7), 737-744.
- [49] Tripathy, B. K., & Kumar, M. (2017). Suitability of microwave and microwave-coupled systems for landfill leachate treatment: An overview. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(6), 6165-6178.
- [50] Mojiri, A., Zhou, J. L., Ratnaweera, H., Ohashi, A., Ozaki, N., Kindaichi, T., & Asakura, H. (2021). Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview. *Water Reuse*, 11(1), 66-96.
- [51] Qasim S.R. & Chiang W. (1994). Sanitary Landfill Leachate Generation, *Control and Treatment 6th ed. Technomic*
- [52] Filipkowska, U. (2008). Effect of recirculation method on quality of landfill leachate and effectiveness of biogas production. *Polish Journal of Environmental Studies*, 17(2), 199.
- [53] Aldrawsha, A. A., İsmail, A., Natarajan, R., & İbrahim, O. (2020). Biogas production from waste in a sanitary landfill reactor. *Journal of Thermal Engineering*, 6(6), 298-311.
- [54] Bae, J. H., Cho, K. W., Lee, S. J., Bum, B. S., & Yoon, B. H. (1998). Effects of leachate recycle and anaerobic digester sludge recycle on the methane production from solid wastes. *Water Science and Technology*, 38(2), 159-168.
- [55] Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y., & Al-Rekabi, W. S. (2009). Review on Landfill leachate treatments. *Journal of Applied Sciences Research*, 5(5), 534-545.
- [56] Şan, I., & Onay, T. T. (2001). Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 87(1-3), 259-271.
- [57] Sanphoti, N., Towprayoon, S., Chairprasert, P., & Nopharatana, A. (2006). The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. *Journal of Environmental Management*, 81(1), 27-35.

- [58] Liu, Y., Sun, W., Du, B., & Liu, J. (2018). Leachate Recirculation for Enhancing Methane Generation within Field Site in China. *Hindawi Journal of Chemistry*, 2018, ID 9056561, 7 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/9056561>.
- [59] Ozkaya, B., Demir, A., Basturk, A., & Bilgili, M. S. (2004). Investigation of leachate recirculation effects in Istanbul Odayeri Sanitary Landfill. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 39(4), 873-883.
- [60] Paxéus, N. (2000). Organic compounds in municipal landfill leachates. *Water Science and Technology*, 42(7-8), 323-333.
- [61] Arunbabu, V., Indu, K. S., & Ramasamy, E. V. (2017). Leachate pollution index as an effective tool in determining the phytotoxicity of municipal solid waste leachate. *Waste Management*, 68, 329-336.
- [62] Budi, S., Suliasih, B. A., Othman, M. S., Heng, L. Y., & Surif, S. (2016). Toxicity identification evaluation of landfill leachate using fish, prawn and seed plant. *Waste Management*, 55, 231-237.
- [63] Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 32(4), 297-336.
- [64] Moody, C. M., & Townsend, T. G. (2017). A comparison of landfill leachates based on waste composition. *Waste Management*, 63, 267-274.
- [65] Boonyaroj, V., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., & Yamamoto, K. (2017). Enhanced biodegradation of phenolic compounds in landfill leachate by enriched nitrifying membrane bioreactor sludge. *Journal of hazardous materials*, 323, 311-318.
- [66] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 54-60.
- [67] Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of the Total Environment*, 703, 135468.
- [68] Fernandez, Y., Maranon, E., Castrillón, L., & Vázquez, I. (2005). Removal of Cd and Zn from inorganic industrial waste leachate by ion exchange. *Journal of Hazardous Materials*, 126(1-3), 169-175.
- [69] Torretta, V., Ferronato, N., Katsoyiannis, I. A., Tolkou, A. K., & Airoidi, M. (2017). Novel and conventional technologies for landfill leachates treatment: a review. *Sustainability*, 9(1), 9.
- [70] Ahmed, F. N., & Lan, C. Q. (2012). Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review. *Desalination*, 287, 41-54.
- [71] Assou, M., El Fels, L., El Asli, A., Fakidi, H., Souabi, S., & Hafidi, M. (2016). Landfill leachate treatment by a coagulation–flocculation process: effect of the introduction order of the reagents. *Desalination and Water Treatment*, 57(46), 21817-21826.
- [72] Costa, A. M., Alfaia, R. G. D. S. M., & Campos, J. C. (2019). Landfill leachate treatment in Brazil—An overview. *Journal of environmental management*, 232, 110-116.
- [73] Deng, Y., & Englehardt, J. D. (2006). Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste management*, 27(3), 380-388.
- [74] Shehzad, A., Bashir, M. J., Sethupathi, S., & Lim, J. W. (2015). An overview of heavily polluted landfill leachate treatment using food waste as an alternative and renewable source of activated carbon. *Process safety and environmental protection*, 98, 309-318.
- [75] Naveen, B. P., Sharma, A. K., Sivapullaiah, P. V., Sitharam, T. G., & Narayana, M. A. (2013). Characteristics of the leachate from MSW landfill. In *Silver Jubilee Celebrations of Indian Chapter of IGS-Interenational Symposium "Geosynthetics India"*. 23-25 October.
- [76] Vahabian, M., Hassanzadeh, Y., & Marofi, S. (2019). Assessment of landfill leachate in semi-arid climate and its impact on the groundwater quality case study: Hamedan, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 191(2), 109.
- [77] Abd El-Salam, M. M., & Abu-Zuid, G. I. (2015). Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of advanced research*, 6(4), 579-586.
- [78] Kulikowska, D., & Klimiuk, E. (2008). The effect of landfill age on municipal leachate composition. *Bioresource technology*, 99(13), 5981-5985.
- [79] Labanowski, J., Pallier, V., & Feuillade-Cathalifaud, G. (2010). Study of organic matter during coagulation and electrocoagulation processes: Application to a stabilized landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1-3), 166-172.

- [80] Gálvez, A., Ramos, A., Rodríguez, M. L., & Zamorano, M. (2008). Characterization of the leachate produced in the closed cells of a landfill site at Alhendín (Granada, Spain). *International Conference on Waste Management and the Environment*. May.
- [81] Heyer, K. U., Stegmann, R., & Für Abfallwirtschaft, I. (2001). Leachate management: leachate generation, collection, treatment and costs. *Ingenieurbüro Für Abfallwirtschaft*. Online at: <http://www.ifashamburg.de/pdf/leachate.pdf>.
- [82] Horikoshi, S., Hidaka, H., & Serpone, N. (2003). Hydroxyl radicals in microwave photocatalysis. Enhanced formation of OH radicals probed by ESR techniques in microwave-assisted photocatalysis in aqueous TiO₂ dispersions. *Chemical Physics Letters*, 376(3-4), 475-480.
- [83] Guo, J. S., Abbas, A. A., Chen, Y. P., Liu, Z. P., Fang, F., & Chen, P. (2010). Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 699-705.
- [84] Naveen, B. P., Mahapatra, D. M., Sitharam, T. G., Sivapullaiyah, P. V., & Ramachandra, T. V. (2017). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Environmental Pollution*, 220, 1-12.
- [85] Bhalla, B., Saini, M. S., & Jha, M. K. (2012). Characterization of leachate from municipal solid waste (MSW) landfilling sites of Ludhiana, India: a comparative study. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), 732-745.
- [86] Shouliang, H. U. O., Beidou, X. I., Haichan, Y. U., Liansheng, H. E., Shilei, F. A. N., & Hongliang, L. I. U. (2008). Characteristics of dissolved organic matter (DOM) in leachate with different landfill ages. *Journal of Environmental Sciences*, 20(4), 492-498.
- [87] Kang, K. H., Shin, H. S., & Park, H. (2002). Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. *Water research*, 36(16), 4023-4032.
- [88] Siegert, I., & Banks, C. (2005). The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. *Process Biochemistry*, 40(11), 3412-3418.
- [89] Yang, L., Chen, Z., Yang, J., Liu, Y., Wang, J., Yu, Y., & Gao, X. (2014). Removal of volatile fatty acid in landfill leachate by the microwave-hydrothermal method. *Desalination and water treatment*, 52(22-24), 4423-4429.
- [90] Ren, X., Liu, D., Chen, W., Jiang, G., Wu, Z., & Song, K. (2018). Investigation of the characteristics of concentrated leachate from six municipal solid waste incineration power plants in China. *RSC advances*, 8(24), 13159-13166.
- [91] Kılıç, M. Y., Kestioğlu, K., & Yonar, T. (2007). Landfill leachate treatment by the combination of physicochemical methods with adsorption process. *Journal of biological and environmental sciences*, 1(1), 37-43.
- [92] Kamaruddin, M. A., Yusoff, M. S., Aziz, H. A., & Hung, Y. T. (2015). Sustainable treatment of landfill leachate. *Applied Water Science*, 5(2), 113-126.
- [93] Hu, X., Wang, X., Ban, Y., & Ren, B. (2011). A comparative study of UV-Fenton, UV-H₂O₂ and Fenton reaction treatment of landfill leachate. *Environmental technology*, 32(9), 945-951.
- [94] Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Ulmanu, M., Anger, I., & Marañón, E. (2010). Physico-chemical and biological treatment of MSW landfill leachate. *Waste Management*, 30(2), 228-235.
- [95] Jahan, E., Nessa, A., Hossain, M. F., & Parveen, Z. (2016). Characteristics of municipal landfill leachate and its impact on surrounding agricultural land. *Bangladesh Journal of Scientific Research*, 29(1), 31-39.
- [96] Wang, Z., Peng, Y., Miao, L., Cao, T., Zhang, F., Wang, S., & Han, J. (2016). Continuous-flow combined process of nitrification and ANAMMOX for treatment of landfill leachate. *Bioresour technology*, 214, 514-519.
- [97] Oumar, D., Patrick, D., Gerardo, B., Rino, D., & Ihsen, B. S. (2016). Coupling biofiltration process and electrocoagulation using magnesium-based anode for the treatment of landfill leachate. *Journal of environmental management*, 181, 477-483.
- [98] Xaypanya, P., Takemura, J., Chiemchaisri, C., Seingheng, H., & Tanchuling, M. A. N. (2018). Characterization of landfill leachates and sediments in major cities of Indochina peninsular countries—Heavy metal partitioning in municipal solid waste leachate. *Environments*, 5(6), 65.
- [99] Boumechhour, F., Rabah, K., Lamine, C., & Said, B. M. (2013). Treatment of landfill leachate using Fenton process and coagulation/flocculation. *Water and Environment Journal*, 27(1), 114-119.
- [100] Yadav, J. S., & Dikshit, A. K. (2016). Effect of pretreatment by coagulation on stabilized landfill leachate during anaerobic treatment. *Cogent Environmental Science*, 2(1), 1209993.

- [101] Yarimtepe, C. C., & Oz, N. A. (2015). Enhanced biogas production from landfill leachate by low frequency ultrasound. *WIT Transactions on the Built Environment*, 168, 225-234.
- [102] Taşcı, S., Özgüven, A., & Yıldız, B. (2021). Multi-Response/Multi-Step Optimization of Heterogeneous Fenton Process with Fe₃O₄ Catalyst for the Treatment of Landfill Leachate. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(7), 1-19.
- [103] Peng, Y. (2017). Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2567-S2574.
- [104] Córdova, R. N., Nagel-Hassemer, M. E., Matias, W. G., Muller, J. M., & De Castilhos Junior, A. B. (2019). Removal of organic matter and ammoniacal nitrogen from landfill leachate using the UV/H₂O₂ photochemical process. *Environmental technology*, 40(6), 793-806.
- [105] Kurniawan, T. A., Lo, W. H., & Chan, G. Y. (2006). Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of hazardous materials*, 129(1-3), 80-100.
- [106] Wang, L., Lin, H., Dong, Y., He, Y. (2018). Effects of cropping patterns of four plants on the phytoremediation of vanadium-containing synthetic wastewater. *Ecological Engineering*, 115, 27-34.
- [107] Yong, Z. J., Bashir, M. J., Ng, C. A., Sethupathi, S., Lim, J. W. (2018). A sequential treatment of intermediate tropical landfill leachate using a sequencing batch reactor (SBR) and coagulation. *Journal of environmental management*, 205, 244-252.
- [108] Fukahori, S., Ichiura, H., Kitaoka, T., Tanaka, H. (2003). Capturing of bisphenol A photodecomposition intermediates by composite TiO₂-zeolite sheets. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46(3), 453-462.
- [109] Genç, N., & Durna, E. (2019). Simultaneous optimization of treatment efficiency and operating cost in leachate concentrate degradation by thermal-activated persulfate catalysed with Ag (I): comparison of microwave and conventional heating. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 53(3), 155-170.
- [110] Li, C., & Li, X. Z. (2007). Degradation of endocrine disrupting chemicals in aqueous solution by interaction of photocatalytic oxidation and ferrate (VI) oxidation. *Water Science and Technology*, 55(1-2), 217-223.
- [111] Wei-sheng, D. Z. G. (2012). Treatment of Landfill Leachate via Fenton Oxidation Process Catalyzed by Fe⁻²⁺ Loaded on GAC and Enhanced by Microwave [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 8.
- [112] Amokrane, A., Comel, C., Veron, J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water research*, 31(11), 2775-2782.
- [113] Teh, C. Y., Budiman, P. M., Shak, K. P. Y., & Wu, T. Y. (2016). Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(16), 4363-4389.
- [114] Gandhimathi, R., Durai, N. J., Nidheesh, P. V., Ramesh, S. T., & Kanmani, S. (2013). Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 10(1), 1-7.
- [115] Diamadopoulos, E. (1994). Characterization and treatment of recirculation-stabilized leachate. *Water Research*, 28(12), 2439-2445.
- [116] Chaouki, Z., El Mrabet, I., Khalil, F., Ijjaali, M., Rafqah, S., Anouar, S., & Zaitan, H. (2017). Use of coagulation-flocculation process for the treatment of the landfill leachates of Casablanca city (Morocco). *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(8), 2781-2791.
- [117] Daud, Z., Abd Aziz, A. L., & Mao, L. (2012). Coagulation-Flocculation in Leachate Treatment by Using Ferric Chloride and Alum as Coagulant. *International Journal of Engineering Research and Applications* 2(4).
- [118] Hasar, H., Unsal, S. A., Ipek, U., Karatas, S., Cınar, O., Yaman, C., Kınacı, C. (2009). Stripping/flocculation/membrane bioreactor/reverse osmosis treatment of municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 309-317.
- [119] Erabee, I. K., Ahsan, A., Jose, B., Aziz, M. M. A., Ng, A. W. M., Idrus, S., Daud, N. N. N. (2018). Adsorptive treatment of landfill leachate using activated carbon modified with three different methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1083-1095.
- [120] Patil, N. N., & Shukla, S. R. (2015). Degradation of Reactive Yellow 145 dye by persulfate using microwave and conventional heating. *Journal of Water Process Engineering*, 7, 314-327
- [121] Chou, Y. C., Lo, S. L., Kuo, J., & Yeh, C. J. (2013a). A study on microwave oxidation of landfill leachate—contributions of microwave-specific effects. *Journal of hazardous materials*, 246, 79-86.

- [122] Costa, C., Santos, V. H. S., Araujo, P. H. H., Sayer, C., Santos, A. F., & Fortuny, M. (2009). Microwave-assisted rapid decomposition of persulfate. *European polymer journal*, 45(7), 2011-2016.
- [123] Chou, Y. C., Lo, S. L., Kuo, J., Yeh, C. J. (2013b). Derivative mechanisms of organic acids in microwave oxidation of landfill leachate. *Journal of hazardous materials*, 254, 293-300.
- [124] Lidström, P., Tierney, J., Watheyb, B., Westmana, J. (2001). Microwave assisted organic synthesis: A review. *Tetrahedron*, 57, 9225-9283.
- [125] Thostenson, E. T., Chou, T. W. (1999). Microwave processing: fundamentals and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(9), 1055-1071.
- [126] Remya, N., & Lin, J. G. (2011). Current status of microwave application in wastewater treatment—a review. *Chemical Engineering Journal*, 166(3), 797-813.
- [127] Karthik, P. S., & Singh, S. P. (2015). Conductive silver inks and their applications in printed and flexible electronics. *Rsc Advances*, 5(95), 77760-77790.
- [128] Galindo, L. A., Puillandre, N., Strong, E. E., Bouchet, P. (2014). Using microwaves to prepare gastropods for DNA barcoding. *Molecular Ecology Resources*, 14(4), 700-705.
- [129] Ku, H. S., Siores, E., Taube, A., Ball, J. A. (2002). Productivity improvement through the use of industrial microwave technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2-4), 281-290.
- [130] Li, S., Zhang, G., Wang, P., Zheng, H., Zheng, Y. (2016). Microwave-enhanced Mn-Fenton process for the removal of BPA in water. *Chemical Engineering Journal*, 294, 371-379.
- [131] Li, L., Jing, C., Zuqun, X., Songhu, Y., Menghua, C., Huangcheng, L., Xiaohua, L. (2009). Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation: A pilot-scale study. *Journal of Hazardous Materials*, 168.
- [132] Bi, X., Wang, P., Jiao, C., Cao, H. (2009). Degradation of remazol golden yellow dye wastewater in microwave enhanced ClO₂ catalytic oxidation process. *Journal of hazardous materials*, 168(2-3), 895-900.
- [133] Tsai, H. C., & Lo, S. L. (2011). Boron removal and recovery from concentrated wastewater using a microwave hydrothermal method. *Journal of hazardous materials*, 186(2-3), 1431-1437.
- [134] Dong, S., & Sartaj, M. (2016a). Statistical analysis and optimization of ammonia removal from landfill leachate by sequential microwave/aeration process using factorial design and response surface methodology. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(1), 100-108.
- [135] Dong, S., & Sartaj, M. (2016b). Statistical analysis of thermal and nonthermal effects of sequential microwave/aeration process for the removal of ammonia from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 57(42), 20005-20015.
- [136] Salvi, D., Ortego, J., Arauz, C., Sabliov, C. M., & Boldor, D. (2009). Experimental study of the effect of dielectric and physical properties on temperature distribution in fluids during continuous flow microwave heating. *Journal of food engineering*, 93(2), 149-157.
- [137] Caballero, J. A., Front, R., Marcilla, A., & Conesa, J. A. (1997). Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 40, 433-450.
- [138] Menéndez, J. A., Inguanzo, M., & Pis, J. J. (2002). Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. *Water research*, 36(13), 3261-3264.
- [139] Coelho, N. M. G., Droste, R. L., & Kennedy, K. J. (2014). Microwave effects on soluble substrate and thermophilic digestibility of activated sludge. *Water Environment Research*, 86(3), 210-222.
- [140] Peng, L., Appels, L., & Su, H. (2018). Combining microwave irradiation with sodium citrate addition improves the pre-treatment on anaerobic digestion of excess sewage sludge. *Journal of environmental management*, 213, 271-278.
- [141] Toreci, I., Kennedy, K. J., & Droste, R. L. (2010). Effect of high-temperature microwave irradiation on municipal thickened waste activated sludge solubilization. *Heat Transfer Engineering*, 31(9), 766-773.
- [142] Bougrier, C., Delgenes, J. P., & Carrère, H. (2007). Impacts of thermal pre-treatments on the semi-continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. *Biochemical Engineering Journal*, 34(1), 20-27.
- [143] Wong, W. T., Chan, W. I., Liao, P. H., & Lo, K. V. (2006). A hydrogen peroxide/microwave advanced oxidation process for sewage sludge treatment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 41(11), 2623-2633.
- [144] Xu, X. C., Zhang, H. T., Dong, Z. Y., Fan, Y. F. (2013). Pretreatment of old-age landfill leachate by microwave-assisted catalytic oxidation in the presence of activated carbon. *Environmental technology*, 34(20), 2853-2858.

- [145] Zhang, L., Guo, X., Yan, F., Su, M., & Li, Y. (2007a). Study of the degradation behaviour of dimethoate under microwave irradiation. *Journal of hazardous materials*, 149(3), 675-679.
- [146] Tao, C. Y., Xiang, Y., Liu, R. L., Sun, D. G., & Liu, Z. H. (2006). Comparison experiment of landfill leachate by using microwave and microwave-Fenton reagent [J]. *Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology*, 4.
- [147] Ding, Z., Tan, F., Li, Q., & Qiu, J. (2011). Research on Fenton oxidation treatment of landfill leachate by microwave. *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*. April, pp. 1468-1471.
- [148] Rabah, F. K., & Darwish, M. S. (2012). Characterization of ammonia removal from municipal wastewater using microwave energy: batch experiment. *Environ. Nat. Resour. Res*, 3(1), 42-50.
- [149] Kawala, Z., & Atamańczuk, T. (1998). Microwave-enhanced thermal decontamination of soil. *Environmental science & technology*, 32(17), 2602-2607.
- [150] Zhang, W., Yang, S., Niu, R., Shao, X., Shan, L., Yang, X., & Wang, P. (2010). Microwave-assisted COD removal from landfill leachate by hydrogen peroxide, peroxymonosulfate and persulfate. *4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. June, (pp. 1-4).
- [151] Deng, Y., & Zhao, R. (2015). Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports*, 1(3), 167-176.
- [152] Särkkä, H., Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2015). Recent developments of electro-oxidation in water treatment—a review. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754, 46-56.
- [153] Umar, M., Aziz, H. A., Yusoff, M. S. (2010). Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate. *Waste management*, 30(11), 2113-2121.
- [154] Haapea, P., Korhonen, S., Tuhkanen, T. (2002). Treatment of industrial landfill leachates by chemical and biological methods: ozonation, ozonation+ hydrogen peroxide, hydrogen peroxide and biological post-treatment for ozonated water. *Ozone: Science & Engineering*, 24(5), 369-378.
- [155] Li, N., Wang, P., Liu, Q., & Cao, H. (2010). Microwave enhanced chemical reduction process for nitrite-containing wastewater treatment using sulfaminic acid. *Journal of Environmental Sciences*, 22(1), 56-61.
- [156] Berlin, A. A. (1986). Kinetics of radical-chain decomposition of persulfate in aqueous solutions of organic compounds *Kinet. Catal.* (Engl. Transl). 27(1 PT 1).
- [157] House, D. A. (1962). Kinetics and mechanism of oxidations by peroxydisulfate. *Chemical Reviews*, 62(3), 185-203.
- [158] Huang, K. C., Couttenye, R. A., Hoag, G. E. (2002). Kinetics of heat-assisted persulfate oxidation of methyl tert-butyl ether (MTBE). *Chemosphere*, 49(4), 413-420.
- [159] Koçak, S., Güney, C., Argun, M. T., Tarkin, B., Kirtman, E. Ö., Akgül, D., & Mertoglu, B. (2013). Treatment of landfill leachate by advanced oxidation processes. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 25(2), 51-64.
- [160] Al-Kdasi, A., Idris, A., Saed, K., Guan, C. T. (2004). Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes—a review. *Global nest: the International Journal*, 6(3), 222-230.
- [161] Oliveira, C., Alves, A., & Madeira, L. M. (2014). Treatment of water networks (waters and deposits) contaminated with chlorfenvinphos by oxidation with Fenton's reagent. *Chemical Engineering Journal*, 241, 190-199.
- [162] Duan, P., Pan, J., Du, W., Yue, Q., Gao, B., & Xu, X. (2021). Activation of peroxymonosulfate via mediated electron transfer mechanism on single-atom Fe catalyst for effective organic pollutants removal. *Applied Catalysis B: Environmental*, 299, 120714.
- [163] Gautam, P., Kumar, S., & Lokhandwala, S. (2019). Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117639.
- [164] Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8(3-4), 501-551.
- [165] Tchobanoglu, G., Burton, F., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse* 4th ed. *McGraw-Hill Higher, Boston*, 1819.
- [166] Pera-Titus, M., García-Molina, V., Baños, M. A., Giménez, J., & Esplugas, S. (2004). Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47(4), 219-256.
- [167] Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., & Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis today*, 53(1), 51-59.
- [168] Brillas, E., Sirés, I., & Oturan, M. A. (2009). Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chemical reviews*, 109(12), 6570-6631.

- [169] Cuerda-Correa, E. M., Alexandre-Franco, M. F., & Fernández-González, C. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. An overview. *Water*, 12(1), 102.
- [170] Bo, L., Quan, X., Chen, S., Zhao, H., & Zhao, Y. (2006). Degradation of p-nitrophenol in aqueous solution by microwave assisted oxidation process through a granular activated carbon fixed bed. *Water Research*, 40(16), 3061-3068.
- [171] Chen, J., Xue, S., Song, Y., Shen, M., Zhang, Z., Yuan, T., & Dionysiou, D. D. (2016). Microwave-induced carbon nanotubes catalytic degradation of organic pollutants in aqueous solution. *Journal of hazardous materials*, 310, 226-234.
- [172] Zhang, Z., Shan, Y., Wang, J., Ling, H., Zang, S., Gao, W., & Zhang, H. (2007b). Investigation on the rapid degradation of congo red catalyzed by activated carbon powder under microwave irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1-2), 325-333.
- [173] Quan, X., Zhang, Y., Chen, S., Zhao, Y., & Yang, F. (2007). Generation of hydroxyl radical in aqueous solution by microwave energy using activated carbon as catalyst and its potential in removal of persistent organic substances. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 263(1-2), 216-222.
- [174] Shen, M., Fu, L., Tang, J., Liu, M., Song, Y., Tian, F., & Dionysiou, D. D. (2018). Microwave hydrothermal-assisted preparation of novel spinel-NiFe₂O₄/natural mineral composites as microwave catalysts for degradation of aquatic organic pollutants. *Journal of hazardous materials*, 350, 1-9.
- [175] Wei, R., Wang, P., Zhang, G., Wang, N., & Zheng, T. (2020). Microwave-responsive catalysts for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 382, 122781.
- [176] Qiu, Y., Zhou, J., Cai, J., Xu, W., You, Z., & Yin, C. (2016). Highly efficient microwave catalytic oxidation degradation of p-nitrophenol over microwave catalyst of pristine α -Bi₂O₃. *Chemical Engineering Journal*, 306, 667-675.
- [177] Qiu, Y., & Zhou, J. (2019). Highly effective and green microwave catalytic oxidation degradation of nitrophenols over Bi₂O₂CO₃ based composites without extra chemical additives. *Chemosphere*, 214, 319-329.
- [178] Sun, C., Chen, C., Ma, W., & Zhao, J. (2011). Photodegradation of organic pollutants catalyzed by iron species under visible light irradiation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(6), 1957-1969.
- [179] Xu, D., Lai, X., Guo, W., & Dai, P. (2017a). Microwave-assisted catalytic degradation of methyl orange in aqueous solution by ferrihydrite/maghemite nanoparticles. *Journal of water process engineering*, 16, 270-276.
- [180] Zhang, M. H., Dong, H., Zhao, L., & Wang, D. X., Meng, D. (2019). A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of the Total Environment*, 670, 110-121.
- [181] Bokare, A. D., & Choi, W. (2014). Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 275, 121-135.
- [182] Sharma, A., Ahmad, J., & Flora, S. J. S. (2018). Application of advanced oxidation processes and toxicity assessment of transformation products. *Environmental Research*, 167, 223-233.
- [183] Fernandes, A., Labiadh, L., Ciriaco, L., Pacheco, M. J., Gadri, A., & Ammar, S., Lopes, A. (2017). Electro-Fenton oxidation of reverse osmosis concentrate from sanitary landfill leachate: Evaluation of operational parameters. *Chemosphere*, 184, 1223-1229.
- [184] Xu, J., Long, Y., Shen, D., Feng, H., & Chen, T. (2017b). Optimization of Fenton treatment process for degradation of refractory organics in pre-coagulated leachate membrane concentrates. *Journal of hazardous materials*, 323, 674-680.
- [185] Deng, J., Shao, Y., Gao, N., Deng, Y., Zhou, S., & Hu, X. (2013). Thermally activated persulfate (TAP) oxidation of antiepileptic drug carbamazepine in water. *Chemical Engineering Journal*, 228, 765-771.
- [186] Anipsitakis, G. P., Dionysiou, D. D. (2004). Radical generation by the interaction of transition metals with common oxidants. *Environmental Science & Technology*, 38(13), 3705-3712.
- [187] Ghanbari, F., & Moradi, M. (2017). Application of peroxymonosulfate and its activation methods for degradation of environmental organic pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 310, 41-62.
- [188] Hu, P., & Long, M. (2016). Cobalt-catalyzed sulfate radical-based advanced oxidation: a review on heterogeneous catalysts and applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 181, 103-117.
- [189] Abramovitch, R. A., Bangzhou, H., Abramovitch, D. A., & Jiangaio, S. (1999). In situ decomposition of PAHs in soil and desorption of organic solvents using microwave energy. *Chemosphere*, 39(1), 81-87.
- [190] Qi, C., Liu, X., Lin, C., Zhang, X., Ma, J., Tan, H., & Ye, W. (2014). Degradation of sulfamethoxazole by microwave-activated persulfate: kinetics, mechanism and acute toxicity. *Chemical Engineering Journal*, 249, 6-14.

- [191] Qi, C., Liu, X., Lin, C., Zhang, H., Li, X., & Ma, J. (2017). Activation of peroxymonosulfate by microwave irradiation for degradation of organic contaminants. *Chemical Engineering Journal*, 315, 201-209.
- [192] Tripathy, B. K., & Kumar, M. (2019). Sequential coagulation/flocculation and microwave-persulfate processes for landfill leachate treatment: Assessment of bio-toxicity, effect of pretreatment and cost-analysis. *Waste Management*, 85, 18-29.
- [193] Bolong, N., Ismail, A. F., Salim, M. R., Rana, D., Matsuura, T., & Tabe-Mohammadi, A. (2010). Negatively charged polyethersulfone hollow fiber nanofiltration membrane for the removal of bisphenol A from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 73(2), 92-99.
- [194] Wang, N., Zheng, T., Jiang, J., Wang, P. (2015). Cu (II)-Fe (II)-H₂O₂ oxidative removal of 3-nitroaniline in water under microwave irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 260, 386-392.
- [195] Cheng, G., Lin, J., Lu, J., Zhao, X., Cai, Z., Fu, J. (2015). Advanced treatment of pesticide-containing wastewater using Fenton reagent enhanced by microwave electrodeless ultraviolet. *BioMed research international*, 2015.
- [196] Bradu, C., Frunza, L., Mihalche, N., Avramescu, S. M., Neață, M., Udrea, I. (2010). Removal of Reactive Black 5 azo dye from aqueous solutions by catalytic oxidation using CuO/Al₂O₃ and NiO/Al₂O₃. *Applied Catalysis B: Environmental*, 96(3-4), 548-556.
- [197] Kim, J. R., Huling, S. G., & Kan, E. (2015). Effects of temperature on adsorption and oxidative degradation of bisphenol A in an acid-treated iron-amended granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 262, 1260-1267.
- [198] Pan, W., Zhang, G., Zheng, T., & Wang, P. (2015). Degradation of p-nitrophenol using CuO/Al₂O₃ as a Fenton-like catalyst under microwave irradiation. *RSC advances*, 27043-27051.
- [199] Chou, Y. C., Lo, S. L., Kuo, J., & Yeh, C. J. (2015). Microwave-enhanced persulfate oxidation to treat mature landfill leachate. *Journal of hazardous materials*, 284, 83-91.
- [200] Yeh, C. J., Lo, S. L., Kuo, J., & Chou, Y. C. (2018). Optimization of landfill leachate treatment by microwave oxidation using the Taguchi method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(10), 2075-2086.
- [201] Jiang, B. H., Zhao, Y., Jin, Y., Hu, X. M., Jiang, L., & Li, X. M. (2012). Study on coupled oxidation and microwave process in treating urban landfill leachate by fenton and fenton-Like reaction. *Advanced Materials Research*, 393, pp. 1443-1446.
- [202] Kim, Y. B., & Ahn, J. H. (2016). Microwave-assisted decomposition of landfill leachate with persulfate. *Journal of Environmental Engineering*, 142(3), 04015084.
- [203] Chen, W., Zhang, A., Gu, Z., & Li, Q. (2018). Enhanced degradation of refractory organics in concentrated landfill leachate by Fe⁰/H₂O₂ coupled with microwave irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 354, 680-691.
- [204] Wang, J., Ma, X. P., Tang, F. D., Yang, C. L., Li, Y., & Guo, B. (2011). Study on pretreatment of landfill leachate by microwave-assisted catalytic oxidation process. *China Environmental Science*, 31(7), 1166-1170.
- [205] Na, L. I., Xiaoming, L. I., Qi, Y. A. N. G., Xian, L., & XiuQiong, W. (2014). Landfill leachate treatment by microwave-enhanced persulfate oxidation process using activated carbon as catalyst. *China Environmental Science*, 34(1), 91-96.
- [206] Chian, E. S., & Dewalle, F. B. (1976). Sanitary landfill leachates and their treatment. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 102(2), 411-431.
- [207] Vishnuganth, M. A., Remya, N., Kumar, M., & Selvaraju, N. (2017). Carbofuran removal in continuous-photocatalytic reactor: reactor optimization, rate-constant determination and carbofuran degradation pathway analysis. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 52(5), 353-360.
- [208] Wang, J., Liao, Z., Ifthikar, J., Shi, L., Du, Y., Zhu, J., & Chen, Z. (2017). Treatment of refractory contaminants by sludge-derived biochar/persulfate system via both adsorption and advanced oxidation process. *Chemosphere*, 185, 754-763.

Derleme Makalesi - Review Article

A Review on Machine Learning Techniques Used in VANET and FANET Networks

VANET ve FANET Ağlarda Kullanılan Makine Öğrenimi Teknikleri Üzerine İnceleme

Sumeyra Muti^{1*}, Eyüp Emre Ülkü²

Geliş / Received: 13/04/2022

Revize / Revised: 16/11/2022

Kabul / Accepted: 16/11/2022

ABSTRACT

The widespread use of the Internet and the increase in the number and variety of devices connected to the internet have led to the emergence of new methods in wireless communication. Dynamic and temporary Ad-Hoc networks, which do not require a fixed infrastructure as in traditional wireless network communication, are one of these new methods. The fact that Ad-Hoc networks do not need a fixed infrastructure has revealed a network structure with a lower cost and less configuration. Mobile Ad-Hoc networks play an important role, especially in the communication of nodes on the move. FANET (Flying Ad-Hoc Networks) networks, which are called flying ad hoc networks, are mobile Ad-Hoc networks used for communication of unmanned aerial vehicles (UAV), and VANET (Vehicular Ad-Hoc Networks) networks, which are called vehicular ad hoc networks, are mobile Ad-Hoc networks used for communication of road vehicles. The development and dissemination of these networks make a significant contribution to the development of autonomous vehicles and UAVs. The increase in the use of FANET and VANET networks, which are specialized subnets of mobile Ad-Hoc networks, and the increase in the number of nodes in these networks have caused problems related to security, efficiency, and sustainability in these networks. Machine learning methods, one of today's effective and common approaches, are one of the ways that are frequently used in solving the problems specified in FANET and VANET networks. The rapid topology change, which is one of the most important features of these networks, makes it difficult to provide traffic management, trust management, routing, and data transmission. In this direction, machine learning approaches play an active role. In this study, it is presented by examining which machine learning techniques are used in the literature to perform important tasks such as traffic management, trust management, routing, and data transfer. Thus, it is aimed for those who will work in these fields to acquire information about machine learning approaches that can be used. Since the FANET network type is a new approach, it has been observed that there are few studies using machine learning. In VANET systems, studies using machine learning methods are especially intense in 2021. This study was carried out to give the reader an idea about which machine learning methods can be used in which problems in FANET and VANET networks.

Keywords- *Ad Hoc, Wireless Communication, VANET, FANET, Machine Learning*

^{1*}Corresponding Author Contact: sumeyramuti@marun.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6489-0258>)

Institute of Pure and Applied Sciences Department of Computer Engineering, Marmara University, Istanbul, Turkey

² Contact: emre.ulku@marmara.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1985-6461>)

Faculty of Technology Department of Computer Engineering, Marmara University, Istanbul, Turkey

ÖZ

İnternetin yaygınlaşması ve internete bağlı cihaz sayısı ve çeşitliliğinin artması kablosuz iletişimde yeni yöntemlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Geleneksel kablosuz ağ iletişimde olduğu gibi sabit bir alt yapı gereksinimi olmayan dinamik ve geçici Ad-Hoc ağlar bu yeni yöntemlerden bir tanesidir. Ad-Hoc ağların sabit bir altyapıya ihtiyaç duymamaları daha düşük maliyetli ve daha az konfigürasyona ihtiyaç duyan bir ağ yapısını ortaya koymuştur. Özellikle hareket halindeki düğümlerin haberleşmesinde mobil Ad-Hoc ağlar önemli rol oynamaktadır. Uçan tasarsız ağlar olarak adlandırılan FANET (Flying Ad-Hoc Networks) ağlar insansız hava araçlarının (İHA) haberleşmesini, araçsal tasarsız ağlar olarak adlandırılan VANET (Vehicular Ad-Hoc Networks) ağlar ise karayolu araçlarının haberleşmesini sağlamada kullanılan mobil Ad-Hoc ağlardır. Bu ağların gelişimi ve yaygınlaşması otonom araçların ve İHA' ların gelişimine önemli katkı sağlamaktadır. Mobil Ad-Hoc ağların özelleşmiş alt ağları olan FANET ve VANET ağlarının kullanımının artması ve bu ağlar içerisinde yer alan düğüm sayılarındaki artış bu ağlarda güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik ile ilgili problemlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Günümüzün etkin ve yaygın yaklaşımlarından biri olan makine öğrenmesi yöntemleri FANET ve VANET ağlarda belirtilen problemlerin çözümünde sıklıkla başvurulan yollardan bir tanesidir. Bu ağların en önemli özelliklerinin başında gelen hızlı topoloji değişimi trafik yönetiminin, güven yönetiminin, yönlendirmelerin ve veri iletiminin sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu doğrultuda makine öğrenmesi yaklaşımları etkin rol oynamaktadır. Bu çalışmada, literatürde trafik yönetimi, güven yönetimi, yönlendirme ve veri transferi gibi önemli görevleri gerçekleştirmede hangi makine öğrenmesi tekniklerinin kullanıldığı incelenerek sunulmuştur. Böylelikle bu alanlarda çalışacakların kullanılabilecek makine öğrenimi yaklaşımları ile ilgili bilgileri edinmeleri hedeflenmiştir. FANET ağ türünün yeni bir yaklaşım olması nedeniyle makine öğrenimi yaklaşımlarının kullanıldığı az sayıda çalışma olduğu gözlemlenmiştir. VANET sistemlerde ise makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar özellikle 2021 yılında yoğunluk göstermektedir. Bu çalışma, FANET ve VANET ağlarda hangi problemlerde hangi makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılabileceği hakkında okuyucuya fikir vermek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Tasarsız Ağlar, Kablosuz Haberleşme, VANET, FANET, Makine Öğrenmesi*

I. INTRODUCTION

In wireless networks, there are two basic approaches to providing wireless connectivity between hosts. The first of these is based on an established cellular network infrastructure. The first approach is the network structure, which requires an infrastructure such as a base station. An example of this approach is cellular network infrastructure. Cellular network structure is one of the most important examples of this type of wireless networks. The second approach is ad hoc networks, which is an arbitrary and temporary network structure that does not need infrastructure support, that we also examine in this study. We will present a literature review about Machine Learning (ML) algorithms used in Vehicular Ad-Hoc Networks (VANET), which is a specialized sub-branch for vehicles, of networks that provides communication between mobile nodes, defined as MANET and Flying Ad-Hoc Networks (FANET), which is another specialized sub-branch for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) of MANET [1].

The most important feature of Ad-Hoc networks is that they do not need an infrastructure support such as a base station. Thus, nodes that need to communicate with each other can have a low cost and fast communication network. In recent years, technological developments in autonomous vehicles, the concept of the Internet of Things (IoT), and unmanned aerial vehicles (UAVs) have increasingly given importance to ad hoc networks. In this direction, vehicles that need to communicate with each other have led to the emergence of VANET networks, and UAVs to FANET networks. Both of these networks are a specialized type of mobile ad-hoc networks. The widespread use of these networks and the increase in the number of nodes in these networks have caused various problems. Routing, traffic management, data transmission are among these problems. The rapid topology change experienced by the movement of many nodes in these networks has accelerated the search for faster and more efficient solutions, especially in routing and data transmission. In recent years, machine learning algorithms have also been used in VANET and FANET networks to perform tasks such as routing, data transmission, trust management and traffic management more efficiently and faster. In this study, studies in the

literature using machine learning approach in VANET and FANET networks were examined. While examining these studies, it is presented which machine learning approaches are used while performing which task in VANET and FANET networks.

VANETs used in road vehicles consist of three components: Application Unit (AU), On-Board Unit (OBU) and Roadside Unit (RSU). OBU are wireless structure that are usually mounted on the vehicle and enable the vehicle to communicate with another vehicle or RSU. AU is the in-vehicle structure that provides applications with the information it receives through the OBU. RSUs are on-road units that provide various status information or internet access to vehicles that are in communication with the vehicles' OBUs [2]. Rapid advances in autonomous vehicles, 5G and IoT technologies increase the need for a large number of nodes to communicate with each other quickly. Each concept such as traffic light, traffic sign, vehicle, parking lot becomes a separate node. In this case, it makes it very important for these nodes to establish a temporary connection with each other. Therefore, operations such as routing, trust management and traffic management within VANET networks require much more efficient and faster execution.

FANETs, on the other hand, are vehicle ad hoc networks that allow unmanned aerial vehicles (UAVs) to communicate with each other in real time. Location information sharing (LIS) in FANETs allows a large number of UAVs to be aware of each other and thus to make a safe flight [3-4]. In recent years, there are many tasks where UAVs are used, especially in military applications. In addition, UAVs are also used in various civil applications such as post-disaster aid and communication [5].

Machine learning methods are used to solve various problems in VANET and FANET systems. Machine learning methods especially in VANET systems are used in routing algorithms for a safe, fast and efficient data transfer, in intrusion detection systems (IDS) to prevent attacks such as DoS (Denial of Service Attack), DDoS (Distributed Denial of Service Attack), Sybil, blackhole and fake location information, in various clustering problems, traffic control applications.

In this study, it is aimed to inform the reader about which machine learning methods can produce more successful results in solving which problems in studies carried out after 2019. We have gathered the studies in which machine learning methods are used to solve some basic problems for VANET and FANET systems under five main headings as "Trust Management", studies in which machine learning is used to prevent attacks that threaten VANET and FANET networks, "Routing Algorithms", "Data Transmission", "Traffic Management" and "Other".

In Section II, we will explain which databases we used for our research, our search method, and how we included the results we found in our research. In Section III, we will analyze the studies we have selected for review. In Section IV, we will share information about what the machine learning methods used in these studies are, which problem they are used to solve, and what results have been achieved.

II. METHODS

We obtained the studies that we will examine in this article by using the query expressions we determined through the Scopus, IEEE and Science Direct databases, which are among the most popular and frequently used databases. We then rearranged our results according to our inclusion and exclusion criteria to determine whether they were appropriate for our study. Our inclusion criteria are that the studies are related to VANET or FANET concepts, developed using machine learning algorithms, written language is English and published after 2019. Studies in which the full text cannot be reached, do not match the research title, and where machine learning techniques are not applied to VANET or FANET networks are excluded. These inclusion and exclusion criteria are presented below. Due to the rapid change of currency in computer science, we have included studies done after 2019 in order to address more current studies within the study.

Inclusion;

- Studies must have keywords belonging to machine learning algorithms.
- Studies must be related to VANET or FANET.
- The language of writing must be English.
- Studies must be 2019 and later publications.

Exclusion;

- The full text of the studies could not be reached
- Studies do not suitable for our research topic
- Studies do not provide experimental data.
- Used machine learning methods in studies have not been applied in VANET or FANET.

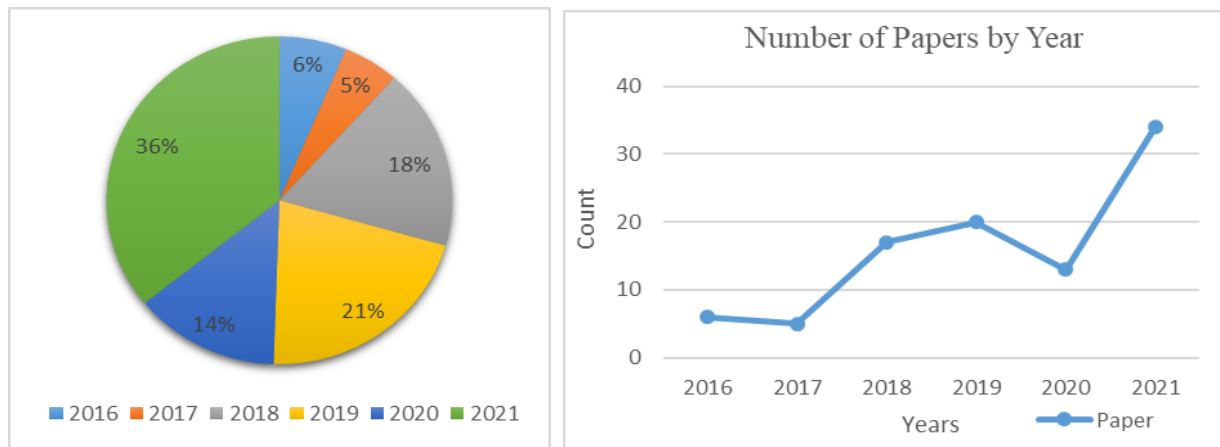
With the search queries listed in Table 1, we reached a total of 242 results for VANET and 15 results for FANET in IEEE and Scopus. Since we found very few results related to FANET, we additionally searched the ScienceDirect database and found 85 results. However, we found that the majority of these results were either related to only ML or only to FANET, and we eliminated irrelevant studies. When we eliminated those results that were not suitable for our study, there were 5 studies left to be examined and we have shown this value as the result in Table 1.

Table 1. Search queries and results

Subject	Database	Search Query	Results
VANET	IEEE	("All Metadata":machine learning) AND ("All Metadata":vanet)	129
	Scopus	TITLE-ABS-KEY(Machine Learning Algorithms Vanet)	113
FANET	IEEE	("All Metadata":FANET) AND ("All Metadata":machine learning)	8
	Scopus	TITLE-ABS-KEY (machine AND learning AND fanet)	7
	ScienceDirect	Fanet, Machine Learning	5

We examined whether the studies we obtained had at least one of the keywords including “Machine Learning (ML)”, “Deep Learning (DL)”, “Support Vector Machine(SVM)”, “Neural Network (NN)”, “Reinforcement Learning (RL)”, “K-Nearest neighbor (KNN)”, “Q-learning”, “Artificial Neural Networks (ANN)”, “Convolutional Neural Networks (CNN)”, “Bayesian model”, “Naive Bayes (NB)”, “Random Forrester (RF)”, “Decision Tree (DT)” and removed those that did not have any of these keywords from our research area. Then, we eliminated the duplicate studies in different databases. Finally, after performing another elimination process according to our inclusion and exclusion criteria, we selected 37 studies for VANET and 5 studies for FANET for detailed review.

In Figure 1, the graphs of the distribution of the studies we obtained as a result of the search queries by years are given. In the graphs in Figure 1, only the distribution of studies on VANET by years is given, and it is observed that the number of researches in this field has increased significantly with more than 30 studies in 2021.



a) Percentage distribution of papers by years

b) Variation in the total number of papers by years

Figure 1. Using ML for VANET by years

As can be seen from the pie chart, 36% of the studies made since 2016 belong to 2021. These data show that there has been a significant increase trend in studies using machine learning approaches in VANET networks in recent years.

A density map of which countries the studies we examined belong to is given in Figure 2. The size of the blue dots indicating the studies on the VANET shows the density in that region. Studies on FANET are shown in red and density is indicated by color darkness. Table 2 presents the numerical distribution of the studies we examined by country. In the studies we examined, India was the country with the highest number of publications with nine articles. It is followed by China and the USA with five articles each.

Table 2. Number of studies reviewed by country

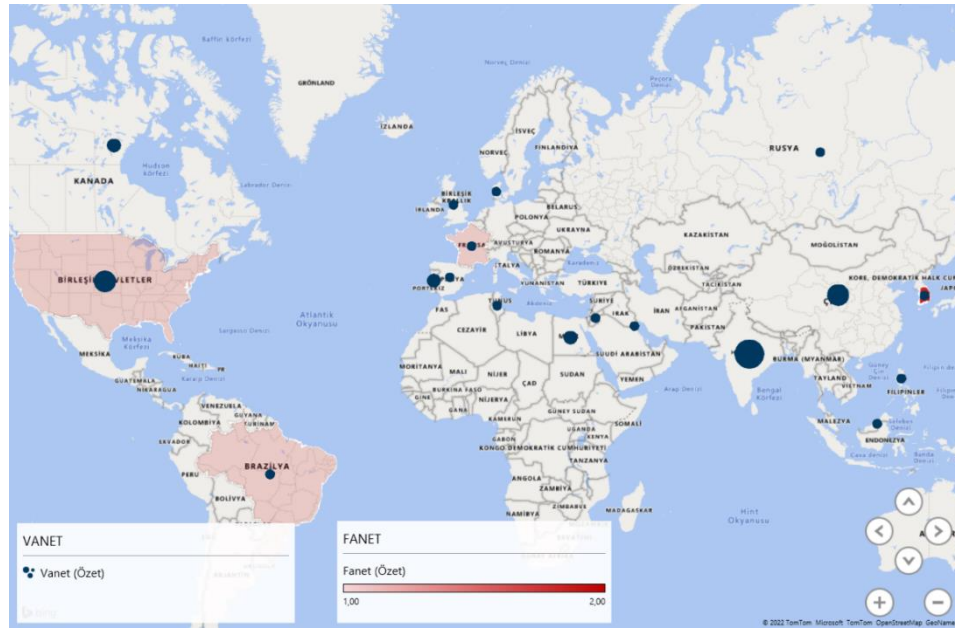


Figure 2. Distribution of reviewed studies by country

Country	VANET	FANET
America	5	1
Brazil	1	1
China	5	
Denmark	1	
Philippines	1	
France	1	1
South Korea	1	2
India	9	
Spain	1	
Canada	2	
Kuwait	1	
Malaysia	1	
Egypt	2	
Portugal	2	
Russia	1	
Tunisia	1	
Jordan	1	
United Kingdom	1	

III. MACHINE LEARNING METHODS USED IN VANET AND FANET

As a result of the examinations, while there are many studies on VANET, the number of studies on FANET is very few. In the studies reviewed, the use of machine learning methods in trust management in order to protect VANETs against attacks has been the subject of more research than other subjects. As in many areas of computer science, security is one of the most important problems in ad-hoc networks. It has been seen that machine learning approaches are a frequently used way in recent years against network attacks that may come from outside in VANET and FANET networks. The most commonly used ML methods in studies on VANET and FANET networks are SVM, kNN, RF methods. A general table of all the studies examined is given in Table 3, and sub-tables related to the subject are given in each subject heading.

Table 3. Studies examined according to their subjects and machine learning methods used

Source	Year	ML method	Subject	Country	FANET/VANET
[6]	2021	SVM	Routing	China	VANET
[7]	2021	Q-learning	Routing	Brazil	FANET
[8]	2021	SVM, k-NN	Trust Management	Amerika	VANET
[9]	2021	Q-learning	Routing	South Korea	FANET
[10]	2021	SVM, KNN	Trust Management	India	VANET
[11]	2021	SVM	Traffic Management	China	VANET
[12]	2021	KNN, RF, NB, DT	Trust Management	Canada	VANET
[13]	2021	RF	Trust Management	France	FANET
[14]	2021	FSVM, krill herd	Trust Management	India	VANET
[15]	2021	ML	Trust Management	Portugal	VANET
[16]	2021	ANN	Routing	Spain	VANET
[17]	2021	RF	Trust Management	India	VANET
[18]	2021	DL	Routing	India	VANET
[19]	2021	ML	Trust Management	Egypt	VANET
[20]	2021	ML	Traffic Management	Kuwait	VANET
[21]	2021	SVM	Trust Management	Jordan	VANET
[22]	2021	Federate ML	Trust Management	USA	VANET
[23]	2021	RF, kNN	Trust Management	France	VANET
[24]	2021	SVM	Trust Management	Philippines	VANET
[25]	2021	DT, LR, GNB, RF	Routing	South Korea	VANET
[26]	2021	kNN, RF, SVM	Trust Management	Russia	VANET
[27]	2021	DML	Trust Management	India	VANET
[28]	2021	RF	Trust Management	Denmark	VANET
[29]	2021	NN	Data Transmission	USA	VANET
[30]	2021	ANN	Trust Management	Portugal	VANET
[31]	2021	Bayes	Data Transmission	Malaysia	VANET
[32]	2021	Fuzzy Logic	Routing	South Korea	FANET
[33]	2021	Federate ML	Other	Amerika	FANET
[34]	2020	ELM	Trust Management	Brazil	VANET
[35]	2020	SVM, KNN, RF	Trust Management	Tunisia	VANET
[36]	2020	SVM	Data Transmission	China	VANET

Table 4. (Continues)

Source	Year	ML method	Subject	Country	FANET/VANET
[37]	2020	SVM Kernel	Trust Management	India	VANET
[38]	2020	DL	Data Transmission	USA	VANET
[39]	2020	RF, SVM	Traffic Management	India	VANET
[40]	2019	ML	Trust Management	Amerika	VANET
[41]	2019	Q-learning	Data Transmission	UK	VANET
[42]	2019	RF, AdaBoost	Traffic Management	India	VANET
[43]	2019	CNN	Traffic Management	China	VANET
[44]	2019	O-PNN	Traffic Management	Canada	VANET
[45]	2019	DRL	Other	China	VANET
[46]	2019	RF	Other	India	VANET
[47]	2019	OS-ELM	Traffic Management	Egypt	VANET

A. Trust Management

The rapid change of topology in VANET networks also complicates the implementation of security mechanisms. In this case, it causes various security vulnerabilities to occur in these networks. Cryptology techniques, which are one of the most frequently used ways to ensure security, are also used in this type of networks. However, the use of cryptology techniques sometimes requires significant processing power. Sometimes processing power can be a significant constraint for nodes in VANET networks. Against this limitation, an extra layer of security can be created with intrusion detection systems (IDS) [15]. Apart from these methods, there are ML-based approaches developed to ensure trust management and prevent various attacks in VANET networks. These approaches are presented under this title. ML-based solutions developed to provide a solution to the trust management problem are examined and presented in Table 4. Especially in VANET networks, SVM, RF and KNN are the most commonly used machine learning methods to ensure trust management and make the network more secure.

H. Mankodiya et al. aimed to detect defective data by using ML algorithms (RF, DT, Adaboost) in data transmission within the scope of trust management. Decision tree-based algorithms were used to classify offensive AVs (autonomous vehicles) that sent false or malicious information, and the RF algorithm performed better in the test set. As a result, 98.5% accuracy score was obtained in the VeRiMi dataset [17].

Table 5. Studies examined for trust management

Source	Year	ML method	Subject	Country	FANET/VANET
[8]	2021	SVM, k-NN	Trust Management	Amerika	VANET
[10]	2021	SVM, KNN	Trust Management	India	VANET
[12]	2021	KNN, RF, NB, DT	Trust Management	Canada	VANET
[13]	2021	RF	Trust Management	France	FANET
[14]	2021	FSVM, krill herd	Trust Management	India	VANET
[15]	2021	ML	Trust Management	Portugal	VANET
[17]	2021	RF	Trust Management	India	VANET
[19]	2021	ML	Trust Management	Egypt	VANET
[21]	2021	SVM	Trust Management	Jordan	VANET
[22]	2021	Federate ML	Trust Management	USA	VANET
[23]	2021	RF, kNN	Trust Management	France	VANET
[24]	2021	SVM	Trust Management	Philippines	VANET
[26]	2021	kNN, RF, SVM	Trust Management	Russia	VANET
[27]	2021	DML	Trust Management	India	VANET
[28]	2021	RF	Trust Management	Denmark	VANET
[30]	2021	ANN	Trust Management	Portugal	VANET
[34]	2020	ELM	Trust Management	Brazil	VANET
[35]	2020	SVM, KNN, RF	Trust Management	Tunisia	VANET
[37]	2020	SVM Kernel	Trust Management	India	VANET
[40]	2019	ML	Trust Management	Amerika	VANET

A. R. GAD et al. used machine learning methods such as RF, DT, kNN, SVM, XGBoost on the network data of the ToN-IoT data set for attack detection and observed that the XGBoost algorithm gave the most successful results in binary and multiple classification problems. In addition, the effects on the success of the system of using Chi2 and SMOTE pre-processing techniques separately and together were compared [19].

SVM, which is one of the algorithms that gives successful results in predictive applications, is used in studies within the scope of trust management. A. Alsarhan et al. examined the optimization of three different ML algorithms, Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), on SVM to classify attacks in the NSL-KDD dataset and found that GA was more successful than the others [21]. In another study, J. D. Cabelin et al. designed an SVM-based IDS to detect false data injection (FDI) attack. The data set obtained from a one-way four-lane highway simulation using MATLAB and NS-3 was tested in the SVM-based IDS model and it was concluded that it has high accuracy in detecting malicious information. The system has also been shown to reduce traffic congestion by reducing malicious packets [24].

I. Bolodurina et al. examined the efficiency of various ML algorithms in identifying new features to increase the efficiency of ML methods used in intrusion detection applications in VANETs. As a result, it was seen that most ML methods increased the accuracy by an average of 0.137%, while the RF method was found to decrease the efficiency by 0.53% [26].

G. Raja et al. propose a secure and private collaborative intrusion detection system (SP-CIDS) using distributed machine learning (DML) that leverages the potential of V2V (Vehicle to Vehicle) collaboration in the learning process to improve the accuracy, storage efficiency, and scalability of IDS. The model is evaluated with LR, NB, and ensemble classifiers, and as a result, 96.94% accuracy is obtained with the training data secured with differential privacy [27].

It is important to effectively evaluate the information received from VANETs in IDS systems. F. Gonçalves et al. evaluated the effects of publicly available VANET data on IDS systems at four different levels: vehicle, RSU, cluster, and all using the ANN method [30].

Drones can face various attacks from within the network and from outside. C. Guerber et al. propose an SDN solution for external threats and an RF classifier-based ML solution for intra-network attacks. As a result, they observed that the proposed system was successful in detecting abnormal behavior [13].

New methods using machine learning are introduced to detect some specific types of attacks encountered in VANETs. M. T. Garip et al. presented SHIELDNET, in which they use ML algorithms for the detection of a vehicle botnet communication protocol called GHOST, which endanger traffic safety in VANETs. According to the simulation results, they showed that the proposed framework correctly identified 77% of the bots [40].

We have classified the studies on the prevention of DoS, DDoS, Sybil, blackhole attacks and location spoofing, which are some types of attacks frequently encountered in VANETs, under separate headings.

1) DoS and DDOS Attacks:

Distributed denial-of-service (DDoS) attacks are known as attacks where several tools perform various denial-of-service (DoS) attacks to disrupt the normal functioning of the network in VANETs. Detection and prevention of DDoS attacks in VANET is very important because these attacks endanger human life. There are various studies carried out for this purpose.

In the work of Gonçalves et al., a four-stage hierarchical intrusion detection system using a different ML method at each stage is proposed with the data obtained using Simulation of Urban Mobility (SUMO) and Network Simulator (ns-3). According to the results obtained, it was observed that it was successful in detecting DoS and non-attack messages, but the performance decreased in detecting other attack types [15].

D. C. Ananth et al. proposed the FLC-OFSVM model, which provides an efficient fuzzy logic-based clustering with optimal fuzzy support vector machine to ensure security and communicate effectively. This model consists of two processes as intrusion detection and clustering in VANETs. FLC was used to select the appropriate cluster head, and an optimized FSVM with the krill herd algorithm was used for the IDS stage. The effectiveness of OF SVM was tested in the NSL-KDD 2015 dataset and it was seen that the proposed model gave successful results [14].

Another study for the detection of DDoS attacks proposes the KSVM model as a hybrid model based on KNN and SVM algorithms. Compared to SVM, KNN, DT, ANN, this model has the highest accuracy and sensitivity values, as well as the lowest error rate [10].

M. Zang and Y. Yan proposed an IDS framework in which anomalous flows are labeled with an RF classifier using real data in the Mininet-Wifi emulator. The results showed that the model's prediction accuracy in DoS/DDoS attacks was high and the false positive rate was low [28].

Adhikary et al. presented a hybrid detection algorithm based on SVM kernel methods to detect DDoS attacks in VANETs. The performance of the model based on the proposed hybrid algorithm is compared with the models based on SVM kernel algorithms. Experimental results have shown that the proposed hybrid algorithm-based model is more successful in detecting DDoS attacks compared to single SVM core algorithms. The results also proved that an efficient and effective hybrid algorithm can be developed by combining SVM kernel algorithms [37].

2) Black Hole Attacks:

In the studies of A. Acharya and J. Oluoch developed a model in which logistic regression, k-NN, Gaussian Naive Bayes, SVM, Gradient Boost methods are applied to prevent blackhole attacks, which are an example of DDoS attacks. The ROC AUC performance score was found to be an average of 96.78% for these five methods [8].

3) Sybil Attacks:

In their work, A. Haddaji et al. proposed a Blockchain Multi Levels Trust mechanism against Sybil Attacks (BMLT-SA) to prevent Sybil attacks that threaten the security of VANET by creating multiple false

identities. In their study, they used SVM, kNN and RF algorithms to classify malicious and normal nodes. Simulation results show that the proposed method is successful in detecting Sybil attacks [35].

Quevedo et al. proposed a structure called SyDVLM, which uses the Extreme Learning Machine (ELM) method to prevent Sybil attacks. The results showed that this new proposed model has a high detection rate with very low error rates and provides a scalable detection system [34].

4) Location Spoofing

Another problem related to VANET is location spoofing. Incorrect delivery of vehicle location information to other vehicles may cause accidents. In their studies, A. Sharma and A. Jaekel tested k-NN, Random Forest, Naive Bayes and Decision Tree algorithms to detect such attacks and it was seen that the best results were k-NN and Random Forest algorithms [12].

In the study of A. Uprety et al., it is aimed to prevent location spoofing in VANETs by using Federated ML on VeReMi dataset. At the same time, in this study, central education and federated education were compared and it was observed that federated education gave acceptable results [22].

S. Ercan et al., a study was conducted to determine whether a vehicle exhibits misbehavior by using kNN and RF algorithms in the VeReMi dataset. As a result, it was seen that the proposed approach increased the misbehavior detection performance [23].

B. Data Transmission

Factors such as the dynamic nature of VANET networks, fast topology change, bandwidth and spectrum constraints are the reasons for the difficulties encountered in data transmission. Creating clustering algorithms plays an important role to ensure secure and fast data transmission. In this direction, ML-based approaches used in VANET networks in order to provide a safer and faster data transmission are presented in Table 5.

Table 6. Studies examined for data transmission

Source	Year	ML method	Subject	Country	FANET/VANET
[29]	2021	NN	Data Transmission	USA	VANET
[31]	2021	Bayes	Data Transmission	Malaysia	VANET
[36]	2020	SVM	Data Transmission	China	VANET
[38]	2020	DL	Data Transmission	USA	VANET
[41]	2019	Q-learning	Data Transmission	UK	VANET

In their work, M. A. Hossain et al. introduced a hybrid segment-based CR-VANET (Seg-CR-VANET) architecture that combines fuzzy logic and Bayesian algorithms to solve the spectrum scarcity problem and offer a better data transmission. As a result, when compared to previous studies, it has been seen that the proposed model gives successful results with better spectrum detection, better packet delivery ratio (PDR), higher accuracy, lower packet loss and lower delays [31].

There are studies in which ML methods are used to develop an efficient clustering algorithm for solving the problems caused by the dynamic structures of VANETs in the communication between vehicles. S. Chavhan et al. proposed a self-learning hybrid clustering approach with adaptive network fuzzy inference system (ANFIS) for cluster head (CH) prediction and update. After the CH update, Dijkstra's algorithm is used to group the cluster members. As a result, it was seen that the proposed algorithm gave successful results in terms of PDR, end-to-end delay, CH selection delay [29].

X. Liu proposed a QoS scheme using DL to optimally distribute a restricted spectrum band to users in Marine-VANETs [38].

T. Koshimizu et al. developed a new model for clustering problems in VANETs, which they named Normalized Multidimensional Proximity Distribution Clustering (NMDP-APC). In this study, SVM-based ML was used to determine the desired clustering size and range. The simulation results have proven that the system performs successfully with less access delay in the Public Land Mobile Network (PLMN) system [36].

A. Pressas et al. presented the Q-Learning-based MAC protocol for efficient data communication between VANETs. With this study, they have presented a self-learning structure to ensure that the stations use the bandwidth in the most appropriate way. As a result, they achieved short-term accuracy, high efficiency and faster convergence [41].

C. Traffic Management

Traffic flow information in VANETs can be useful in guiding drivers. In recent years, studies have been carried out on the use of big data applications in subjects such as intelligent traffic control and management. Table 6 shows a sub-table of the studies examined within the scope of traffic management and, SVM and RF are the most used methods.

Table 7. Studies examined for traffic management

Source	Year	ML method	Subject	Country	FANET/VANET
[11]	2021	SVM	Traffic Management	China	VANET
[20]	2021	ML	Traffic Management	Kuwait	VANET
[39]	2020	RF, SVM	Traffic Management	India	VANET
[42]	2019	RF, AdaBoost	Traffic Management	India	VANET
[43]	2019	CNN	Traffic Management	China	VANET
[44]	2019	O-PNN	Traffic Management	Canada	VANET
[47]	2019	OS-ELM	Traffic Management	Egypt	VANET

J. Tong et al. proposed a new SVR model developed by applying particle swarm optimization to the parameter optimization of SVR for traffic flow prediction. When this model is applied to real traffic flow data in the UK, it has been found that the developed model is more successful than the existing models. This new method, applied to real traffic flow data in England, gives more successful prediction results than grid search method and decision tree regression [11].

Accurately determining the location of vehicles is critical in road safety applications used to prevent traffic accidents. For this purpose, A. Ashtaiwi proposed the Localization and Driving Direction Estimation System LDDDES, which is a prediction system using Multiple Input Multiple Output (MIMO) and ML, indicating the position and driving direction of other vehicles in the vicinity. When LDDDES is tested on two vehicles with different antenna characteristics, it has been observed that it can detect the driving direction of other vehicles with an accuracy close to 90% [20].

In another road estimation application, some ml methods that predict whether autonomous vehicles will go right, left or straight are compared. Mamatha G. et al. examined the prediction success of ML algorithms such as RF and SVM for route selection in autonomous vehicles and showed that SVM gave more successful results for prediction [42].

One of the difficulties encountered in VANETs is to achieve an effective clustering in urban areas with many intersections. G. H. Alsuhli et al. proposed an OS-ELM machine learning-based CANI (Clustering Adaptation Near Intersection) model that can perform fast and continuous learning to maintain clustering stability at intersections. They concluded that this developed model is successful in terms of stability and efficiency performance [47]. In another study, S.J. Kamble and M.R. Kounte presents a route estimation application based on RF and AdaBoost algorithms that determines which direction VANETs will take at intersections. In this study, firstly, vehicle trajectory data is collected from the GPS sensors of the vehicles, and then vehicles with similar deviation angles are clustered and a route planner is presented route planner that gives the shortest route to other vehicles [42].

VANETs allow the use of various applications in vehicles by connecting to the internet via RSUs. However, due to their high mobility, their connection with RSUs may be interrupted, which may cause some services to be disrupted. N. Aljeri and A. Boukerche used the PNN model to increase the performance of the next RSU prediction in order to ensure the continuity of mobile connections in the vehicles. They concluded that the

method, which was compared with Network Simulator NS-2 and various classifiers, was successful in terms of time complexity and accuracy. In the focus of this study, a new hybrid model can be created by combining the advantages of different machine learning methods [44].

Another study on traffic management is about determining the probability of a traffic accident with machine learning methods. H. Zhao et al. proposed the CNN algorithm as a solution to the disadvantage that traditional machine learning methods used for traffic accident prediction cannot automatically extract the features of the data. When the traditional back propagation neural network (BPNN) and CNN methods applied on the data collected from VANETs are compared, it is seen that the CNN method gives a lower training loss value. As a result, they observed that the proposed CNN-based traffic accident prediction algorithm has lower loss and higher prediction values than traditional ML methods [43].

D. Routing

VANETs; It can offer security, internet access, various applications for passengers and users. Therefore, it is important to make data transmission between vehicles more efficient and reliable [48]. For this purpose, there are studies on ML-based routing algorithms. The sub-table of the studies examined within the scope of the routing is given in Table 7. Various machine learning methods have been used in this area, and most of the work belongs to South Korea. In addition, most of the studies on FANET are within the scope of this subject.

Table 8. Studies examined for routing

Source	Year	ML method	Subject	Country	FANET/VANET
[6]	2021	SVM	Routing	China	VANET
[7]	2021	Q-learning	Routing	Brazil	FANET
[9]	2021	Q-learning	Routing	South Korea	FANET
[16]	2021	ANN	Routing	Spain	VANET
[18]	2021	DL	Routing	India	VANET
[25]	2021	DT, LR, GNB, RF	Routing	South Korea	VANET
[32]	2021	Fuzzy Logic	Routing	South Korea	FANET

In their work, S. Zhang et al. present a new approach to improve vehicle network performance and data transmission security. In this study, big data analysis was made with the help of location-based routing protocols and SVM algorithms in VANETs using 5g technology, so that the data can be transmitted securely by accurately detecting non-line of sight (NLoS) conditions. The results showed that the accuracy of the data increased by 15% for highways, 8% for suburban areas and 4.5% for urban areas [6].

Due to the high mobility of FANETs nodes, maintaining acceptable network latency remains a significant challenge. R. Kunst et al. address this issue by proposing a routing scheme based on a Q-Learning algorithm developed to reduce network latency in high-mobility scenarios called Q-FANET. The performance of this proposal has been evaluated and compared to other state-of-the-art methods using the WSNET simulator. Experiments provide evidence that Q-FANET offers lower latency, a small increase in packet delivery rate, and significantly lower jitter compared to other reinforcement learning-based routing protocols [7].

L. L. Cárdenas et al. developed a new routing protocol based on multi-metric prediction based artificial neural network (MPANN). Five different routing metrics taken from a large number of urban scenarios were recorded and different ML algorithms were tried and it was seen that the best result was ANN-based routing algorithm. To measure the flexibility and adaptability of the MPANN model, tests were conducted in regions with different city maps and vehicle densities. Compared to previous multi-metric routing protocols, an improvement of 20% in packet losses and up to 60% in average end-to-end packet delay has been observed [16].

J. Nadarajan and J. Kaliyaperumal proposed a new routing method called SCARP (stochastic chaos-based predictive adaptive routing) in their work. It is said that this method, which has a strengthened LSTM algorithm, has high predictive ability and chooses the most appropriate routing path according to traffic flow information. The experiments performed on SUMO-OMNET with the data of Indian roads were compared with the existing

routing algorithms and it was found to be successful in terms of prediction accuracy, sensitivity average delay and PDR [18].

In their study, G. Raja et al. designed a DT predictive compliance-based Vehicular Ad-Hoc reliable (DT-VAR) routing protocol using SUMO simulation. Four ML algorithms, DT, GNB, RFC, and LR, were used to estimate the best message routing with the highest connection time. Short cuts selected in the existing schemes gave a PDR of 4%, while the proposed DT-VAR protocol achieved a PDR value of up to 16% [25].

In their study, S. Ali et al. presented a routing scheme in FANETs consisting of two phases: energy sensitive and predictive fuzzy logic based route discovery phase and route maintenance phase. In the route selection stage, a fuzzy logic-based system was applied for a more suitable route for data transfer. When the proposed model is compared with three different routing methods, it has been observed that it is more successful in terms of delay rate in data transmission [32].

In their study, M. Y. Arafat and S. Moh proposed a Q-Learning-based topology-aware routing (QTAR) protocol that can adapt to the dynamic nature of FANETs. Re-adjustment of the Q-Learning method according to the changes in the topology produces successful results as it adapts to the dynamic structure of FANET [9].

F. Others

Studies outside of the four main titles mentioned before are gathered under this title.

Table 9. Others articles

Source	Year	ML method	Subject	Country	FANET/VANET
[33]	2021	Federate ML	Other	Amerika	FANET
[45]	2019	DRL	Other	China	VANET
[46]	2019	RF	Other	India	VANET

In their study, J. Yu et al. proposed an energy sensitive dynamic computation offload scheme that evenly distributes energy consumption and also allows for parallel execution of tasks. In the study, Kernel-Ridge Regression, Gaussian-Process Regression, RF and SVR-RBF machine learning methods were used to estimate the resource processing time in video processing tasks. It was observed that the Kernel-Ridge Regression model gave the best performance in transmission time results, while SVR-RBF algorithms were the best model in processing time results [33].

In their study, J. Li et al. propose a DRL-based maximization matching algorithm for VANETs to dynamically collect data from RSUs and reduce resource waste. According to the experimental results, they concluded that the proposed algorithm is more successful than the traditional methods [45].

There are also studies in which ML methods are applied in determining driver behavior profiles. In their study, R. Das and P.M Khilar examined the data collected from OBUs for the success of three different RF algorithms in classifying the driver behavior profile [46].

IV. CONCLUSIONS

Machine learning techniques have been widely used in many different fields recently. In Ad-Hoc networks which is one of these areas, new ideas are put forward to solve various problems with ML methods. In this study, we talked about various studies in which machine learning methods are used to create efficient routing algorithms, to design IDS applications to detect various attacks in advance, to predict how autonomous vehicles will make decisions in traffic, and to provide efficient and fast data transmission in VANET and FANET systems.

As a result of systematic literature review, it has been observed that the use of machine learning methods has increased in VANET networks in recent years, especially in 2021. In VANET networks, although many different methods have been tried to solve the routing problem, it is seen that Q-learning algorithms are more widely used. In solving the trust management problem, although many different methods are used, it has been seen that SVM and KNN algorithms come to the fore. It can be said that the use of RF and SVM algorithms is more

common in traffic management. In data transmission, many different algorithms have been used and it is not possible to say that any of them has more widespread use.

When the studies in which machine learning algorithms are used in FANET networks are examined, we encountered a much more limited number of studies. The new widespread use of FANET networks and their more frequent use, especially in military applications, can be cited among the reasons for this limitation. In FANET networks, there are studies in which machine learning algorithms are used to solve the routing problem. It has been observed that Q-Learning and Fuzzy logic approaches are used in these studies. In addition, there are studies in which the RF algorithm is used in trust management.

At the end of the systematic literature review in the study, which machine learning approaches are frequently used in routing, traffic management, trust management and data transmission in VANET networks, and which algorithms are used in routing and trust management processes in FANET networks are presented to the readers. Thus, those who examine the study will gain the knowledge of which machine learning approaches are used in the literature to solve the problems encountered in VANET and FANET networks.

In the future, it is planned to conduct a study on the optimization methods used to make the routing process, which is one of the most important problems in VANET and FANET networks, more efficient and faster. In addition, it is also aimed to conduct a study in which deep learning algorithms that have recently become widespread in these networks are examined.

REFERENCES

- [1] Ayyash, M., Alsoub Y., & Anan M. (2015). *Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks. Introduction to Mobile Ad-Hoc and Vehicular Networks*. Springer, New York, 33-46.
- [2] Benek, Ö., (2019). *Vanet sistemlerinde kullanılan iletişim protokollerinin analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Bekmezci, İ. & Ülkü, E. E., (2015) Location information sharing with multi token circulation in Flying Ad Hoc Networks. *7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. 16-19 June, İstanbul, 669-673.
- [4] Ulku, E. E., Dogan, B., Demir, O., & Bekmezci, I. (2019). Sharing Location Information in Multi-UAV Systems by Common Channel Multi-Token Circulation Method in FANETs. *Elektronika i Elektrotehnika*, 25(1), 66-71.
- [5] Ulku, E. E., & Bekmezci, I. (2016). Multi token based locations haring for multi UAV systems. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 8(3), 197.
- [6] Zhang, S., Lagutkina, M., Ovaz Akpınar, K. & Akpınar, M. (2021). Improving performance and data transmission security in VANETs. *Computer Communications*, 180, 126-133.
- [7] Costa, L. A. L. d., Kunst, R., & Freitas, E. P. d. (2021). Q-FANET: Improved Q-learning based routing protocol for FANETs. *Computer Networks*, 198, 108379.
- [8] Acharya, A., & Oluoch, J. (2021). A Dual Approach for Preventing Blackhole Attacks in Vehicular Ad Hoc Networks Using Statistical Techniques and Supervised Machine Learning. *IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*. 14-15 May, USA, 230-235.
- [9] Arafat, M. Y., & Moh, S. (2021). A Q-Learning-Based Topology-Aware Routing Protocol for Flying Ad Hoc Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 9, 1985-2000.
- [10] Kadam, N., & Sekhar, K. R. (2021). Machine Learning Approach of Hybrid KSVN Algorithm to Detect DDoS Attack in VANET. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12.
- [11] Tong, J., Gu, X., Zhang, M., Wan, J., & Wang, J. (2021). Traffic flow prediction based on improved SVR for VANET. *4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*. 26-28 March, China, 402-405.
- [12] Sharma, A., & Jaekel, A. (2021). Machine Learning Approach for Detecting Location Spoofing in VANET. *International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*. 19-22 July, Greece, 1-6.
- [13] Guerber, C., Royer, M., & Larrieu, N. (2021). Machine Learning and Software Defined Network to secure communications in a swarm of drones. *Journal of Information Security and Applications*, 61, 102940.

- [14] Krishna, M. V. B. M., Ananth, C. A., & Raj, N. K. (2021). Intrusion Detection System for Energy Efficient Cluster based Vehicular Adhoc Networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12.
- [15] Gonçaves, F., Macedo, J., & Santos, A. (2021). An intelligent hierachical security framework for vanets. *Information*, 12, 455.
- [16] Cárdenas, L. L., Mezher, A. M., Bautista, P. A. B., León, J. P. A., & Igartua, M. A. (2021). A Multimetric Predictive ANN-Based Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE access*, 9, 86037 – 86053.
- [17] Mankodiya, H., Obaidat, M. S., Gupta, R., & Tanwar, S. (2021). XAI-AV: Explainable Artificial Intelligence for Trust Management in Autonomous Vehicles. *International Conference on Communications, Computing, Cybersecurity, and Informatics (CCCI)*. 15-17 October, Beijing, China, 1-5,
- [18] Nadarajan, J., & Kaliyaperumal, J. (2021). QOS aware and secured routing algorithm using machine intelligence in next generation VANET. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-12.
- [19] Gad, A. R., Nashat, A. A., & Barkat, T. M. (2021). Intrusion Detection System Using Machine Learning for Vehicular Ad Hoc Networks Based on ToN-IoT Dataset. *IEEE Access*, 9, 142206-142217.
- [20] Ashtaiwi, A. (2021). ML-Based Localizing and Driving Direction Estimation System for Vehicular Networks. *International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*. 13-16 April, Jeju Island, South Korea, 465-470.
- [21] Alsarhan, A., Alauthman, M., Alshdaifat, E., Al-Ghuwairi, A., & Al-Dubai, A. (2021). Machine Learning-driven optimization for SVM-based intrusion detection system in vehicular ad hoc networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-10.
- [22] Uprety, A., Rawat, D. B., & Li, J. (2021). Privacy Preserving Misbehavior Detection in IoV using Federated Machine Learning. *18th Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*. 9-12 January, Las Vegas, NV, USA, 1-6.
- [23] Ercan, S., Ayaida, M., & Messai, N. (2021). New Features for Position Falsification Detection in VANETs using Machine Learning. *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*. 14-23 June, Montreal, QC, Canada, 1-6.
- [24] Cabelin, J. D., Alpano, P. V., & Pedrasa, J. R. (2021). SVM-based Detection of False Data Injection in Intelligent Transportation System. *International Conference on Information Networking (ICOIN)*. 13-16 January, Jeju Island, South Korea, 279-284.
- [25] Kumbhar, F. H., & Shin, S. Y. (2021). DT-VAR: Decision Tree Predicted Compatibility-Based Vehicular Ad-Hoc Reliable Routing. *Ieee Wireless Communications Letters*, 10, 87-91.
- [26] Bolodurina, I., Parfenov, D., & Grishina, L. (2021). Investigation of Feature Engineering Methods for Identifying Attacks in the VANET. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 5-11 September, Sochi, Russian Federation, 1031-1035.
- [27] Raja, G., Anbalagan, S., & Vijayaraghavan, G. (2021). SP-CIDS: Secure and Private Collaborative IDS for VANETs. *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems*, 22, 4385-4393.
- [28] Zang, M., & Yan, Y. (2021). Machine Learning-Based Intrusion Detection System for Big Data Analytics in VANET. *3rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*. 25-28 April, Helsinki, Finland, 1-5.
- [29] R, D. K., Chavhan, S., Gupta, D., Khanna, A., & Rodrigues, J. J. P. C. (2021). An Intelligent Self-learning Drone Assistance Approach towards V2V Communication in Smart City. *Proceedings of the 4th ACM MobiCom Workshop on Drone Assisted Wireless Communications for 5G and Beyond (DroneCom '21)*. 29 October, New York, NY, United States, 19-24.
- [30] Gonçaves, F., Macedo, J., & Santos, A. (2021). Evaluation of VANET Datasets in Context of an Intrusion Detection System. *2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. 23-25 September, Split, Hvar, Croatia, 1-6.
- [31] Hossain, M. A., Noor, R. M., Yau, K.-L. A., Azzuhri, S. R., Z'aba, M. R., Ahmedy, I., & Jabbarpour, M. R. (2021). Machine Learning-Based Cooperative Spectrum Sensing in Dynamic Segmentation Enabled Cognitive Radio Vehicular Network. *Energies*, 14, 1169.

- [32] Lee, S.-W., Ali, S., Yousefpoor, M. S., Yousefpoor, E., Lalbakhsh, P., Javaheri, D., Rahmani, A. M., & Hosseinzadeh, M. (2021). An Energy-Aware and Predictive Fuzzy Logic-Based Routing Scheme in Flying Ad Hoc Networks (FANETs). *IEEE Access*, 9, 129977-130005.
- [33] Yu, J., Vandanapu, A., Qu, C., Wang, S., & Calyam, P. (2020). Energy-aware Dynamic Computation Offloading for Video Analytics in Multi-UAV Systems. *2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. 17-20 February, Big Island, HI, USA, 641-647.
- [34] Quevedo, C. H. O. O., Quevedo, A. M. B. C., Campos, G. A., Gomes, R. L., Celestino, J., & Serhrouchni, A. (2020). An Intelligent Mechanism for Sybil Attacks Detection in VANETs. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 7-11 June, Dublin, Ireland, 1-6.
- [35] Haddaji, A., Ayed, S., & Fourati, L. C. (2020). Blockchain-based Multi-Levels Trust Mechanism Against Sybil Attacks for Vehicular Networks. *IEEE 14th International Conference on Big Data Science and Engineering (BigDataSE)*. 31 December - 1 January, Guangzhou, China, 155-163.
- [36] Koshimizu, T., Gengtian, S., Wang, H., Pan, Z., Liu, J., & Shimamoto, S. (2020). Multi-Dimensional Affinity Propagation Clustering Applying a Machine Learning in 5G-Cellular V2X. *IEEE Access*, 8, 94560-94574.
- [37] Adhikary, K., Bhushan, S., Kumar, S., & Dutta, K. (2020). Hybrid Algorithm to Detect DDoS Attacks in VANETs. *Wireless Personal Communications*, 114, 3613-3634.
- [38] Liu, X. (2020). Deep Learning for Resource Allocation of a Marine Vehicular Ad-Hoc Network. *2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*. 18-20 November, Santo Domingo, Dominican Republic, 1-6.
- [39] Mamatha, G., Sharan, H. S., Prathik, R., Priya, D. S., & Prajwal, U. (2020). Smart Vehicular communication for Road status analysis and Vehicle trajectory prediction. *Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT 2020)*. 20-22 August, Tirunelveli, India, 1081-1087.
- [40] Garip, M. T., Lin, J., Reiher, P., & Gerla, M. (2019). SHIELDNET: An Adaptive Detection Mechanism against Vehicular Botnets in VANETs. *2019 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. 4-6 December, Los Angeles, California, 1-7.
- [41] Pressas, A., Sheng, Z., Ali, F., & Tian, D. (2019). A Q-Learning Approach With Collective Contention Estimation for Bandwidth-Efficient and Fair Access Control in IEEE 802.11p Vehicular Networks. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 68, 9136-9150.
- [42] Kamble, S. J., & Kounte, M. R. (2019). On Road Intelligent Vehicle Path Predication and Clustering using Machine Learning Approach. *Third International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC 2019)*. 12-14 December, Palladam, India, 501-505.
- [43] Zhao, H., Cheng, H., Mao, T., & He, C. (2019). Research on Traffic Accident Prediction Model Based on Convolutional Neural Networks in VANET. *2019 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*. 25-28 May, Chengdu, China, 79-84.
- [44] Aljeri, N., & Boukerche, A. (2019). A Novel Online Machine Learning Based RSU Prediction Scheme for Intelligent Vehicular Networks. *2019 IEEE/ACS 16th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*. 3-7 November, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 1-8.
- [45] Li, J., Xing, Z., Wei, S., Qian, Y., & Zhang, W. (2019). Dynamic Vehicle Data Gathering via Deep Reinforcement Learning Approach. *2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. 6-9 December, Chengdu, China, 1916-1920.
- [46] Das, R., & Khilar, P. M. (2019). Driver Behaviour Profiling in VANETs : Comparison of Ensemble Machine Learning Techniques. *2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)*. 4-6 July, Chennai, India, 1-5.
- [47] Alsuhli, G. H., Khattab, A., Fahmy, Y. A., & Massoud, Y. (2019). Enhanced urban clustering in VANETs using online machine learning. *IEEE International conference on vehicular electronics and safety (ICVES)*. 4-6 September, Egypt, 1-6.
- [48] Kandali, K., Bennis, L., & Bennis, H. (2021). A New Hybrid Routing Protocol Using a Modified K-Means Clustering Algorithm and Continuous Hopfield Network for VANET. *IEEE Access*, 9, 47169-47183.

Derleme Makalesi/Review Article

Sürdürülebilir Beslenme Kapsamında Yenilebilir Böcekler

Edible Insects with in Scope of Sustainable Nutrition

Selen Seyhan^{1*}, Emine Nakilcioglu²

Geliş / Received: 18/08/2022

Revize / Revised: 15/11/2022

Kabul / Accepted: 02/12/2022

ÖZ

İlerleyen yıllarda dünya nüfusunun 9 milyarı geçeceği öngörülmektedir. Artan nüfus, şehirleşme oranının büyümesi, ekonomik nedenler ve bazı çevresel faktörler nedeniyle, insanların yeterli miktarda hayvansal ürün kaynaklarına ulaşmada büyük sorunlar yaşayacağı düşünülmektedir. Bu sebeple geleneksel protein kaynakları yetersiz kalacak olup, yenilebilir böceklerin alternatif protein kaynakları olarak hesaba katılması gerekecektir. Günümüzde karıncalar, çekirgeler, arılar, eşek arısı, cırcır böcekleri ve daha nicesinin dahil olduğu birçok böcek türü yenilebilmektedir. Dünyada yaklaşık olarak 1.900'den fazla böcek türünün yenilebilir olduğu, bu böcek türlerinin insan gıdası olarak kullanıldığı ve dünya çapında yaklaşık 2 milyar insanın böcek tükettiği bilinmektedir. Bitkisel ve hayvansal proteinler ile böcek proteinleri karşılaştırıldığında esansiyel aminoasit profili, toplam protein seviyesi ve diğer besin değerleri bakımından yenilebilir böcekler değerli kaynaklardır. Ayrıca elde edilen biyoaktif maddeler sağlığın geliştirilmesi ve hastalıkların önlenmesinde kullanılabilir. Literatürde gıda alanında yenilebilir böcekler ile ilgili çalışmalar mevcuttur ve her geçen gün artmaktadır. Bu derleme çalışmasında, yenilebilir böceklerden olan kriket böceği (*Acheta domesticus*), un kurdu (*Tenebrio molitor*), siyah asker sineği (*Hermetia illucens*), çekirge (*Locusta migratoria*) ve ipek böceği (*Bombyx mori*) ile ilgili bilgi verilmesi ve gıda alanında kullanımı hakkında bilgi aktarımının sağlanması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Alternatif Gıda, Entomofaji, Gıda Kullanımı, Yenilebilir Böcekler

ABSTRACT

It is predicted that the world population will exceed 9 billion in the following years. It is thought that people will have great problems in reaching sufficient animal product resources due to the increasing population, growing urbanization rate, economic reasons, and some environmental factors. For this reason, traditional protein sources will be insufficient and edible insects will have to be taken into account as alternative protein sources. Many insect species are edible today, including ants, grasshoppers, bees, wasps, crickets and more. It is known that more than 1,900 insect species are edible in the world; these insect species are used as human food, and approximately 2 billion people worldwide consume insects. When plant and animal proteins and insect proteins are compared, edible insects are valuable sources in terms of essential amino acid profile, total protein level, and other nutritional values. In addition, the obtained bioactive substances can be used in the promotion of health and the prevention of diseases. There are studies on edible insects in the field of food in the literature and they are increasing day by day. In this review, information about the edible insects cricket (*Acheta domesticus*), mealworm (*Tenebrio molitor*), black soldier fly (*Hermetia illucens*), grasshopper (*Locusta migratoria*) and silk worm (*Bombyx mori*) aimed at providing information transfer and their use in food.

Keywords- Alternativefood, Entomophagy, Fooduse, Edibleinsect

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: selenseyhann@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6354-4687>)

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

²İletişim: emine.nakilcioglu@ege.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4334-2900>)

Gıda Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

I. GİRİŞ

Günümüzde 1.3 milyar insanın gıdaya ulaşmakta güçlük çektiği bilinmektedir. Bu doğrultuda dünya nüfusunun her geçen gün artması açlık konusunda zorluklar meydana getirmektedir [1, 2]. Dünya nüfusundaki bu artış ile doğru orantılı olarak hayvansal protein alımının artacağı öngörülmektedir [2]. Küresel anlamda hızla ilerleyen deformasyonlar nedeniyle hayvansal ürünlerin yerine yeni alternatifler üretilmelidir. Bu deformasyonlara sebebiyet veren neden ise insan nüfusunun 2.7 milyardan 6 milyara kadar artmasıdır [3]. Son 5 yıl içerisinde insan nüfusunun artışı et tüketiminin yılda 45 kg'dan 233 milyar kg'a kadar artmasına sebep olmuştur [4]. Son yıllarda yaşanan nüfus artışı ve hayvansal protein talebi, bilim insanlarını ve üreticileri alternatif hammaddeler üzerinde yoğunlaşmaya sevk etmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, insanların beslenmesinde alternatif bir hammadde ve kaliteli protein kaynağı olarak böceklerin kullanılabileceğini göstermektedir [5]. Diğer hayvansal kaynaklar ile karşılaştırıldığında böceklerin çevreye olan zararı yok denecek kadar azdır [6]. Yapılan çalışmalarda yenilebilir böceklerin esansiyel aminoasit içeriğinin; toplam protein, yağ, mineral ve vitaminlerce yüksek olması, yemden yararlanma oranlarının yüksek olması (hayvanın yemden yararlanma oranını artırarak alınan yumurta, süt, ağırlık vb. ürünlerde artış gerçekleşir) ve hızlı üremeleri nedenleriyle sürdürülebilir protein kaynağı olarak değerlendirilebileceklerini göstermektedir [7].

Tüketicilerin gıda tüketimini kültür, din ve inanışlar etkilemektedir [8]. Böceklerin bir gıda maddesi olarak kullanımı konusunda var olan toplumsal ön yargılar sebebiyle olumsuz yaklaşımlar gösterilse de araştırmalar doğrultusunda yenilebilir böcekler alternatif protein kaynağı ve sürdürülebilir gıdalar olarak görülmektedir [3]. Tüketicinin olumsuz tavrını azaltabilecek stratejiler gıda alanında son yıllarda araştırma konusu olmaktadır [9]. Yenilebilir böceklerin unlarının kullanılması, izole edilmiş bileşenlerin dahil edilmesi gıdalarda tüketicinin tercihinin değiştirebilecek stratejiler içerisinde yer almaktadır [10, 11]. Yenilebilir böceklerin özellikle unlu mamullere un ve toz şeklinde eklenmesi veya ikame edilmesi tüketilmesini kolaylaştırarak, böcek bazlı gıdalardaki olumsuz tavrı azaltacaktır [12].

Gıda güvenliği ve potansiyel sağlık yararları yenilebilir böcekler konusunda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. İncekara (2017), sucul böceklerin protein potansiyelinin Türkiye'de en üst düzeyde yararlanmak amacıyla öneriler sunmuştur [13]. İnsan kan hücreleri üzerinde genotoksik ve oksidatif etkilerini incelemek amacıyla böcek ekstraktlarının incelediği çalışmalar bulunmaktadır [14-19]. Aydoğan vd. (2018), sucul bir böcek türü olan *Cybister limbatus*'un içeriğindeki ağır metalleri belirlemek amacıyla çalışmalarını yapmışlardır. Sonuçlar değerlendirildiğinde ağır metallerin konsantrasyonları risk oluşturmadığından tüketim için uygun olduğu görülmüştür [20]. Karada yaşayan böcek türleri gibi sucul böceklerde mantar yapıları taşıyabilir. Bu amaç doğrultusunda Özdal vd. (2012)'nin yaptıkları çalışmada *Hydrophilus piceus* ve *Dytiscus marginalis* türlerinin iç ve dış yüzeylerindeki mikrofungal florayı incelemişlerdir. Çalışmada izole edilen mantarlar arasında patojen veya toksijenik olarak bir risk görülmemiştir [21]. Ağır metallerin, oksidatif ve genotoksisite etkilerinin incelenmesi ile potansiyel sağlık riskleri değerlendirilebilir [19].

Yenilebilir böceklere olan ilginin artmasıyla birlikte böcek endüstrisi gelişmektedir [22]. Böceklerin endüstriyel üretimi ile daha az toprak ve su kullanımı, daha düşük sera gazı emisyonları ve daha yüksek yem dönüşüm verimliliği gibi birçok çevresel avantaj sağlanmaktadır [23, 24]. Böcekler, aynı zamanda hayvan yemi olarak da çevre dostu ve sürdürülebilir bir besin kaynağıdır. Böcekler, yem dönüşümü açısından sığır ve tavuk gibi diğer hayvanlara kıyasla daha verimlidir [24, 25]. Bu amaçlar doğrultusunda teknolojik donanımlara sahip çiftlikler kurulmaktadır. Oluşturulan çiftliklerde bilimsel araştırmalar geliştirilmektedir [26]. Bazı böcekler buldukları ortamda, hayvan ve insan atıkları gibi organik atıkların değerlendirilmesinde rol oynamaktadır. Bu sayede, atıkların dönüştürülmesi ve çevre temizliği de sağlanmaktadır [27, 28].

Entomofaji terimi, bir besin kaynağı olarak böceklerin tüketilmesidir [29]. Eski medeniyetlerden kalan çizimlerde ve diğer kayıtlarda, böceklerin tüketildiğine dair kayıtlar mevcuttur [30]. Günümüzde ise değerli ve güvenli bir gıda ve gıda maddesi olabilecek birçok böcek türü bulunmakta olup yaklaşık bu böcek türlerinden 1900'den fazlası insanlar tarafından tüketilmektedir [31, 32]. Ek olarak, 2000'den fazla böcek türünün 113 ülkede yenilebilir olduğu bildirilmiştir [33]. İnsanlar tarafından en çok tüketilen böcek türleri; tırtıllar, arılar, karıncalar ve eşek arısıdır. Ayrıca ağustos böceği, çekirge, cırcır böceği, kara asker sineği, yusufçuk gibi türler de tüketilebilmektedir [34]. Yenilebilir böceklerde yapılan araştırmalara göre, yüksek miktarda yağ, protein, vitaminler ve mineral maddeler bulunmaktadır [7, 35]. Böceklerin protein içerikleri günümüzde oldukça ilgi görmektedir [31]. Böcek proteinleri, çevre dostu olarak kabul edilir. Ayrıca sindirilebilirliği bakımından olumlu özellikleri olduğu görülmüştür [36]. Yenilebilir böcekleri gıda alanında incelemek istersek, tek başına bir gıda ürünü veya herhangi bir gıdayı zenginleştirmek için bir kaynak olarak kullanıldıkları görülmektedir. Krakerler,

kekler, enerji barları ve diğer birçok fonksiyonel gıda ürünlerinde yenilebilir böceklerin kullanılabilirliği, çalışmalarla ortaya konulmuştur [31, 37]. Ticari olarak ise farklı yenilebilir böcek türlerinden kek, atıştırma kraker, mısır cipsi, makarna, ekme gibi ürünler Amerika Birleşik Devletleri, Tayland, Avusturya ve Almanya’da yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır [38]. Bu derleme çalışmasında, yenilebilir böceklerden olan kricket (cırcır böceği), un kurdu, siyah asker sineği, çekirge ve ipek böceği ile ilgili genel bilgi verilmesi ve gıda alanında yapılan çalışmaları hakkında bilgi aktarımının sağlanması amaçlanmıştır.

II. YENİLEBİLİR BÖCEKLERİN BESİN DEĞERLERİ

A. Kricket (*Orthoptera: Gryllidae, Cırcır Böceği*)

Bildirilen en yaygın türler arasında *Brachytrupes membranaceus*, *Gryllus assimilis*, *Gryllus bimaculatus*, *Gryllus testaceus* ve *Acheta domesticus* bulunmaktadır [39]. Ev cırcırları (*Acheta domesticus*) İsveç’te bulunması ile en yaygın tüketilen cırcır böceği türüdür [39, 40]. Ev cırcırları organik materyaller ile beslenmektedir [41]. Memeli besi hayvanlarına kıyasla cırcır böceklerinin yem dönüştürme verimlilikleri yüksektir [39]. Kalabalık koşullarda cırcır böcekleri (2000 böcek /m²) 20 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda yaşayabilmektedir. Bu nedenler doğrultusunda yetiştirilmesi ve erişimi kolay olmaktadır [41]. Cırcır böcekleri, yenilebilir böceklerin küresel pazarının %31.6’sını oluşturmaktadır. Yaygın olarak tüketiminin Tayland’da tercih edildiği bilinmektedir [42].

Yenilebilir cırcır böcekleri, protein, yağ, karbonhidrat ve lif açısından zengin kaynaklar olduğundan alternatif bir besin kaynağı olarak düşünülmektedir (Tablo 1). Besin içeriği, türler arasında farklılık göstermektedir [39, 42]. Yetişkin bir cırcır böceği 120 kcal/100gr enerji vermektedir [30]. Vitamin bakımından değerlendirilirse, ev cırcır böceği içeriğinde, askorbik asit, niyasin, riboflavin, tiamin ve folik asit bulunduran zengin bir kaynaktır. Yapısında iz miktarda B₁₂ vitamini de bulunmaktadır [43, 44]. 100 g cırcır böceği numunesi, 19.22 g esansiyel aminoasitleri içermektedir. En çok bulunan esansiyel amino asitler valin, izolösin, lösin, lizin, treonin ve histidin’dir. Esansiyel olmayan aminoasitlerden ise, aspartik asit, alanin, arginin, glutamik asit, glisin, prolin, tirozin ve serin bulunmaktadır [45]. Domuz ile cırcır böceklerinin aminoasit içeriği karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir [39]. Mineral bakımından da oldukça zengin olan cırcır böcekleri, içeriğinde kalsiyum, potasyum, çinko, magnezyum, fosfor, sodyum ve demir içermektedir [43]. Demir ve çinko insan sağlığı için oldukça önemlidir. Biyoyerişilebilirliği bakımından demir ve çinko değerleri (mg/100g) cırcır böceğinde sırasıyla, 4.21 ± 0.42 ve 5.90 ± 0.68 bulunmuştur. Yapılan bir çalışmada, cırcır böceği için yapılan haşlanma ve kavurma işlemlerindeki kayıplar incelenmiştir. Minimum kaybin kavurma işleminde gerçekleştiği görülmüştür [46]. Cırcır böceklerinin içeriğinde yüksek miktarda triaçilgliserol bulunmaktadır. Ayrıca, kolesterol, gliseritler, serbest yağ asitleri, fosfolipitler ve mum esterleri ise az miktarda bulunmaktadır [43]. Yapılan duyu analizlerde cırcır böceğinin aroması, odun aroması-ceviz ve tahıl aroması şeklinde belirtilmiştir [47].

Tablo 1. Yaygın olarak tüketilen beş cırcır böceği türüne ait besin içerikleri (g/100g KM) [42]

Tür	Ülke	Besin Değerleri			
		Protein	Yağ	Karbonhidrat	Lif
<i>A. domesticus</i>	Tayland	71.70 ± 0.5	10.40 ± 0.1	1.60 ± 0.1	4.60 ± 0.2
<i>G. bimaculatus</i>	-	57.49 - 70.10	14.93 - 33.44	-	9.53 ± 0.46
<i>B. membranaceus</i>	Kenya	53.4 ± 0.19	15.80 ± 0.23	15.10 ± 0.22	6.30 ± 0.14
<i>G. testaceus</i>	Çin	58.30 ± 0.9	10.30 ± 0.3	-	-
<i>G. bimaculatus</i>	Tayland	60.70 ± 0.4	23.40 ± 0.1	0.10 ± 0.01	10.00 ± 0.3

B. Un Kurdu (*Coleoptera: Tenebrionoidea, Tenebrio molitor*)

Kın kanatlı (*Coleoptera: Tenebrionoidea*) grubuna giren un kurtları, batı iklim koşullarında çiftliklerde veya evlerde yetiştirilmektedir [41]. Hollanda’da yaygın olarak özel marketlerde insan gıdası olarak sunulmaktadır. Yem kaynağı bakımından oldukça popülerdir [48]. Hepçil (omnivor) olarak bilinen un kurtları, buğday kepeği, soya unu, yağsız süt tozları ile beslenebilmektedir [41]. Un kurtlarının diğer böcek türlerinde de görüldüğü gibi birim kg üretimleri için sera gazı ve amonyak salınımları, sığırlara kıyasla daha düşüktür [49]. 28 °C’de %30-55 nem içeriğinde optimum gelişme gösterirler. %70 ve üzeri nem koşullarında gelişim gösteremezler [50]. Birçok böcek türünde bilinen anti-obezite ve anti-trombotik etkinin, un kurdunun tüketimiyle de ortaya çıktığı

bilinmektedir [51]. Ek olarak un kurdu larvalarının karaciğerdeki lipid düzeylerini ve homosisteini düşürücü etki gösterdiği görülmüştür [52]. Sarı un kurdunun larva evresinde iken enerji değeri 498.68 kcal/100g KM olarak bulunmuştur [53]. Kurutma yöntemlerine göre değişen un kurtlarının besin içeriği ise Tablo 2’de gösterilmiştir [54, 55]. Kitin içerikleri ile ilgili yapılan çalışmada, un kurdundan elde edilen kitinin verimliliği 4.72g kitin /100g kurutulmuş yemek kurdu tozu olarak tespit edilmiştir [48].

Un kurdunda yüksek miktarda bulunan aminoasitler; arginin, histidin, lösin, lizin ve valin; az miktarda bulunan aminoasitler ise izolösin, triptofan, metionin ve treonin’dir [54]. Esansiyel olmayan amino asitler bakımından un kurdu, alanin, aspartik asit, prolin ve glutamik asit içermektedir [56]. Yağ asidi bileşimi açısından ise, yüksek miktarda linoleik asit, oleik asit, linolenik asit, palmitik asit, pentadekanoik asit ve palmitoleik asit içerirken takiben, laurik asit, miristik asit, stearik asit, dekanok asit ve araşidonik asit de içermektedir [56, 57]. Yapılan bir çalışmada, un kurdu örneklerinde bulunan makro elementler, kalsiyum, fosfor, magnezyum, sodyum ve potasyum; iz elementler, çinko, demir, bakır ve mangan şeklinde tanımlanmıştır. Konsantrasyonları incelendiğinde ise magnezyum, fosfor ve çinko içeriğinin yüksek miktarda olduğu; kalsiyum, sodyum ve demir içeriğinin ise düşük olduğu görülmüştür [55]. Yapılan duyu analizlerde un kurdunun aromasının, buğday ekmeği gibi tahıl aromaları ile birlikte fındık aroması şeklinde algılandığı belirtilmiştir [47].

Tablo 2. Kurutma yöntemlerine göre un kurduna ait besin değerleri [54, 55]

Parametre	Taze	Geleneksel kurutulmuş	Vakumla kurutulmuş	Dondurularak kurutulmuş
Nem (g/100 g)	62.87 ± 0.27	-	1.70 ± 0.09	9.83 ± 0.03
Protein (g/100 g KM)	53.23 ± 0.28	57.8	53.23 ± 0.20	52.23 ± 0.19
Yağ (g/100 g KM)	27.13 ± 0.03	23.8	29.57 ± 0.02	26.80 ± 0.06
Lif (g/100 g KM)	6.47 ± 0.09	5.33	6.83 ± 0.03	7.53 ± 0.09
Kül (g/100 g KM)	3.27 ± 0.12	5.24	3.40 ± 0.15	7.53 ± 0.09
Karbonhidrat (g/100 g KM)	7.18	11.45	-	-

C. Siyah Asker Sineği (*Diptera: Stratiomyidae, Hermetia illucens*)

Siyah asker sineği, organik atıkları yüksek kaliteli proteine dönüştürmeleri, çeşitli hayvanlar için yem olarak kullanılmaları ve belirli zararlı bakteriler ve haşereleri kontrol etmeleri ile bilinmektedir [58]. Siyah asker sineği larvaları insan dışkı ile beslenirken; ergin sinekleri beslenmemektedir. Dolayısıyla hastalık bulaştırıcı özellikte değildir [59]. Bilindiği üzere kara asker sineği, protein ve diğer besin bileşenleri açısından zengin bir kaynaktır. Öldürme yöntemlerine göre besin içeriklerinin değiştiği belirtilmektedir (Tablo 3). Hangi yöntemin iyi olacağı, çalışma grubuna göre değişiklik göstermektedir [60]. Yaklaşık olarak verdiği enerji değeri 180 kcal/100g olarak bulunmuştur [61]. Siyah asker sineğinde bulunan aminoasitler miktarlarına göre yüksekte düşüğe doğru, glutamik asit, aspartik asit, alanin, tirozin, lösin, arginin, lizin, prolin, izolösin ve metionin şeklinde sıralanabilir [60]. Yüksek miktarlarda mineral içeriği olan siyah asker sineği, kalsiyum, fosfor, magnezyum, potasyum, manganez, demir, çinko, arsenik ve bakır içermektedir [60, 62]. Laurik asit, palmitik asit, oleik asit, stearik asit ve palmitoleik asit bakımından zengin olan siyah asker sineği, ayrıca miristik asit, linolenik asit, araşidonik asit ve kaprik asit yağ asitlerini de bileşiminde bulundurmaktadır [62]. Lezzet benzerliği gösterdiği gıda ise kepek ekmeği olarak tanımlanmıştır [63].

Tablo 3. Siyah asker sineğine ait öldürme yöntemlerine göre değişen besin içerikleri (g/100g KM) [60]

Parametreler	Öldürme Yöntemleri					
	Mekanik		Boğulma		Sıcaklık	
	Karıştırma	Dondurma	CO ₂	Vakum	Ağartma	CO ₂ + Ağartma
Kuru madde	95.7	96.6	96.1	95.5	97.4	97.2
Ham kül	7.29	7.30	7.50	7.44	7.04	6.90
Ham protein	39.3	44.9	46.8	52.5	46.3	44.6
Ham lif	10.2	9.22	9.29	9.51	9.66	9.77

D. Çekirge (Orthoptera)

Dünya genelinde yaklaşık 80 tür çekirge tüketilmektedir. Orthoptera takımına dahil olan çekirgeler, genellikle olgun olduğunda kızarma, kavurma veya haşlama işlemlerine tabi tutularak tüketilir [3,41]. Japonya’da oldukça yaygın olarak hasadı yapılmaktadır. *Arphia fallax*, *Boopendon flaviventris*, *Melanoplus mexicanus* ve *Locusta migratoria* gibi çekirge türleri gıda olarak tüketilmektedir [64]. Genel olarak çekirge türlerinin diğer yenilebilir böcek türleri ile karşılaştırıldığında en yüksek ham protein değerini vererek yaklaşık olarak ortalama %61 olduğu belgelenmiştir [65]. Türlerin yetiştiği koşullara bağlı olarak çekirgelerin besin içerikleri farklılık göstermektedir (Tablo 4) [66, 67]. Vücudun işleyişinde düzenleyici olarak görev alan vitaminler bakımından çekirgeler iyi bir kaynaktır. Örneğin, *Zonocerus variegatus* (yetişkin) türü, insan vücudundaki günlük A vitamini ihtiyacının tamamını karşılamaktadır. Ek olarak çekirgeler, E vitamini, C vitamini, B₂ vitamini ve B₃ vitamini açısından da değerli bir kaynaktır [66]. Esansiyel aminoasit içeriği bakımından, lösin, treonin, histidin, lisin, metionin, fenilalanin, valin ve triptofan; esansiyel olmayan aminoasit içeriği bakımından ise alanin, aspartik asit, arginin, glutamik asit, tirozin, prolin ve serin içermektedir [45]. Çoğu çekirge türünde, magnezyum, sodyum, kalsiyum, potasyum, demir, çinko, manganez ve selenyum bulunmaktadır [45, 66]. Çekirgelerin yağ asidi bileşimleri çekirgenin türüne, gelişim evrelerine, diyetlerine ve çevresel faktörlere göre değişmektedir. Çoğu çekirge türünde linoleik asit ve α -linolenik asit yüksek oranda bulunurken; palmitik asit, stearik asit ve palmitoleik asit daha düşük oranlarda yer almaktadır. Doymuş yağ asitleri ise toplam yağ asidi içeriğinin yaklaşık olarak %30’unu oluşturmaktadır [66]. Çekirgenin verdiği aromanın karides, et suyu ve ceviz aroması şeklinde olduğu belirtilmiştir [47, 38, 68].

Tablo 4. Bazı çekirge türlerinin yaklaşık besin içeriği (g/100g KM) [66, 67]

Türler	Protein	Yağ	Lif	Karbonhidrat	Kül
<i>Arphia fallax</i>	71.30	6.52	11.58	8.11	2.41
<i>Boopendon flaviventris</i>	59.30	11.00	10.10	16.59	2.98
<i>Sphenarium purpuracens</i>	52.60	19.56	11.04	14.49	2.31
<i>Locusta migratoria</i>	61.3	13.4	9.6	13.0	3.9

E. İpek Böceği (Lepidoptera: Bombycidae, *Bombyx mori*)

Pul kanatlılar (Lepidoptera) takımına ait olan ipek böcekleri, yüksek verimleri nedeniyle böcekçilik endüstrisinin önemli bir parçasıdır [30, 69]. Tüm yaşam döngüsü yumurta, larva, pupa ve ergin dönem olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. İpekböcekçiliği endüstrisinde, kozalardan ipek elde edilmesinin ardından, ipek böceği pupası elde edilir. Bu kısım atık madde olarak değerlendirilirken çevre kirliliğine ve kötü kokuya neden olmaktadır [69]. Bu nedenle, değerlendirilmesi oldukça önemlidir [67]. Aminoasit ve mineraller bakımından önemli bir kaynak olan ipek böceği, besin içeriği ile dikkat çekmektedir (Tablo 5) [53, 69]. Vitamin açısından da zengin olan ipek böceği, pupa evresinde iken, miktarı en yüksekten düşüğe doğru olmak üzere, demir, çinko, bakır, selenyum, fosfor, potasyum, sodyum ve kalsiyum içermektedir [70]. Aminoasit profili incelendiğinde, yüksek miktarda aspartik asit (%10.7), glutamik asit (%11.1) ve prolin (%8.2) bulunduğu görülmüştür [71]. Ayrıca içeriğinde, treonin, fenilalanin, valin, histidin, izolösin ve lizin bulunmaktadır. Omega-3, omega-6 ve omega-9 yağ asitlerini içermektedir [69]. Bunların dışında ipek böceğinin palmitik asit, palmitoleik, stearik, oleik asit ve lignoserik asit içerdiği de belirtilmektedir. Yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere, pupa evresinde diğer evrelere kıyasla yağ asidi içeriğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur [72]. Ek olarak, ipek böceğinin antinutrisyonel maddeler içerdiği de belirtilmiştir. Bunlar saponinler (7 mg/g), alkaloidler (8,61 mg/g), oksalatlar (0,1 mg/g) ve fitatlardır. [31]. Ayrıca yapılan bir çalışmada antinutrisyonel olarak değerlendirilebilecek arsenik, brom, rubidyum, stronsiyum ve kurşun tespit edilmiştir [22]. İpek böceğinin enerji değeri yaklaşık olarak 509.03 kcal/100g KM’dir [53].

Tablo 5. İpek böceğinin pupa evresine ait besin içeriği (g/100 g KM) [53,69]

	Protein	Yağ	Karbonhidrat	Kül	Lif
İpek Böceği	60.03	29.47	0.92	5.79	3.32

III. GIDA ALANINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kowalczewskivd (2021), kriket tozu (CP) ile zenginleştirilmiş glutensiz ekmeklerin (GF) biyolojik aktivitesini karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, kriket tozu %2, %6 ve %10 oranlarında nişasta ikameli glutensiz ekmekler hazırlanmıştır. Kontrol örneği olarak buğday unu ile hazırlanan referans ekmeği de (RB) üretilmiştir. Nişastanın, %2, %6 ve %10 (sırasıyla BCP2, BCP6 VE BCP10) miktarında CP ile değiştirilmesi, protein içeriğini sırasıyla iki, dört ve yedi kat artması ile sonuçlanmıştır. Enerji değerinde anlamlı bir değişiklik gözlemlenmemiştir ($p>0.05$). Besin bileşimi için yapılan hesaplamalarda en iyi sonucu BCP10 örneğinin verdiği gözlemlenmiştir. Kalsiyum, demir, potasyum ve magnezyum için değerler %1-2 aralığından %3-4 aralığına yükselmiştir. Sodyum içeriği de analiz edilen numunelerde benzer sonuçlar vermiştir. En yüksek artışı (yaklaşık %5'lik artış) bakır, fosfor, manganez ve çinko mineralleri vermiştir. CP ilavesi ile hazırlanan ekmekteki yağ asidi profili değişmiştir. Oleik asit, CP ilavesindeki artışla bir düşüş göstermiştir. Linoleik asit, GF ile BCP10 arasında %18,56'dan %25,29'a yükselmiştir. Aynı şekilde palmitik asit ise, RB örneğinde %4,04'ten BCP10 ekmeğinde %8,80'e yükselmiştir. Genel olarak, CP ilavesindeki artış ile çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) ve doymuş yağ asitleri (SFA) içeriğinde artış gözlemlenirken; tekli doymamış yağ asitlerinde (MUFA) azalma olduğu tespit edilmiştir. CP ile değiştirilen nişasta miktarındaki artış ile, ekmekteki polifenol içeriğinin %336 arttığı (RB'ye karşı BCP10) gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak CP ilavesi ile antioksidan aktivite de artış göstermiştir. Vücut sıvılarındaki β -glukuronidaz aktivitesinin seviyesi, belirli patolojik durumların tanısında potansiyel bir biyobelirteçtir. Çalışmada β -glukuronidaz aktivitesi de incelenmiştir. BCP6 ve BCP10 kullanılması, bağırsak mikroflorasında ortalama %63,5'lük azalmaya neden olmuştur. Bu sonuçla CP'nin yeni bir β -glukuronidaz inhibitörü olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak, kriket tozu glutensiz fonksiyonel gıdaların üretimi için umut verici bir hammadedir [73].

Cruz-López vd. (2022), sosislerde et bağlayıcı olarak kullanılan patates nişastasının yerine çekirge ununun kullanımını araştırmışlardır. Protein içeriğini arttırmayı ve tüketiciler tarafından kabul edilebilirliğini sağlamayı amaçlamışlardır. Sosisler, Kontrol, F1, F2, F3 ve F4 şeklinde hazırlanmıştır. Numuneler kontrol, F1, F2, F3 ve F4 şeklinde adlandırılarak çekirge unu sırasıyla %0, %3, %5, %7 ve %10 konsantrasyonlarında ve patates nişastasını ise sırasıyla %10, %0, %3, %5 ve %7 şeklinde içecek şekilde formülize edilmiştir. Çekirge, sosis içinde kullanılması için un haline getirilmiştir. Un yaklaşık olarak %48 nem, %6.7, yağ ve %45 protein içermektedir. Kavurma işlemi sırasında çekirgelede kararma görülmüştür. Bu kararma, aminoasitlerin ve şekerlerin varlığı nedeniyle Maillard reaksiyonunun gerçekleşmesinden olabilmektedir. Çalışmada numunelerin dokusal özellikleri (sertlik, esneklik, yapışkanlık, çiğneme) ve renk parametreleri incelenmiştir. Sonuç olarak, en yüksek sertliğe sahip olan formülasyonun F2 olduğu, kontrol numunesine göre tüm formülasyonların sertlik içeriğinin önemli ölçüde artış gösterdiği belirtilmiştir. Esneklik ve yapışkanlık özellikleri bakımından formülasyonlar arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır ($p>0.05$). Çiğneme özelliği çekirge unu artışına bağlı olarak artış göstermiştir. Besin içeriği açısından incelemek gerekirse, su aktivitesi ve yağ değerleri, kontrol numunesiyle diğer formülasyonlar arasında önemli bir fark göstermemiştir. Protein içeriği çekirge ununun artması ile anlamlı bir yükselme göstermiştir ($p<0.05$). Sodyum içeriği de anlamlı ölçüde artmıştır ($p<0.05$). Sosisler için duyu analizi uygulanmıştır. Panelistler tarafından tasvir edilen aromalar, sirke kokusu, soğan kokusu, baharatlı, biber kokusu ve bitki kokusu şeklindedir. Panelistlerin en çok beğendiği formülasyonların F1 ve F2 olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmayla çekirgenin pişmiş bir et ürününe et bağlayıcısı olarak dahil edilebileceği ortaya çıkmıştır. Ayrıca çekirgenin protein miktarı ve kalitesi ile beslenme açısından sosislerin katma değerini arttırdığı görülmüştür [74].

Biro vd. (2019), ipek böceği ile zenginleştirilmiş karabuğday makarnasının gelişimini, teknolojik ve duyu analizi değerlendirmesini yapmayı amaçlamışlardır. Makarna formülasyonlarında besin içeriği bakımından zengin olan karabuğday unu kullanılmıştır. Kontrol (F1, %0 ipek böceği tozu, 100 g karabuğday unu), F2 (%5 ipek böceği tozu, 95 g karabuğday unu), F3 (%10 ipek böceği tozu, 90 g karabuğday unu), SW0 (%20 buğday glütenu, %0 ipek böceği tozu, 80 g karabuğday unu), SW5 (%20 buğday glütenu, %5 ipek böceği tozu, 75 g karabuğday unu) ve SW10 (%20 buğday glütenu, %10 ipek böceği tozu, 70 g karabuğday unu) formülasyonlarına göre makarnalar hazırlanmıştır. %5 ipek böceği tozu eklenmesi protein içeriğini 26.2 g'dan 28.2 g'a yükseltirken, %10 kullanılması 30.3 g'a yükseltmiştir. Enerji değerini ise, 100 g makarna için ortalama 2.7 kcal arttırmıştır. Yağ ve lif içeriğinde anlamlı bir değişiklik olmamıştır ($p>0.05$). Yapılan pişirme süresi analizinde ise %10 ipek böceği tozu içeren numunenin diğer iki formülasyondan daha kısa sürede piştiği gözlemlenmiştir. %5 oranında ipek böceği tozunun katılması makarnanın sertliğini ve yapışkanlığını arttırmıştır. %10 ipek böceği içerikli makarna en yüksek beğeni puanına ve en iyi beslenme parametrelerine sahiptir. Bu beğeniye, makarnanın yapışkan olmaması ile renginin ve sertliğinin uygun olması etkilemiştir. Sonuç olarak, makarna formülasyonunda

ipek böceği kullanımıyla protein içeriğinin artışı, duyuşal ve dokusal analizlerde uygun değerler elde edilmesi sebebiyle sağlıklı ürünleri zenginleştirmek amacıyla kullanılabilen uygun bir yöntem olduğu ortaya çıkmıştır [75].

Roncolini vd. (2020), bir atıştırılmalık olan peksimetlerde, protein ve mineral değerlerini arttırmak amacıyla buğday unu ikamesi olarak un kurdu (*Alphitobius diaperinus*) (LP) tozunun kullanımını incelemiştir. Çalışmada elde edilen peksimetlerde, bileşim analizleri ile mikrobiyolojik analizleri gerçekleştirilmiş ve örneklerin duyuşal özellikleri değerlendirilmiştir. Buğday unu kullanılarak hazırlanan peksimet (kontrol), %10 oranında un kurdu tozu ve %90 buğday unu kullanılarak hazırlanan peksimet (LP10) ve %30 oranında un kurdu tozu ve %70 oranında buğday unu kullanılarak peksimet (LP30) hazırlanmıştır. İkame seviyesi arttıkça, protein, kül ve yağ içeriğinin doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Bu bağlamda en yüksek besin içeriği LP30 örneğinde görülmüştür. Protein içeriği, kontrol, LP10 ve LP30 için sırasıyla 12.53 g/100, 16.03 g/100g ve 22.61 g/100g şeklinde bulunmuştur. Lif içeriğinin LP30 örneğinde kontrole göre 2 kat arttığı ve yağ yüzdesinin ise 4 kat arttığı görülmüştür. Mineraller açısından değerlendirilirse, çinko, demir, magnezyum, kalsiyum ve fosfor içerikleri yaklaşık olarak 3 kat artmıştır. Mikrobiyolojik analizler sonucunda, *Bacillus* ve *Clostridium* gibi spor oluşturan bakteriler tespit edilmiştir. Böcek bazlı ürünlerde, aerobik bakteri sporlarının izlenmesi önerilmiştir. Bu bağlamda su aktivitesi değerlerine bakılmıştır. Bu değerler gelişim için uygun değerler olmadığından risk oluşturmamaktadır. Fakat güvenlik sorunlarına ilişkin endişeleri azaltmak amacıyla ikinci bir ısıl işlem uygulanmasının mikrobiyal yükü azaltabileceği öne sürülmüştür. Un kurdu kullanımı ile doğru orantılı olarak esansiyel amino asitlerin (valin, treonin, izolösin, lösin, tirozin, lisin ve histidin) ve esansiyel olmayan aminoasitlerin (aspartik asit, glisin ve alanin) değerlerinin anlamlı derecede yükseldiği belirtilmiştir ($p<0.05$). Duyusal analizlerde en yüksek puanı LP10, en düşük puanı ise LP30 örneği almıştır. Bu çalışmada, un kurdu peksimetinin verimliliğini ve kalitesini arttırmada yardımcı olduğu ve tüketicilerin beğenisini kazanarak endüstri için yeni bir fonksiyonel gıda eldesine imkân sağlayabileceği sonucuna varılmıştır [76].

Igual vd. (2021), un kurtları (*A. diaperinus* ve *T. molitor*) ve bezelye proteini ile zenginleştirilmiş ekmeklerin in vitro sindirimi sırasında aminoasit salınımını araştırmışlardır. Deneyde kullanılacak ekmekleri üretmek için bezelye protein tozu (P), *A. diaperinus* (AD) ve *T. molitor* (TM) (%5 ve %10) kullanılmıştır. Yenilebilir böcekler ile zenginleştirmede protein içeriği önemli ölçüde artış göstermiştir. En yüksek değeri TM10 (338.2 mg/100g) vermiştir. Vücudumuzda en yüksek aminoasit salınımı bağırsakta görülmektedir. Midede salınan pepsin ile proteinler parçalanarak aminoasitlere dönüşmektedir. Parçalamadan sonra incelenen numuneler arasında aminoasit içeriklerinin sırasıyla P10, TM10, AD10, P5, AD5, TM5 ve kontrol (C) şeklinde olduğu görülmüştür. Bu bağlamda bezelye ve un kurdu çeşitlerini gıdada kullanmak, vücut emilimi için kontrole göre daha yüksek aminoasit erişilebilirliği sunmuştur. Çalışmada 20 esansiyel aminoasitten 9 tanesinin (histidin, izolösin, lösin, lisin, metionin, fenilalanin, treonin, triptofan ve valin) yüksek değerler verdiği belirtilmiştir. Ek olarak aspartik asit, taurin, gama aminobütirik asit (GABA), arginin ve sitrülin değerleri kontrol ve bezelye proteini ile zenginleştirilmiş örneklerine göre un kurdu ile zenginleştirilen örneklerde daha yüksek değerler vermiştir. Ekmek içindeki zenginleştirme konsantrasyonunun artmasıyla toplam aminoasit salınımının olumlu yönde etkilendiği tespit edilmiştir. Toplam aminoasit salınımı bakımından en iyi sonucu bezelye tozu ile zenginleştirilen örnek verirken; %10 konsantrasyonda un kurdu ile zenginleştirilen ekmeklerde de aminoasit salınımı bakımından tatmin edici değerler bulunmuştur [77].

Biro vd. (2020), lif, protein, B vitamini ve mineral içeriği yüksek olan yulaf ürünlerinin, böcek tozları ile zenginleştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Esas amaç, yulaf unu yerine kriket tozu kullanılabilirliğini incelemek olmuştur. Bunun için yulaf ile üretilen bisküvilerde farklı miktarlarda öğütülmüş kriket kullanılmıştır. Nihai ürünün dokusal, duyuşal ve besin bileşimi hakkında gerekli analizler yapılmıştır. Tüm bisküvilere renk farklılıklarını gidermek amacıyla %20 oranında karabuğday unu ilave edilmiştir. CP0, CP5, CP10 VE CP15 formülasyonlarında sırasıyla %0, %5, %10 ve %15 oranlarında kriket tozu, %80, %75, %70 ve %65 oranlarında yulaf unu kullanılmıştır. 100 g'da CP5 örneğinde 9.48 g, CP10 örneğinde 12.97 g ve CP15 örneğinde ise 14.71 g protein içerdiği bulunmuştur. Karbonhidrat ve enerji düzeylerinde anlamlı bir fark görülmemiştir ($p>0.05$). Lif içeriği zenginleştirme ile orantılı olarak azalma (7g/100g'dan 5.98g/100g'a kadar azalma) göstermiştir. Avrupa Birliği'nin 1924/2006 sayılı Beslenme ve Gıdalara İlişkin Sağlık İddiaları Yönetmeliği'ne göre "bir gıdanın protein kaynağı olduğu iddiası, ancak gıdanın içeriğinde en az %12 oranında protein olması şeklinde sağlanmaktadır." ifadesi bulunmaktadır. Bu ifadeye göre %10 ve %15 oranında kriket tozuyla zenginleştirilmiş bisküvilere "protein kaynağıdır" denilebilir. Kriket tozunun artışı ile bisküvilerde, renkte koyulma gözlemlenmiştir. Literatür ile karşılaştırıldığında birçok nedenden dolayı kaynaklandığı fakat diğer çalışmalarla benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Sertlik analizine göre numuneler arası anlamlı bir fark görülmemiştir

($p>0.05$). 50 kişilik panelist grubu ile duyu analizler gerçekleştirilmiştir. Panelistler tarafından bisküviler genellikle koyu ve kahverengi renge, ayçiçeği kokusuna, gevrek ve yapışkan dokuya, ayçiçeği çekirdeği tadına, yanmış tada, balık tadına, acı ve baharatlı tada sahip şekilde değerlendirilmiştir. Duyusal analizlerde CP5 örneği, diğer örnekler göre daha çok beğenilmiştir. Diğer örneklerin daha az beğenilmesinin ana nedenleri, kahverengi renk ve yanmış tada sahip olmaları olarak açıklanmıştır. Böceklerle zenginleştirilmiş unlu mamullerdeki bu sorunu çözmek için farklı böcek türleri kullanımına ve daha fazla analize ihtiyaç duyulmaktadır [78].

Günümüzde yenilebilir böcekler, yaygın olarak gıda veya yem olarak kullanılmaktadır. Böcekler, yağ asitleri bileşimi bakımından zengin olsalar da genellikle düşük omega-3 (n-3) içeriğine sahiptirler. Buna rağmen yenilebilir böceklerin omega-6/omega-3 oranı yüksektir. Oonincx vd. (2020), üç böcek türünün diyetinde keten tohumu yağı kullanarak, beslenmenin böceklerin yağ asidi bileşimleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Cırcır böceği (*Acheta domesticus*), un kurdu (*Alphitobius diaperinus*) ve kara asker sineği (*Hermetia illucens*) türlerinde, %0, %1, %2 ve %4 oranlarında keten tohumu yağı ile zenginleştirilen bir diyet uygulanmıştır. Diyetlerin ve böceklerin yağ asidi profilleri GC-MS ile belirlenmiştir. Yetiştirilme koşulları tüm böcekler için aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Üç tür, uygulanan kontrol diyetiyle hayatta kalmıştır. Keten tohumu ile zenginleştirilmiş diyetle beslenmeleri sonucunda böceklerin oleik asit ve linolenik asit içerikleri anlamlı ölçüde artmıştır ($p<0.05$). Omega-3 içeriği, kriket için %0.8'den %12.7'ye, un kurdu için %1.2'den %10.9'a ve kara asker sineği için ise %0.5'ten %9.7'ye artış göstermiştir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), omega-6/omega-3 oranının 5:1-10:1 aralığında tutulmasını önermektedir. Diyetle keten tohumu ilavesi ile yenilebilir böceklerin besin içeriğindeki bu oran artırılabilir. İnsan tüketimi için en uygun değerler, kriket ve un kurdu için %2, kara asker sineği için %1 keten tohumu yağının diyetle ilavesi ile elde edilmiştir. Uygulanan bu yöntemin, gıdalarda ve yemlerde yenilebilir böceklerin kullanımında elde edilen verimi daha da yükseltebileceği sonucuna varılmıştır [79].

Akande vd. (2020), bisküvi formülasyonlarına ipek böceği ve çekirge tozları ile zenginleştirme uygulayarak, elde edilen bisküvilerin fizikokimyasal, duyu ve dokusal özelliklerini değerlendirmiştir. Kontrol bisküvisi %15 oranla yağsız süt tozu ile hazırlanmıştır. Diğer formülasyonlarda yağsız süt tozu yerine ipek böceği ve çekirge tozları kullanılmıştır. İpek böceği tozu kullanılması ile bisküvilerin protein içeriği 60.7 g/100g; çekirge kullanılması ile bisküvilerin protein içeriği ise 43.2 g/100g olarak bulunmuştur. Yağ ve enerji içerikleri de ipek böceği tozu kullanılarak formülasyonu geliştirilen bisküvi örneğinde daha fazla bulunmuştur. 3 örnek içinde dokusal analizler yapılmıştır. Bütün örnekler yüksek yayılma oranı göstermiştir. Yüksek yayılma oranı, yüksek gluten mukavemeti içindeki lipit dağılımı ile ilişkilendirilmiştir. Çekirge tozu ile zenginleştirilmiş bisküvide vitaminler ve mineraller anlamlı ölçüde yüksek çıkmıştır. Çekirgenin askorbik asit ve pro-vitamin A açısından yüksek olduğu bilindiğinden beklenen bir sonuç elde edilmiştir. Ek olarak çinko, fosfor ve potasyum ipek böceği ve yağsız süt tozu ile üretilen bisküvilere kıyasla çekirge tozu ile üretilen bisküvide anlamlı ölçüde fazla bulunmuştur. Duyusal analizlerde en çok beğenilen, yağsız süt tozu ile üretilen bisküvi (kontrol örneği) olmuştur. Fakat ipek böceği ve çekirge tozunun kullanılmasıyla elde edilen bisküvilerde, panelistlerden kabul edilebilir puanlar almıştır. Alternatif protein kaynakları olarak yenilebilir böcekler kullanılarak önemli besin içeriğine sahip bisküvilerin geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır [80].

Montevicchi vd. (2021), kara asker sineğinin, buğday ekmeğini fiziksel, kimyasal ve duyu özellikleri bakımından güçlendirmek amacıyla çalışmışlardır. Buğday ekmeği için BSFP20 örneği 20 g kara asker sineği 980 g buğday unu, BSFP40 örneği 40 g kara asker sineği 960 g buğday unu içecek şekilde formülize edilmiştir. Buğday ekmeğine kara asker sineği ununun formülasyona eklenmesi mineral ve protein içeriğini arttırmıştır. BSFP40 unu örneğinde toplam aminoasitler önemli ölçüde artarken, valin, treonin, lizin ve fenilalanin esansiyel amino asitleri 3-4 katına çıkarak çalışmada dikkat çekmektedir. BSFP40 unu ile üretilen ekmekte de benzer sonuçlar görülmüştür. Fizikokimyasal sonuçlar değerlendirildiğinde önemli bir fark yaratmayarak sonuçlar olumlu çıkmıştır ($p>0.05$). Duyusal olarak değerlendirildiğinde her iki un örneği ile üretilen ekmelerde kabul edilebilir değerler alınırken, BSFP20 örneği panelistlerden daha yüksek sonuçlar almıştır. Sonuç olarak kara asker sineğinin buğday ununu güçlendirdiği ve ticari olarak kara asker sineği ile buğday ununu formülize ederek ekmek üretimi için yol gösterici olmuştur [81].

Et analogları, konvansiyonel et ürünlerinden proteince zengindir. Ayrıca su aktiviteleri düşük (<0.90) olduğundan raf ömrü uzundur. Kim vd. (2022), kurutulmuş et analoguna 0, 20, 40 ve 60 oranlarında un kurdu (*T. molitor*) ekleyerek fizikokimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Un kurdu oranının artması nemli içeriğinde ve su aktivitesinde yaklaşık %8'lik bir azalmaya neden olmuştur. Beklendiği üzere toplam protein oranını arttırarak %60 oranında un kurdu eklenen et analogunda valin, histidin, izolösin, treonin ve lizin esansiyel aminoasitleri artış göstermiştir. Esansiyel olmayan amino asitlerinde ise tirozin, glisin ve alanin yaklaşık %79 oranında artmıştır. Artan un kurdu ile protein denatürasyonunun önlenmesi ve dokusal özelliklerin daha iyi

korunduğu görülmüştür. Sonuç olarak, diğer et analogları yerine un kurdu ile hazırlanan et analogu besin içeriği bakımından benzer veya daha iyi sonuçlar vermiştir [82].

David-Birman vd. (2022), dondurma formülasyonuna %1, %4 ve %7 oranlarında ipek böceği tozu ilave etmişlerdir. Ek olarak formülasyona duyuşal değeriendirme için %2.5 ipek böceği tozu içeren dondurmada eklenmiştir. İpek böceği tozunun kitin bakımından zengin olduğu daha önceki çalışmalarda ortaya konmuştur. Kitin içeriği dondurmada bazı dokusal özellikleri değiştirmiştir. Hacim yüzdesi, ipek böceği tozuna bağlı olarak azalmıştır. İpek böceği tozu arttıkça, yüzey gerilimi arttığından hava kabarcıkları görünümü azalmıştır. Kitin içeriğinden dolayı dondurmanın viskozitesinde önemli bir rol oynamıştır. İpek böceği tozu eklenmesi viskozitede artışa ve krema hacminde azalmasına neden olmuştur. Dondurmada oluşan köpüğün kremadan ayrılması gözlemlenmiş, bu durum ise raf ömründe iyileşme sağlamıştır. Doku analizinde yapışkanlık ve sertlik değerlerini değiştirerek dondurma dokusuna olumlu özellikler kazandırmıştır. Duyusal değeriendirmede dondurmada ipek böceğinin oranı arttıkça tadın yoğunlaşmasından kaynaklanan ağızda kalan tat hissi artmıştır. %1'den %4 içeriğine doğru alınan puanlar azalsa da %2.5 oranda dondurma formülasyonuna eklenmesi kabul edilebilirdir. Sonuç olarak ipek böceği tozunun dondurma formülasyonuna eklenmesi gıdanın içeriğini güçlendirerek değeri bir beslenme potansiyeline sahiptir [83].

Sriprablom vd. (2022), *T. molitor* ve *Z. atratus* unları ile kurabiyelerin besin içeriğini zenginleştirmeyi ve fonksiyonel özelliklerini arttırmayı amaçlamışlardır. Kurabiye formülasyonuna buğday unu ikamesi yaparak *T. molitor* ve *Z. atratus* unlarını %10, %20 ve %30 oranlarında eklemiştirlerdir. Protein içeriği %30 oranında *T. molitor* unu içeren kurabiyede %56.7, %30 oranında *Z. atratus* unu içeren kurabiyede %58.7 arttırmıştır. Un kurtlarının kurabiyede buğday unu ikamesi olarak kullanımı nem içeriğini iyileştirerek raf ömrünü arttırmıştır. Renk ölçümlerinde genel olarak kurabiyelerin rengi koyulaşmıştır. Pişirme işlemine bağlı olarak amino asitler ile proteinlerin amin grupları arasında meydana gelen Maillard reaksiyonu ile açıklanabilir. Un kurtları unu ile zenginleştirilmiş kurabiye hamurunda sertlik artmış ve hamurun mukavemetini olumsuz yönde etkilenmiştir. Duyusal değeriendirmede böcek unu artması ile alınan puanlar azalmıştır. *T. molitor* ve *Z. atratus* unu ile %20 ikame düzeyine kadar kabul edilebilir puanlar aldığı ortaya konmuştur. Sonuç olarak *T. molitor* ve *Z. atratus* unlarının kurabiye formülasyonuna dahil edilmesi protein içeriğini arttırarak, kurabiye üretiminde kullanılmak üzere böcek unlarının yenilikçi ve sürdürülebilir içerik kaynağı olabileceğini göstermiştir [84].

IV. SONUÇLAR

Böcekler, küresel proteini taleplerini karşılamaya yardımcı olabilecek ve böylece küresel gıda güvenliğine katkıda bulunabilecek alternatif bir protein kaynağı olarak önerilmektedir. Yenilebilir böcek tüketimi ile insan diyetinde gerekli olan günlük vitamin, mineral ve esansiyel aminoasit ihtiyacı sağlanabilmektedir. Yenilebilir böceklerin insan sağlığını geliştirmede olumlu etkisinin olduğu bilinmektedir. Fakat gıda güvenliği ile ilgili toplumlarda bir önyargı mevcuttur. Bu önyargıları kırmada yenilebilir böceklerin beslenme açısından üstünlüklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Yenilebilir böcekler potansiyel alerjenik, toksik veya antinutrisyonel riskleri taşıdıklarından, araştırmalarda ve tüketimde gıda güvenliğini sağlamak önemlidir. Ülkemiz araştırmacıları tarafından yenilebilir böceklerin gıda güvenliği hakkında yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Yenilebilir böceklerin beslenme açısından bazı üstünlükleri, yenilebilir böcekler protein açısından oldukça zengin bir içeriğe sahiptirler ve B₁₂ içerikleri biftekten 20 kat daha fazladır; kalsiyum oranları süttten daha yüksektir; içerdikleri yararlı probiyotikler sayesinde bağırsaklar için faydalıdır ve kitin açısından oldukça zengindirler. Böcek unları ve tozları ile zenginleştirme çalışmaları unlu mamullerde oldukça yaygındır. Diğer gıdalarda kullanımı hakkında çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. Literatürde gıda güvenliği, üretim aşamaları, mevzuatların geliştirilmesi, tüketici kabulü ve pazar uygulamalarının iyileştirilmesi gibi konular hakkında daha fazla çalışmaya gerek duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] FAO, (2019). Food and Agriculture Organization of the United Nations World Health Organization, Sustainable Healthy Diets Guiding Principles. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, <http://www.fao.org/3/ca6640en/CA6640EN.pdf> / (Erişim: 25.05.2022).
- [2] FAO, (2017). The Future of Food and Agriculture, Trends and Challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf> / (Erişim: 25.05.2022).
- [3] Van Huis, A., & Oonincx, D. G. (2017). The Environmental Sustainability of Insects as Food and Feed, A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5), 1-14.

- [4] Van der Spiegel, M., Noordam, M. Y., & Van der Fels- Klerx, H. J. (2013). Safety of Novel Protein Sources (Insects, Microalgae, Seaweed, Duckweed, and Rapeseed) and Legislative Aspects for Their Application in Food and Feed Production. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 12(6), 662-678.
- [5] Van Huis, A. (2020). Insects As Food and Feed, A New Emerging Agricultural Sector: A Review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(1), 27-44.
- [6] Imathiu, S. (2020). Benefits and Food Safety Concerns Associated with Consumption of Edible Insects. *NFS Journal*, 18, 1-11.
- [7] İpçak, H. H., Özüretmen, S., Alçıçek, A., & Özdeş, H. (2018). Alternatif Protein Kaynaklarının Hayvan Beslemede Kullanım Olanakları. *Hayvansal Üretim*, 59(1), 51-58.
- [8] Özkan, M., & Güneş, E. (2020). Alternatif Gıda Kaynağı Olarak Yenilebilir Böceklerin Kullanımına Dair Bakış Açılarının Değerlendirilmesi. *Journal Of Tourism and Gastronomy Studies*, 8(2), 839-851.
- [9] Perez-Santaescobal, C., De Winne, A., Devaere, J., & Fraeye, I. (2022). The Flavour of Edible Insects: A Comprehensive Review on Volatile Compounds and Their Analytical Assessment. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 352-367.
- [10] Güneş, E., & Özkan, M. (2018). Insects as Food and Feed in The Turkey: Current Behaviours. *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 1(1), 10-15.
- [11] Delvendahl, N., Rumpold, B. A., & Langen, N. (2022). Edible Insects as Food–Insect Welfare and Ethical Aspects from A Consumer Perspective. *Insects*, 13(2), 121.
- [12] Bisconsin-Júnior, A., Rodrigues, H., Behrens, J. H., da Silva, M. A. A. P., & Mariutti, L. R. B. (2022). “Food Made with Edible Insects”: Exploring the Social Representation of Entomophagy Where It Is Unfamiliar. *Appetite*, 173, 106001.
- [13] İncekara, Ü. (2017). Opportunities For Using the Insect Potential in Wetlands of Turkey as An Alternative Protein Source. *The Black Sea Journal of Sciences*, 7(1), 117-125.
- [14] Koç, K., İncekara, Ü. & Türkez, H., (2014). Biomonitoring of the Potential of Genotoxic and Oxidative Effects of Commercial Edible Dung Beetles (Onitis Sp.), Flying Grasshopper (Caelifera Sp.) and Mole Crickets (Gryllotalpa Sp.). *Toxicology and Industrial Health*, 30(8), 683-689.
- [15] Türkez, H., İncekara, Ü., Güner, A., Aydın E., Dirican, E. & Togar, B. (2014). The Cytogenetic Effects of The Aqueous Extracts of Migratory Locust (Locusta Migratoria) in Vitro. *Toxicology and Industrial Health*, 30(3), 233-237.
- [16] Memiş, E., Türkez, H., İncekara, Ü., Banjo, A.D. & Fasunwon, B.T. (2013). In Vitro Biomonitoring of The Genotoxic and Oxidative Potentials of Two Commonly Eaten Insects in Southwestern Nigeria, *Toxicology and Industrial Health*, 29 (1), 52-59.
- [17] Türkez, H., İncekara, Ü. & Erman, O. (2010). Biomonitoring of the Genotoxic Potentials of Aqueous Extracts of Two Edible Insects Species in Vitro. *Turkish Journal of Entomology*, 34 (4), 411-417.
- [18] Koç, K., İncekara, Ü., Türkez, H. & Çelik, K. (2019). In Vitro Assessment of Genotoxic and Oxidative Effects Potentials of Edible Bamboo Worms and Weaver Ants. *Munis Entomology & Zoology*, 14 (2), 496-501.
- [19] Koç, K., Memiş, E., Polat, H., Türkez, H., & İncekara, Ü. (2012). Effects Potentials of Commercial Edible Heterometrus pinnifer in Vitro. *Munis Entomology & Zoology*, 7(1), 496-501.
- [20] Aydoğan, Z., İncekara, Ü. & Gürol, A. (2018). Preliminary Study on Edible Insect Species *Cybister limbatus* (Fabricius 1775) and Its Heavy Element Contents. *Anadolu Journal of Aegean Agricultural Research Institute*, 28(1), 94-99.
- [21] Özdal, M., İncekara, Ü., Polat, A., Gur, Ö., Kurbanoglu, E.B. & Taşar, G. E. (2012). Isolation of Filamentous Fungi Associated with Two Common Edible Aquatic Insects, *Hydrophilus piceus* and *Dytiscus marginalis*. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2 (1), 95-105.
- [22] Aydoğan, Z. (2021). Anthro-Entomophagy: Quantitatively Chemical Assessment of Some Edible Arthropods, Bought from an E-Shop. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 15462-15470.
- [23] Mishyna, M., Keppler, J. K., & Chen, J. (2021). Techno-Functional Properties of Edible Insect Proteins and Effects of Processing. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 56, 101508.
- [24] Güneş, E. (2018). Gastronomide Güncel Konular. Billur Yayınevi, Konya, 14, (281-308).
- [25] Nowakowski, A. C., Miller, A. C., Miller, M. E., Xiao, H., & Wu, X. (2022). Potential Health Benefits of Edible Insects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(13), 3499-3508.
- [26] Wade, M., & Hoelle, J. (2020). A Review of Edible Insect Industrialization: Scales of Production and Implications for Sustainability. *Environmental Research Letters*, 15(12), 123013.

- [27] Barbi, S., Macavei, L.I., Fuso, A., Luparelli, A.V., Caligiani, A., Ferrari, A.M., Maistrello, L. & Montorsi, M. (2020). Valorization of Seasonal Agri-Food Leftovers Through Insects. *Science of the Total Environ*, 709, 136209.
- [28] Kim, T. K., Cha, J. Y., Yong, H. I., Jang, H. W., Jung, S., & Choi, Y. S. (2022). Application of Edible Insects as Novel Protein Sources and Strategies for Improving Their Processing. *Food Science of Animal Resources*, 42(3), 372.
- [29] Kaymaz, E., & Ulema, Ş. (2020). Yenilebilir Böceklerin Menülerde Kullanılması Üzerine Bir Araştırma-Kapadokya Örneği. *Journal of Travel and Tourism Research*, (14), 46-63.
- [30] Van Huis, A., Van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., & Vantomme, P. (2013). Edible Insects: Future Prospects for Food and Feed Security (No. 171). Food and agriculture organization of the United Nations.
- [31] Skotnicka, M., Karwowska, K., Kłobukowski, F., Borkowska, A., & Pieszko, M. (2021). Possibilities of the Development of Edible Insect-Based Foods in Europe. *Foods*, 10(4), 766.
- [32] Alamu, O. T., Amao, A. O., Nwokedi, C. I., Oke, O. A. & Lawa, I. O. (2012). Diversity and Nutritional Status of Edible Insects in Nigeria: A Review. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 5 (4), 215-222.
- [33] Gao, Y., Zhao, Y. J., Xu, M. L., & Shi, S. S. (2021). *Clanis bilineata tsingtauca*: A Sustainable Edible Insect Resource. *Sustainability*, 13(22), 12533.
- [34] FAO (2020). Insects for Food and Feed. The Contribution of Insects to Food Security, Livelihoods and the Environment. <http://www.fao.org/edible-insects/en/> (Erişim: 26.05.2022).
- [35] Mintah, B. K., He, R., Agyekum, A. A., Dabbour, M., Golly, M. K., & Ma, H. (2020). Edible Insect Protein for Food Applications: Extraction, Composition, and Functional Properties. *Journal of Food Process Engineering*, 43(4), e13362.
- [36] Gravel, A., & Doyen, A. (2020). The Use of Edible Insect Proteins in Food: Challenges and Issues Related to Their Functional Properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 59, 102272.
- [37] Borges, M. M., da Costa, D. V., Trombete, F. M., & Câmara, A. K. F. I. (2022). Edible Insects as a Sustainable Alternative to Food Products: An Insight into Quality Aspects of Reformulated Bakery and Meat Products. *Current Opinion in Food Science*, 100864.
- [38] Güneş E., Özkan M. & Şahin G.R. (2018). Güncel Turizm Araştırmaları. İKSAD Yayınevi, Ankara, 156-168.
- [39] Magara, H. J., Niassy, S., Ayieko, M. A., Mukundamago, M., Egonyu, J. P., Tanga, C. M., ... & Ekese, S. (2021). Edible Crickets (Orthoptera) Around the World: Distribution, Nutritional Value, and Other Benefits—A Review. *Frontiers in nutrition*, 7, 257.
- [40] Jansson, A. and Berggren, Å. (2015). *Insects as Food-Something for the Future 1st ed.* Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 14-20.
- [41] Özen, E. Z. (2018). Gastronomi ve Yiyecek Tarihi. Detay Yayıncılık, Ankara, 310-327.
- [42] Kemsawasd, V., Inthachat, W., Suttisansanee, U., & Temviriyankul, P. (2022). Road to the Red Carpet of Edible Crickets Through Integration into the Human Food Chain with Biofunctions and Sustainability: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1801.
- [43] da Silva Lucas, A. J., de Oliveira, L. M., da Rocha, M., & Prentice, C. (2020). Edible Insects: An Alternative of Nutritional, Functional and Bioactive Compounds. *Food chemistry*, 311, 126022.
- [44] Schmidt, A., Call, L. M., Macheiner, L., & Mayer, H. K. (2019). Determination of Vitamin B12 in Four Edible Insect Species by Immunoaffinity and Ultra-High Performance Liquid Chromatography. *Food chemistry*, 281, 124-129.
- [45] Köhler, R., Kariuki, L., Lambert, C., & Biesalski, H. K. (2019). Protein, Amino Acid and Mineral Composition of Some Edible Insects from Thailand. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 22(1), 372-378.
- [46] Manditsera, F. A., Luning, P. A., Fogliano, V., & Lakemond, C. M. (2019). Effect of Domestic Cooking Methods on Protein Digestibility and Mineral Bioaccessibility of Wild Harvested Adult Edible Insects. *Food Research International*, 121, 404-411.
- [47] Elhassan, M., Wendin, K., Olsson, V., & Langton, M. (2019). Quality Aspects of Insects as Food—Nutritional, Sensory, and Related Concepts. *Foods*, 8(3), 95.
- [48] Son, Y. J., Hwang, I. K., Nho, C. W., Kim, S. M., & Kim, S. H. (2021). Determination of Carbohydrate Composition in Mealworm (*Tenebrio Molitor* L.) Larvae and Characterization of Mealworm Chitin and Chitosan. *Foods*, 10(3), 640.
- [49] Smith, R., Pryor, R., (2019). Enabling the Exploitation of Insects as a Sustainable Source of Protein for Animal Feed and Human Nutrition, 46th University of Nottingham Feed Conference, United Kingdom, 5, 1.

- [50] Jozefiak, D., & Engberg, R.M. (2015). Insect as Poultry Feed. 20th European symposium on Poultry Nutrition, Prague, Czech Republic, 24, 27.
- [51] Pyo, S. J., Kang, D. G., Jung, C., & Sohn, H. Y. (2020). Anti-thrombotic, Antioxidant and Haemolysis Activities of Six Edible Insect Species. *Foods*, 9(4), 401.
- [52] Gessner, D. K., Schwarz, A., Meyer, S., Wen, G., Most, E., Zorn, H., & Eder, K. (2019). Insect Meal as Alternative Protein Source Exerts Pronounced Lipid-Lowering Effects in Hyperlipidemic Obese Zucker Rats. *The Journal of Nutrition*, 149(4), 566-577.
- [53] Kuntadi, K., Adalina, Y., & Maharani, K. E. (2018). Nutritional Compositions of Six Edible Insects in Java. *Indonesian journal of forestry research*, 5(1), 57-68.
- [54] Kröncke, N., Grebenteuch, S., Keil, C., Demtröder, S., Kroh, L., Thünemann, A. F., & Haase, H. (2019). Effect of Different Drying Methods on Nutrient Quality of the Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*, 10(4), 84.
- [55] Papastavropoulou, K., Koupa, A., Kritikou, E., Kostakis, M., & Proestos, C. (2021). Edible Insects: Benefits and Potential Risk for Consumers and the Food Industry. *Biointerface Res Appl Chem*, 12, 5131-49.
- [56] Hong, J., Han, T., & Kim, Y. Y. (2020). Mealworm (*Tenebrio molitor* Larvae) as an Alternative Protein Source for Monogastric Animal: A Review. *Animals*, 10(11), 2068.
- [57] Lenaerts, S., Van Der Borgh, M., Callens, A., & Van Campenhout, L. (2018). Suitability of Microwave Drying for Mealworms (*Tenebrio Molitor*) as Alternative to Freeze Drying: Impact on Nutritional Quality and Colour. *Food chemistry*, 254, 129-136.
- [58] Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. (2017). Nutritional Value of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) and Its Suitability as Animal Feed—A Review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105-120.
- [59] Sevilmiş, U., Seydosoglu, S., Ayaşan, T., Bilgili, E., & Sevilmiş, D. (2019). Siyah Asker Sineğinin (*Hermetia illucens* L.) Yem Kaynağı Olarak Değerlendirilmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(4), 2379-2389.
- [60] Giannetto, A., Oliva, S., Riolo, K., Savastano, D., Parrino, V., Cappello, T., & Mauceri, A. (2020). Waste Valorization Via *Hermetia illucens* to Produce Protein-Rich Biomass for Feed: Insight into the Critical Nutrient Taurine. *Animals*, 10(9), 1710.
- [61] Matin, N., Utterback, P., & Parsons, C. M. (2021). True Metabolizable Energy and Amino Acid Digestibility in Black Soldier Fly Larvae Meals, Cricket Meal, and Mealworms Using a Precision-Fed Rooster Assay. *Poultry science*, 100(7), 101146.
- [62] Barragán-Fonseca, K. B. (2018). Flies Are What They Eat: Tailoring Nutrition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) for Larval Biomass Production and Fitness. Doctoral Dissertation, Wageningen University and Research, 19-45.
- [63] Kouřimská, L. & Adámková, A. (2016). Nutritional and Sensory Quality of Edible Insects. *NFS Journal*, 4, 22-26.
- [64] Karaman, R., & Bozok, D. (2019). Alternatif Besin Kaynağı Olarak Çekirge: Nitel Bir Uygulama. *Journal of Tourism and Gastronomy Studies*, 7(3), 1573-1587.
- [65] Purschke, B., Tanzmeister, H., Meinschmidt, P., Baumgartner, S., Lauter, K., & Jäger, H. (2018). Recovery of Soluble Proteins from Migratory locust (*Locusta migratoria*) and Characterisation of Their Compositional and Techno-functional properties. *Food Research International*, 106, 271-279.
- [66] Paul, A., Frederich, M., Uyttenbroeck, R., Hatt, S., Malik, P., Lebecque, S., ... & Danthine, S. (2016). Grasshoppers as a Food Source? A Review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20, 337-352.
- [67] Meyer-Rochow, V. B., Gahukar, R. T., Ghosh, S., & Jung, C. (2021). Chemical Composition, Nutrient Quality and Acceptability of Edible Insects Are Affected by Species, Developmental Stage, Gender, Diet, and Processing Method. *Foods*, 10(5), 1036.
- [68] Malinga, G. M., Acur, A., Ocen, P., Holm, S., Rutaro, K., Ochaya, S., & Roininen, H. (2022). Growth and Reproductive Performance of Edible Grasshopper (*Ruspoliadifferens*) on Different Artificial Diets. *Journal of Economic Entomology*, 115(3), 724-730.
- [69] Hirunyophat, P., Chalermchaiwat, P., On-nom, N., & Prinyawiwatkul, W. (2021). Selected Nutritional Quality and Physicochemical Properties of Silkworm Pupae (Frozen or Powdered) from Two Species. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(7), 3578-3587.
- [70] Rodríguez-Ortega, A., Pino-Moreno, J. M., Ángeles-Campos, S. C., García-Pérez, Á., Barrón-Yáñez, R. M., & Callejas-Hernández, J. (2016). Valornutritivo de Larvas Y Pupas de Gusano de Seda (*Bombyx Mori*) (Lepidoptera: Bombycidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 42(1), 69-74.

- [71] Tomotake, H., Katagiri, M., & Yamato, M. (2010). Silkworm Pupae (*Bombyx mori*) Are New Sources of High Quality Protein and Lipid. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 56(6), 446-448.
- [72] Longvah, T., Manghtya, K., & Qadri, S. S. (2012). Eri Silkworm: A Source of Edible Oil with A High Content Of A - Linolenic Acid and of Significant Nutritional Value. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(9), 1988-1993.
- [73] Kowalczewski, P. Ł., Gumienna, M., Rybicka, I., Górna, B., Sarbak, P., Dziedzic, K., & Kmiecik, D. (2021). Nutritional Value and Biological Activity of Gluten-Free Bread Enriched with Cricket Powder. *Molecules*, 26(4), 1184.
- [74] Cruz-López, S. O., Álvarez-Cisneros, Y. M., Domínguez-Soberanes, J., Escalona-Buendía, H. B., & Sánchez, C. N. (2022). Physicochemical and Sensory Characteristics of Sausages Made with Grasshopper (*Sphenarium Purpurascens*) Flour. *Foods*, 11(5), 704.
- [75] Biró, B., Fodor, R., Szedlák, I., Pásztor-Huszár, K., & Gere, A. (2019). Buckwheat-Pasta Enriched with Silkworm Powder: Technological Analysis and Sensory Evaluation. *LWT*, 116, 108542.
- [76] Roncolini, A., Milanović, V., Aquilanti, L., Cardinali, F., Garofalo, C., Sabbatini, R., ... & Osimani, A. (2020). Lesser Mealworm (*Alphitobius diaperinus*) Powder as A Novel Baking Ingredient for Manufacturing High-Protein, Mineral-Dense Snacks. *Food Research International*, 131, 109031.
- [77] Igual, M., García-Segovia, P., & Martínez-Monzó, J. (2021). Amino Acids Release from Enriched Bread with Edible Insect or Pea Protein During in Vitro Gastrointestinal Digestion. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 24, 100351.
- [78] Biró, B., Sipos, M. A., Kovács, A., Badak-Kerti, K., Pásztor-Huszár, K., & Gere, A. (2020). Cricket-Enriched Oat Biscuit: Technological Analysis and Sensory Evaluation. *Foods*, 9(11), 1561.
- [79] Oonincx, D. G., Laurent, S., Veenenbos, M. E., & van Loon, J. J. (2020). Dietary Enrichment of Edible Insects with Omega 3 Fatty Acids. *Insect science*, 27(3), 500-509.
- [80] Akande, A. O., Jolayemi, O. S., Adelugba, V. A., & Akande, S. T. (2020). Silkworm Pupae (*Bombyx mori*) and Locusts as Alternative Protein Sources for High-Energy Biscuits. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(1), 234-241.
- [81] Montevecchi, G., Licciardello, F., Masino, F., Miron, L. T., & Antonelli, A. (2021). Fortification of Wheat Flour with Black Soldier Fly Prepupae. Evaluation of Technological and Nutritional Parameters of the Intermediate Doughs and Final Baked Products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 69, 102666.
- [82] Kim, T. K., Yong, H. I., Cha, J. Y., Park, S. Y., Jung, S., & Choi, Y. S. (2022). Drying-Induced Restructured Jerky Analog Developed Using a Combination of Edible Insect Protein and Textured Vegetable Protein. *Food Chemistry*, 373, 131519.
- [83] David-Birman, T., Romano, A., Aga, A., Pascoviche, D., Davidovich-Pinhas, M., & Lesmes, U. (2022). Impact of Silkworm Pupae (*Bombyx mori*) Powder on Cream Foaming, Ice Cream Properties and Palatability. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102874.
- [84] Sriprabhom, J., Kitthawee, S., & Suphantharika, M. (2022). Functional and Physicochemical Properties of Cookies Enriched with Edible Insect (*Tenebrio molitor* And *Zophobas atratus*) Powders. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(3), 2181-2190.

Derleme Makalesi - Review Article

Biyomalzeme Türleri ve Biyouyumlu Metalik Elementler

Types of Biomaterials and Biocompatible Metallic Elements

Esra Balci^{1*}, Fethi Dağdelen²

Geliş / Received: 23/08/2022

Revize / Revised: 22/12/2022

Kabul / Accepted: 22/12/2022

ÖZ

Makro, mikro ve nano boyutta olan bazı malzemelerin biyomedikal uygulamaları; çeşitli hücre reseptörlerine, metallere bağlanan bir iyon veya moleküllere, yapısal proteinlere ve genetik malzemelere benzerlikleri nedeniyle her yıl katlanarak kullanımları artmaktadır. Çeşitli biyomalzemeler arasında, metalik esaslı implant malzemeleri, insanın hayatını kurtarmak ve uzatmak için ihtiyaç duyulan mükemmel doku/kemik/organ onarımı için yapı iskeleleri görevi sağlayabilir. Bu derleme, metalik biyoimplantlardaki son gelişmeleri vurgulayacak ve biyouyumlu metalik elementler hakkında genel bilgiler sunacaktır.

Anahtar Kelimeler- *Biyomalzeme, Biyometal, Biyouyumluluk, Titanyum, Ti-6Al-4V, NiTi.*

ABSTRACT

The biomedical applications of macro, micro and nanomaterials are increasing more and more every year due to their similarity to various cell receptors, ligands, structural proteins and genetic materials. Among the diverse biomaterials, metallic-based implant materials can ensure scaffolds for the great tissue/bone/organ fixing needed to save and prolong human life. This review will highlight the latest developments in metallic bioimplants and provide an overview of biocompatible metallic elements.

Keywords- *Biomaterial, Biometal, Biocompatibility, Titanium, Ti-6Al-4V, NiTi.*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: eesra0122@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-0127-7602>)

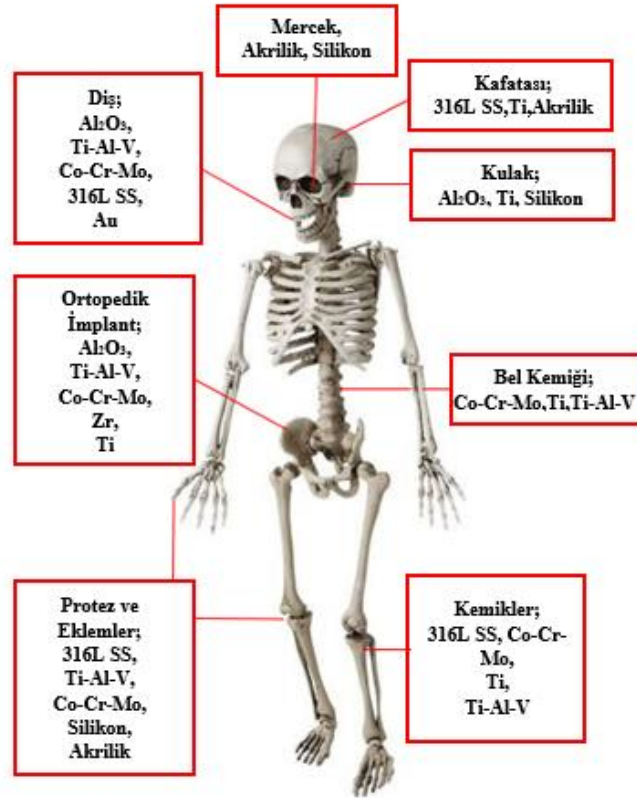
Fizik Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

²İletişim: fdagdelen@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9849-590X>)

Fizik Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

I.GİRİŞ

Biyomalzemelerin implantasyonu, insan hayatını kurtarmak ve uzatmak için en etkili stratejilerden biri olarak kabul edilmektedir [1]. Bu nedenle biyomalzemelerin kullanımına ihtiyaçlar oldukça artmaktadır. Ancak yine de bu malzemeler mekanik kararsızlık, enfeksiyon ve implante edilmiş biyomalzemelere karşı bağışıklık direncini düşüren reaksiyonlar gibi belirli sınırlamalara neden olma eğiliminde olabilirler [2]. Hastalık durumunda ya da oluşan hasarların tedavilerinde biyoyumlu malzemeler insan vücudunun çeşitli bölgelerinde plaka, diş dolguları, vida, çivi, protez, dikişler, iğneler, yapay kalp kapakları, kemikler, omuz, kalça, bilek gibi implant malzemeleri olarak kullanılabilir [3-7]. İnsan vücudu üzerinde kullanılan bazı biyomalzemeler Şekil 1'de verilmiştir [8].

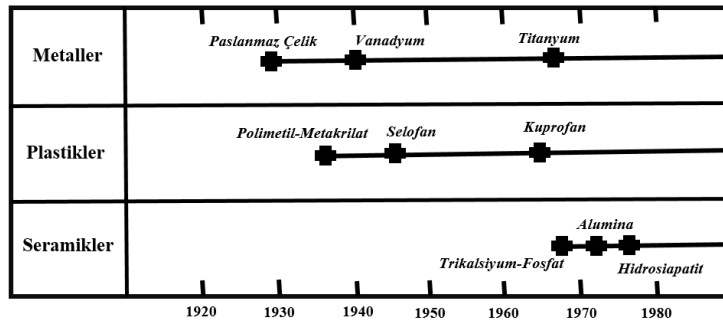


Şekil 1. İnsan vücudu üzerinde kullanılan bazı biyomalzemeler [8]

II. BİYOMALZEME TÜRLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

A) *Biyomalzeme Türleri*

Biyomalzeme olarak kullanılan implant ya da protezler 7000 yıldan daha da eski bir tarihe dayanmaktadır [9]. Antik çağda, yapay olan bir dişi komşu olan diğer dişlere bağlamak için altın teller temel bir iskele olarak kullanılmıştır. 1900'lerin başında ise kemik plakaları; kemik kırıklarının onarmak ve iyileşmelerini hızlandırmak için başarıyla kullanılmıştır. 1950'ler ve 1960'larda, kalça eklemleri ve yapay kalp kapakçıkları kullanılarak; kan damarı uygulamalarında kullanımları yaygın hale gelmiştir. Şekil 2'de temel olarak kullanılan metal, polimer ve seramik malzemelerin biyomedikal uygulamalardaki tarihini göstermektedir [10].



Şekil 2. Metal, polimer ve seramik malzemelerin biyomedikal uygulamalardaki tarihleri [10]

Yaygın olarak kullanılan bazı biyomalzeme türleri temel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

I. Metaller: Bir biyomalzeme sınıfı olarak metaller, yük taşıyan implantlar için (eklem ve kalça protezleri gibi) en yaygın olarak bilinen yapı iskelesidir. Örneğin ortopedik ameliyatlardan bazıları metalik implant kullanma seçeneğini elinde ön planda tutar. Bu malzeme grupları; basit teller, vidalar, kırık tespit plakaları, kalça, ayak bilekleri, dizler, omuzlar vb. için birçok eklem protezlerine kadar çeşitlilik gösterir. Dahası kalp damar cerrahisinde, çene cerrahisinde ve diş malzemeleri olarak kullanılan çoğu tıbbi implant uygulamalarında metalik implantlar tercih edilmektedir. Kristal yapılı ve mekanik özellikleri metallerin biyoyumlu malzeme olarak kullanılmasında onlara avantaj kazandırırken, sert ya da yüksek yoğunlukta olmaları kullanımlarını dezavantaja çevirebilir. Tıbbi cihaz uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan metaller ve alaşımlar; paslanmaz çelik (316L SS), titanyum ve alaşımları, kobalt esaslı alaşımlar ve tantal esaslı alaşımlardır [11-17].

II. Polimerler: Tıp alanında biyomalzeme olarak çok çeşitli polimerler kullanılmaktadır. Yüzlerce çeşit polimerik malzeme üretilmesine karşılık bunların çok azı medikal uygulamalar (protez, dental, implant, pansuman malzemeleri) için kullanılır. Tek kullanımlıktan başka uzun süreli kullanımlara kadar üretilebilen çeşitleri vardır [18]. Bu tür biyomalzemelerin uygulamalarda sıklıkla Polistiren (PS), Polietilentereftalat (PET), Politetrafluoretilen (PTFE), Poliüretan (PU), Polietilen (PE) gibi malzemeler kullanılmaktadır. Uygulamaları genellikle yüz protezlerinden, kalp bileşenlerine (yapay kalp ve kalp destek cihazları gibi), protezlere, sonda, yapay damar dokuları, kalça ve diz eklemlerine kadar uzanır. Ayrıca, çeşitli işlevler için tıbbi yapıştırıcıların, sızdırmazlık maddelerinin ve kaplamalar üzerine hazırlanmasına polimerik biyomalzemeler de eklenir. Polimerlerin fiziksel davranışı; cilt, tendon, kırık ve damar duvarlarının yanı sıra ilaç dağıtımını vb. için yararlı olan yumuşak doku gibi yapılara yakın bir benzerliğe sahip olmasıdır. Eklem protezlerinin yerine polietilen, kırık tespitinde ise sütür, vida ve plaklarda polikaprolakton kullanımı polimerik biyomalzeme türlerine örnek olarak verilebilir [19, 20].

III. Seramikler: Seramikler, polimerler ve metaller günümüzde en çok kullanılan implant malzeme grupları içerisinde yer almaktadır [21]. Genel olarak seramik malzemeler günümüze kadar diş hekimliğinde tedavi edici malzeme olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler; kronlardan, çimentolardan ve protezlerden oluşur. Gözlük camları, termometreler ve bazı tıbbi cihazların yapımında kullanılabilirler. Bazı seramikler ise; yapı iskeleleri, kemik onarımı ve eklem değiştirmek için yapısına ve fiziksel davranışlarına uyumlu birçok alanlarda kullanılmıştır [22, 23]. Bununla birlikte, düşük kırılma toklukları bu malzemelerin yük taşıyan uygulamalarda kullanımını sınırlar [24]. Biyoyumlu malzeme olarak kullanılan bazı seramikler alumina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2), biyoglass ($Na_2OCaOP_2O_3-SiO$) seramiklerdir [25].

IV. Kompozitler: Diş hekimliği alanında kullanılan en başarılı yapılar kompozitlerdir. Bu biyomalzemeler restoratif malzemeler ve dental amalgamlardır. Karbon takviyeli polimer ve karbon-karbon kompozitleri;

metallerin kullanım amaçlarına mekanik ve fiziksel uyumlulukları nedeniyle eklem replasmanı ve kemik onarımı için büyük ilgi görmektedir. Bununla birlikte, kompozit malzemeler; protez uzuvlar için yaygın olarak kullanılmaktadır [26, 27]. Düşük yoğunluk/ağırlık ve yüksek mukavemet kombinasyonları bu tür uygulamalar için üstün yapı iskeleleri olmalarını ön plana çıkartmaktadır [28]. Kompozit malzemelerin bir alt grubu olan nanokompozit malzemeler ise daha yüksek su içerikli malzemeler, çeşitli kompozitler hazırlamak için hücre dostu mikro ortamlar sağlar. Ortopedik protez implantlar için TiO₂ nano kaplamalar kullanılmıştır [29]. TiO₂ nanotüp esaslı kompozitlerin aşınma ve yıpranma etkisini kontrol etmek için kalça ve diz eklemlerinin onarımında kullanımları oldukça yaygındır. Protez implantların yüzeyine kaplanmış nano yapıları TiO₂, geliştirilmiş kemik mineralizasyonu üzerinde oldukça güvenlidir[30]. Genellikle yapılan klinik farmakolojik işlemlerde çeşitli manyetik nanoyapılar kullanılmaktadır. Hücrelerin biyokimyasal ve fizyolojik ortamını değiştirerek gelişmiş zar geçirgenliği ile yüklü parçacıkları hücreye taşıma işlevi görürler [31].

V. Doğal Biyomalzemeler: Doğada yer alan biyomalzemeler olarak kullanılması düşünülen hayvan ve bitki dünyasından türetilen yeni biyomalzemeler mevcuttur. İmplantlar için doğal malzemeler kullanmanın avantajlarından biri, kullanılan bu malzemelerin vücudumuzda bulunanlara benzer olmasıdır. Bu malzemeler doğal olarak toksin içermez ve kazandırdıkları biyokimyasal reaksiyonlar doku iyileşmesine yardımcı olur. Bu doğal polimerlerin karşılaştığı problem ise, ergime noktası sıcaklığının altında fiziksel ve yapısının üç boyutta değişimleri eğiliminde olmalarıdır. Bu durum, farklı boyut ve şekillerde medikal uygulamaların imalatını ciddi şekilde kısıtlar. Doğal malzemelere; kolajen, cam, tahta, kemik, kitin, mercan, selüloz ve keratin örnek olarak verilebilir [32].

VI. Nano Biyomalzemeler: Nano boyuttaki biyomalzemeler, konakda daha iyi hizmet ömrü sunabilen biyomedikal uygulamalar için boyutları 10-100 nm aralığında olması gereken çeşitli vücut proteinlerine, doku ve organların reseptörlerine ve DNA'ya yapısal olarak benzerdir. Bununla birlikte, 10 nm'nin altındaki boyutlarda oldukça toksiktir ve reaktif olarak tanımlanabilir. Bu malzemeler; çeşitli vücut reseptörleri ile serbestçe etkileşime girebilme özelliğinde olup, hücre zarından hızla geçer [33]. Nano biyomalzemeler; nano ilaç dağıtım sistemlerinde [34], gen tedavilerinde [35], kanser tedavilerinde [36], doku mühendisliğinde ve ortopedik implantasyonlarda [37] yaygın olarak kullanılmaktadır.

B) Biyomalzemelerin Uygulamaları:

Konak üzerinde vücut yapısına uygun ve benzer işlevlerde özellik sergilemeleri açısından biyomalzemelerin günümüzde genel olarak kullanılan uygulama alanları aşağıda yer almaktadır [15].

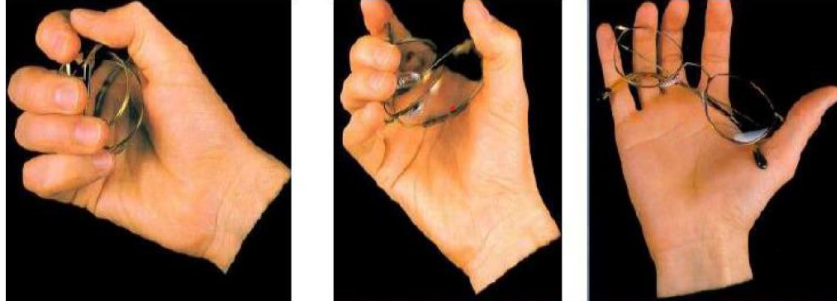
I. Ortopedi: Biyomalzemeler için en belirgin uygulama alanlarından ve ana odak noktalarından biri kalça, diz, omuz, ayak bileği ve dirsek gibi ortopedik implant cihazları olmuştur. Kırık tedavisi için kullanılan çelik, vida ve plakalar; V elementi katkılı alaşımlar [38], 316L SS, Ti-6Al-4V, Co-Cr-Mo alaşımları kafatası, eklem ve protezlerde implant malzemeleri olarak kullanılır [39, 40].

II. Kardiyovasküler Uygulamalar: Kardiyovasküler veya dolaşım sistemlerinde, biyomalzemeler; kalp kapakçıklarını, endovasküler stentleri, vasküler greftleri, stent greftlerini ve implantlarla başarılı bir şekilde tedavi edilebilen diğer yapay kalp ve kalp destek cihazlarını onarmak için kullanılır. Silikon, kompozitler, poli(üretan), paslanmaz çelik gibi biyomalzemeler doku ve organların yapısında kullanılırken, işlevini yitirmiş kalp pilleri veya elektronik cihazların biyosensör görevinde yer alan Ta ve alaşımları, Ti ve alaşımları kullanılmaktadır [7].

III. Doku Mühendisliği İskeleleri: Doku mühendisliği, onarım veya değiştirme uygulamaları için doku elde etmenin en önemli yollarından biridir. Amacı, yeniden üretilebilir, biyoaktif ve biyolojik olarak emilebilir 3D yapı iskelelerini belli özelliklere sahip olarak tasarlanmak ve imal edilmektir. Yük taşıma koşulları altında bile yapılarını ve bütünlüklerini öngörülebilir süre boyunca korurlar. Biyoseramik malzemeler zehirlenme tehlikesi göstermemesi ve hafif olmalarından dolayı tıp teknolojisinde kullanımları artarken, alumina ise kemik olarak farklı protezlerin oluşturulması ya da hasar görmüş kemik onarımlarında, metal olan biyomalzemelerin kaplamalarında kullanılır [41].

IV. Göz: Kıırma kusuru ve körlüğe yol açan çeşitli hastalıklara göz organı maruz kalabilir. Diyabetik retinopati, katarakt, yaşa bağlı makula dejenerasyonu göz hastalıklarından bazılarıdır. Bu tür hastalıklardan etkilenen insanların yaşamlarını iyileştirmek için polimer ve minarel(cam:SiO₂) hammedeli biyomalzemelerden oluşan implantlar vardır. Bu tür tıbbi uygulamalardan bazıları silikon, mercek ya da lensler olarak tercih edilirken sağlığa zarar vermemeleri göz önünde bulundurularak, ultraviyole ışına karşı koruma göstermeleri tercih konusudur. Lens kullanımında tercih edilen malzemeler kullanıcı açısından biyoyumlu olmalıdır. Camların biyolojik çözeltilerdeki reaktivitesinin büyük bir kısmı anlaşılmış olsa da, camların örneğin biyolojik olarak

emilebilir polimerlerle karşılıklı etkileşimi tam olarak anlaşılmamıştır. Bu nedenle, yeni tıbbi uygulamalar için biyoaktif cam bileşimlerine yönelik araştırma ve geliştirmeler, bir süre daha gündemde olacaktır[42]. Ayrıca, polimerlerin bir türü olan PMMA (polimetilmetakrilat) optik özelliklerinin üstünlüğünden dolayı göz içi lenslerde kullanılır [43]. Gözlük ve lens seçimlerinde mekanik özelliklerin yanında malzemenin geçirgenlik, yansımaya, soğurma ve kırılma indisleri de kullanıcı biyoyumluluğu açısından önemlidir. Bunlara ek olarak, bu alanlarında günümüz teknolojisinde akıllı ve yenilikçi malzemeler grubu içerisinde yer alan şekil hatırlamalı alaşımlar (örneği Ti ve alaşımları) gözlük çerçeve hammaddesi olarak ta kullanımı oldukça yaygındır. Bu alaşımların şekil hatırlama etkisi ve süper elastiklik özelliklerinden faydalanılır(Şekil 3)[44].



Şekil 3. Optik ve optisyenlik alanında kullanılan süperelastik özelliğine sahip NiTi şekil hatırlamalı alaşımı kullanımı [44].

V. Diş Uygulamaları: Ağız içinde hem diş hem de destekleyici diş eti dokuları bakteriler tarafından meydana getirilen hastalıklar ile kolayca tahrip edilebilir. Diş boşlukları, plaktaki metabolik aktivite ile ilişkili dişlerin mineral kaybı ve çözünmesi yoğun diş kayıplarına neden olabilir. Bu malzemeler ile diş kronları ve kökleri değiştirilebilir veya restore edilebilir. Dişçilik uygulamalarında iyileştirici olarak kullanılan bazı biyomalzemelere dolgu malzemelerinde kullanılan dental amalgamlar, sertlik ve dayanıklılık açısından titanyum, tantalum, krom ve alaşımları, altın gibi biyoyumlulukları yüksek malzemeler örnek verilebilir [27]. Seramik diş implantları tükürüğe karşı dirençli olmaları, yüksek basınca karşı dayanıklı olmaları, doğal diş yapısına benzer olmalarından dolayı estetik görünüşleri açısından dişçilik uygulamalarından kullanım alanları geniş olan malzemeler içerisinde yer almaktadır [4].

VI. Yara İyileştirici Uygulamalar: İmplant edilebilir biyomalzemelerin en eski kullanımlarından biri, yaranın kapatılması için bu tür iyileştiricilerin kullanılmasına kadar izlenebilir. Bir diğer önemli yara iyileştirme kategorisi ise kırık tespit cihazlarıdır. Bunlara kemik plakaları, vidalar, çiviler, çubuklar, teller ve kırık tedavisi için kullanılan diğer cihazlar dahildir. Bu malzemeler Kompozitler, Ti ve alaşımları, Co-Cr-Mo alaşımları, 316L SS olabilir [43].

VII. İlaç Dağıtım Sistemleri: Tıbbi uygulamalarda hızlı bir şekilde büyüyen alanlar içerisine giren ilaç dağıtım sistemleri; ilaçların kontrollü ve hedefli dağıtımına yönelik cihazların oluşturulması olarak tanımlanabilir. Bunlar için çeşitli biyomalzeme türleri kullanılır. Bunlar arasında en önemlileri metal esaslı biyomalzemelerdir. Bazı metalik malzemelerin yüksek mukavemeti ve kırılmaya karşı direnci, uygun işleme, güvenilir uzun vadeli performans için iyi elektriksel iletkenlik sağlayabilir ve bunların tümü implantasyon için mükemmel özellik olarak ön görülebilir [45].

III. METALİK BİYOMALZEMELER VE BİYOMETAL ELEMENTLER

A) Metalik Biyomalzemeler:

Lane, 1895'te kemik kırığı onarımları ve tespitleri için metal bir plakayı ilk kez piyasaya sürmüştür ve metaller yaklaşık 100 yıldan fazla bir süredir implant malzemesi uygulamalarında kullanılmıştır [46]. Geçmişte malzemenin dokuyu değiştirmeden, doku ile bir arada bulunması nedeni (biyo inert) ile gümüş ve altın elementleri çok kullanılmalarına rağmen, gerçekte bu elementler pahalı ve zayıf mekanik özellikler (düşük mukavemet ve düşük sertlik) sergilemektedir. İlerleyen dönemlerde; metal implantların kullanılması sonucunda kemik dokusu üzerinde zayıf korozyon davranışları ve biyoaktif metalik yüzeyler gibi sorunlarla karşı karşıya kalınmıştır [47, 48]. Bu yüzden kemik kırıklarını ve eksikliklerini tedavi etmek için tıbbi implantların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Lister, metalik alaşımların tıbbi implantlar da kullanmasını ve geliştirilmesini sağlamıştır [49]. 1920'ler de başka herhangi duruma karşı çok daha üstün korozyon direncine sahip olan paslanmaz çeliğin piyasaya sürülmesinden kısa bir süre sonra, bu durum klinisyenlerin ilgisini hemen çekmiştir. Bu gelişmeden sonra, metal implantlar yaygın olarak klinik uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu süreçlerin bir adım ileri olarak

geliştirilmiş olan metalik alaşımlar, iyi biyoyumluluğun yanı sıra gelişmiş mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dirençleri gibi özellikleri nedeniyle tıbbi implantlarda saf metallerden daha geniş uygulamalar arasında girmiştir [4].

Metaller 17. yüzyıldan beri implantlarda kullanılmaktadır. Metaller, büyük elastik deformasyonlar veya herhangi bir kalıcı deformasyon olmaksızın önemli yükler taşıyabilen yapıların üretilmesi için yüksek elastik modüllere sahiptir. Esneklikler, bu da akma noktasının aşılmasında ani kırılma yerine plastik deformasyon ürettiğini gösterir ve ciddi bütünlük kaybından önce bileşenleri değiştirmek için revizyon ameliyatı gibi düzeltici önlemlere izin verir. Metaller çok sayıda yük boşaltma döngüsüne dayanabilen kemik plakaları veya vücutta büyük yapıları olan kemikler gibi bölgelerde kullanılmalarına ilişkin en çok başvuru alan biyomalzemelerdir. Metalik vidalar ilk kez 18. yüzyılda kullanılmış ve kalça-diz protezleri gibi yük taşıyan sistemlerde ve iç-dış kemik kırıklarının onarılmasına yönelik kullanımları açısından avantajlı olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, kemik desteği ve değişimi için hizmet edecek implantların üretimi için metallerin seçimi tamamen kullanılacak olan biyometallerin çeşitli özelliklerine bağlıdır [20].

Metallerin; mükemmel elektriksel-termal iletkenlik ve mekanik özellikleri de vardır. Bu özelliklerinden dolayı yaygın biyomalzeme olarak kullanılırlar. Bazı elektronlar metallerde serbest haldedir. Böylece bir elektrik yükünü ve termal enerjiyi hızla aktarırlar. Hareketli serbest elektron, pozitif metal iyonlarını bir arada tutan bağlayıcı bir kuvvettir. Çoğu metalin yüksek özgül ağırlık bandında yüksek ergime noktalarına neden olan sıkı paketlenmiş atomik yapıları, çekiciliğin içlerinde güçlü olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Metal iyonlarının konumu, metalik bağ temelde çift yönlü olduğu için; kristal yapıya herhangi bir zarar vermeden değiştirilebilir. Metal iyonlarının bu özelliği, plastik olarak deforme olabilen bir katı ile sonuçlanır. Bu süreçte implant imalatında kullanılan metallere yüksek bir önem verilmektedir [22]. Metalik biyomalzemelerin bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [50].

Tablo 1. Metalik biyomalzemelerin bazı özellikleri [50]

Özellikler	Paslanmaz Çelik	Co-Cr-Mo Alaşımları	Ti-6Al-4V Alaşımı	Tantalum
Çekme Dayanımı (Mpa)	485-860	655	860	207-517
Akma Dayanımı (Mpa)	172-690	450	795	138-345
Uzama (%)	12-40	8	10	2-30
Kesit Daralması (%)	-	8	25	-
Yoğunluk (g/cm ³)	7,9	8,3	4,5	16,6
Korozyon Dayanımı	Zayıf	Üstün	Üstün	İyi

Ayrıca metaller, yeterli süneklik mevcut olduğunda istenen şekillere dönüştürülmüş metalik biyomalzemeler için biyoyumlu kaplamalar olarak da üretilirler. (Örneğin gözlük çerçeveleri veya diş telleri uygulamalarında kullanılan şekil hatırlamalı alaşım grupları) Böylece tanelerin yeniden düzenlenmesi, bütünlüğü bozmadan gerçekleşir. İmplant sistemlerinin çoğu metal veya alaşımlardan yapılmıştır. İdeal implant malzemelerini göz önüne aldığımızda; biyoyumlu, yeterli tokluk, dayanım, korozyon direnci, aşınma ve kırılma direncine sahip olmalıdırlar [51, 52]. Tablo 2'de bazı biyomalzemeler ve kortizol kemiğe ait özellikleri verilmiştir [50].

Tablo 2. Bazı biyomalzemeler ve kortizol kemiğe ait özellikler[50]

Malzeme	Yoğunluk (ρ)	Elastisite Modülü (Gpa)
Kortikal Kemik	~2.0 g.cm ⁻³	7-30
Co-Cr Alaşımı	~8.5 g.cm ⁻³	230
Paslanmaz Çelik	~8.0 g.cm ⁻³	200
Titanyum	~4.5 g.cm ⁻³	110
Ti6Al4V	~4.4 g.cm ⁻³	106

Kimyasal bileşime veya implante edildiklerinde ortaya çıkardıkları biyolojik tepkilere göre, kullanılan malzemeler kategorize edilebilir [53];

Birinci Nesil; Biyo inert Malzemeler: Paslanmaz çelik (316L SS) ve kobalt-krom esaslı alaşımları ortopedik uygulamalarda başarıyla kullanılan ilk metalik malzemeler arasında yer almaktadır. Daha sonra, titanyum ve alaşımları 1940'larda tanıtılmıştır. 1960'larda NiTi şekil hatırlamalı alaşımların (SHA) piyasaya sürülmesiyle, yepyeni bir uygulama yelpazesi ortaya çıkmıştır. Bu geleneksel metalik malzemelerin yanı sıra,

1960'larda şekil hafıza etkisine (ŞHE) sahip NiTi alaşımı keşfedilmiştir. ŞHE, bir malzemenin “plastik” olarak deforme edildikten sonra ısıtıldığında şeklini geri kazanma yeteneğidir. Bu olgu, düşük sıcaklıktaki bir mikro yapıdan yüksek sıcaklıktaki bir mikro yapıya geçişe özgüdür. Süper elastik davranışa sahip gerilme kaynaklı martensit yapılar, diğer birinci nesil metalik malzemelere kıyasla daha fazla yük taşıma uygulamasına sahiptir. Osteotomiler için zımba telleri, kırık onarımı, uzun kemik shaftları için dahili fiksatorler, spinal düzelticiler, vertebral aralayıcılar ve protezlerin sabitlenmesi için kullanılırlar [54]. 316L SS'den yapılan eklem kalça protezi 1950'lerin sonlarında kullanılmıştır. En yaygın olarak kullanılan bu sınıf; 316L SS, nikel veya mangan gibi stabilize edici elementleri içerisinde bulundurmaktadır. Klinik uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan ve kimyasal kompozisyonunda ağırlıkça %0.03 karbon, % 17-20 krom, % 12-14 Ni, % 2-3 molibden ve düşük miktarda nitrojen içeren paslanmaz çelik malzemesidir. Kompozisyonda düşük miktarda mangan, fosfor, silisyum ve kükürt elementleri de bulunabilir. Ortopedik ameliyatlarda plakalar, vida ve kalça çivisi olarak yaygın kullanılır. Yapay disk üretiminde polietilen (PE) ile birlikte kullanılan Co-Cr-Mo alaşımı (ASTM F75, Vitallium) kalça protezlerinde kullanılmaya başlanılmıştır. Benzer şekilde, mükemmel korozyon direnci ve aşınma direnci nedeniyle Co-Cr alaşımları da yapay disk değiştirme sistemlerinde kullanılır [55].

Ti ve alaşımları, orta derecede bir elastik modül ve iyi bir korozyon direnci içeren mükemmel özelliklerinden dolayı biyomedikal uygulamalara girmiştir. Bu metal, kemiğe sıkıca entegre olur, böylece gevşeme ve bozulma risklerini azaltır. Ayrıca, Al ve V alaşım elementleri alfa-beta ($\alpha+\beta$) mikro yapısını stabilize eder ve Ti implantların mekanik özelliklerini iyileştirir.

İkinci Nesil; Biyoaktif ve Biyolojik Olarak Parçalanabilen Malzemeler: Bu gruba ait metalik biyomalzemeler 1980 ve 2000 yılları arasında keşfedilmiştir; kemik dokusunu, rejenerasyonu ve iyileşmeyi arttıran malzemelerdir. Bu malzemeler mineralizasyon, kemik onarımı ve fiksasyon gibi hücrel tepkileri aktive eder. Yüzey yapılarının iyileştirilmesi için çeşitli yöntemler arasında elektroforetik biriktirme, plazma, radyo frekansı veya iyonik ışın püskürtme, lazer ablasyon veya sıcak izostatik basınç kullanan biyoaktif seramik ile kaplama yer alır. Plazma sprej biriktirme ile Ti ve alaşımları üzerine hidroksiapatit (HA) kaplama şu anda biyomedikal uygulamalar için en yaygın olanıdır. Alternatif olarak, fizyolojik ortamda yoğun bir kemik benzeri apatit tabakası oluşturma kabiliyetine sahip ince bir Ti tabakası gibi yüzeyler geliştirmek için metalik yüzeylerin kimyasal modifikasyonları, termokimyasal işlem ve aşındırma işlemi kullanılır. Kendiliğinden oluşan tek tabakaların bağlanması, Na_2HPO_4 ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltilerine art arda daldırma ile yüzeye polimer zincirlerinin bağlanması, daha sonra hücrel çoğalmayı ve farklılaşmayı kolaylaştıran metal yüzeylerin geliştirilmesine yardımcı olur. Ayrıca, esas olarak glutaraldehit kimyası yoluyla amino ve karboksil yönelimli immobilizasyon kullanılarak silanize edilmiş titanyum oksit yüzeyleri yoluyla polimerlerin ve biyomoleküllerin kovalent kimyasal bağlanması ve fotoaktif bir grupla biyomoleküllere “aşılama” yoluyla fotokimya umut verici metalik biyomalzeme olarak tasarlanmıştır [56].

Üçüncü Nesil; Moleküler Düzeyde Spesifik Hücrel Tepkileri Uyararak İçin Tasarlanmış Malzemeler: Bu metalik biyomalzemeler; biyoaktivite, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve biyolojik olarak emilebilirlik gibi dikkate değer özellikleri sayesinde moleküler düzeyde belirli hücrel tepkileri uyarır. Bu tür metal implantların üç boyutlu gözenekliliği, hücrel istilayı, tutunmayı ve çoğalmayı gerçekleştirir. Büyüme faktörleri gibi peptitlerle yüzeylerin işlevselleştirilmesi, hücre farklılaşması, anjiyogenez ve doku oluşumu gibi spesifik hücre yanıtlarını tetikler. Üçüncü nesil metalik yapı iskeleleri; biyoyumluluk, sitotoksitesite, biyobozunurluk, yük taşıyan bölgelerde kemik dokusu rejenerasyonu, yeni kemik oluşumunun ilk aşamalarında bütünlük, doku onarımı ile eş zamanlı emilim, gözeneklilik ile bağlantılı ara bağlantı, doku büyümesi gibi istenen özelliklere sahip olmalıdır [57].

Metalik köpükler gibi gözenekli yapılara sahip metalik biyomalzemeler, hem kemik dokusu mühendisliğinde hem de esas olarak Ti ve alaşımlarından oluşan ilaç dağıtımında kullanılır. Metalik biyomalzeme olarak kullanılan temel elementler Tablo 3'te verilmektedir [58].

Tablo 3. Biyomalzeme olarak kullanılan temel elementler [58].

Element	Sembol	Atom Numarası	Atom Ağırlığı (u)	Kullanımı
Alüminyum	Al	13	26,98	Alaşım Elementi
Kobalt	Co	27	58,93	Temel Element
Krom	Cr	24	52,0	Alaşım Elementi
İridyum	Ir	77	192,2	Alaşım Elementi
Demir	Fe	26	55,85	Temel Element
Mangan	Mn	25	55,94	Alaşım Elementi
Molibden	Mo	42	95,94	Alaşım Elementi
Nikel	Ni	28	58,71	Alaşım Elementi
Niyobyum	Nb	41	92,91	Alaşım Elementi
Paladyum	Pd	46	106,4	Alaşım Elementi
Platin	Pt	78	195,1	Temel Element
Tantal	Ta	73	181,0	Alaşım Elementi
Titanyum	Ti	22	47,9	Temel Element
Tungsten	W	74	183,9	Alaşım Elementi
Vanadyum	V	23	50,94	Alaşım Elementi
Zirkonyum	Zr	40	91,22	Alaşım Elementi

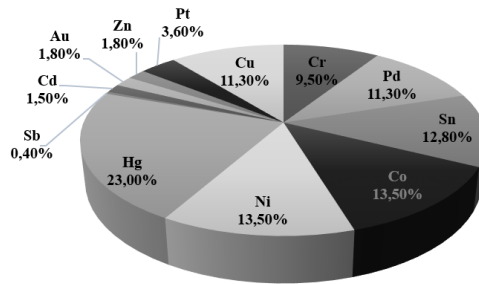
Bazı temel elementlerin, biyolojik etkilere karşı vücuda vermiş olduğu tepkiler Tablo 4’ de belirtilmiştir [59].

Tablo 4. Elementlerin biyolojik etkilere karşı vücuda vermiş olduğu tepkiler [59].

Element	Biyouyumluluk	Kanserojen	Genotoksik	Mutajenik	Sitotoksik	Alerjenik	Korozyona eğilim
Kobalt	X	✓	✓	✓	↑	✓	✓
Çinko	X	X	X	X	↑	X	X
Tantal	✓	X	X	X	↓	X	X
Niyobyum	✓	X	X	X	↓	X	X
Zirkonyum	✓	X	X	X	↓	X	X
Titanyum	✓	X	X	X	↔	X	X
Vanadyum	X	✓	✓	✓	↑	?	X
Molibden	X	?	✓	✓	↓	✓	✓
Altın	✓	X	X	X	↑	X	X
Gümüş	X	X	X	X	↑	✓	X
Krom	X	?	✓	✓	↑	✓	X
Platin	X	✓	✓	✓	↑	✓	X
Mangan	X	X	✓	X	↑	X	✓
Hafniyum	∞	∞	∞	∞	↔	X	X
Kalay	✓	X	X	X	↓	X	X

* Evet (✓), Hayır (X), Yüksek (↑), Orta (↔), Düşük (↓), Belirsiz (∞), Şüpheli (?)

Şekil 4’de bazı alaşımlama elementi olarak da kullanılan biyometallerin konak üzerindeki metal alerjisi yüzdelerini göstermektedir [10]. Metal protein kompleksleri vücutta aşırı duyarlılık tepkilerini ortaya çıkarır. Metale karşı aşırı duyarlılıkla ilgili Metale karşı alerjik reaksiyonlarla ilgili başlıca görülen hassasiyetler şişlik, kaşıntı ve kızarıklık (dermatit) oluşumu ve hatta bazı durumlarda astımdır. Duyarlastırıcı olarak da bilinen başlıca metal elementleri Şekil 4’de alerjik yüzdelerine göre dairesel grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4. Bazı elementlerin metal alerji yüzdeleri [10]

B) Biyometal Elementler:

Biyomalzeme elementi olarak tercih edilen genel biyometaller ve onlara ait bazı özellikler aşağıda verilmektedir.

Kobalt (Co): Kobalt, esasında B12 vitamininin bir bileşeni olarak insan kırmızı kan hücrelerinin olgunlaşmasında bulunan temel bir eser elementtir. Kobalt esaslı alaşımlar ilk olarak 1930'larda tıbbi implantlarda kullanılmıştır [60]. Ancak canlı kemiğe kendiliğinden bağlanmazlar [61, 62]. Co-Cr alaşımlarının korozyon direnci, paslanmaz çeliklerden çok daha fazladır ve mükemmel mekanik özelliklere sahiptirler [63]. Co, Cr ve Ni yüksek toksik elementler olarak sınıflandırılmasına rağmen, CoCrMo alaşımı toksik elementlerin iyon salınımını sınırlayan yüksek korozyon direnci nedeniyle yüksek biyoyumluluk gösterir [64]. Ayrıca, Co esaslı alaşımlar düşük süneklığe, düşük yorulma direncine, yüksek maliyete ve pahalı imalat süreçlerine sahiptir. Ayrıca, yüksek yoğunluklu ($9,8 \text{ g/cm}^3$) alaşımlardır ve toksik metal parçacıkları salabilirler. Bu özelliklerinden dolayı biyoyumlu malzemeler olarak kullanım amaçları sınırlı hale gelmektedir. Bununla birlikte, korozyon direnci davranışları nedeniyle CoCrMo alaşımı hala bağlantılarda kullanılan en popüler alaşımdır [49]. Dişçilik ve ortopedi uygulamalarında çokça kullanımı olan Co esaslı alaşımlarda, atomik olarak ağırlıkça %65 ve daha fazlası Co elementinden meydana gelmektedir [4].

Çinko (Zn): Çinko, sağlıklı kemiklerin büyümesi, gelişmesi ve bakımı için gerekli olan en önemli metallere biri olarak kabul edilir. Zn esaslı biyomalzemeler, son zamanlarda ortopedik cihazlara, kardiyovasküler stentlere ve diğer tıbbi uygulamalara uygulanabilen, umut verici yeni biyo-çözünür metal türleri olarak ortaya çıkmıştır. Diğer bozunabilir metalik biyomalzemelerle (Mg veya Fe esaslı) karşılaştırıldığında, Zn biyomalzemeler, hidrojen gazı oluşumu olmaksızın daha uygun bir korozyon hızına sahiptir. Zn uygulaması, sırasıyla kemik kalsifikasyonu ve kemik matris protein oluşumu ile ilgili olan alkalik fosfatada doza bağlı bir artış ve kollajen sentezinin uyarılmasını sağlar. Uygun biyoyumlu çinko taşıyıcıları, kemik oluşumunu teşvik etmek için Zn'yi implanttan yavaşça salma kabiliyetine sahip olması gereken şekilde tasarlanır. Metalik Zn, fizyolojik olarak ilgili bir metaldir ancak henüz biyolojik olarak emilebilir bir tıbbi implant olması tam olarak düşünülmemiştir [65]. Titanyum ve paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında fiziksel ve mekanik özellikleri insan kemiği ile çok daha uyumludur [66, 67]. Ayrıca, Zn^{+2} insanlar için en bol bulunan ikinci elementtir ve esas olarak kaslar ve kemiklerle tutulur ve daha da önemlisi, 600'den fazla enzim, uygun yönlendirme ve işlev için Zn^{+2} 'ya ihtiyaç duyar [68-71]. Bununla birlikte, tıbbi implantlar olarak Zn biyomalzemeleri üzerine araştırmalar hala sınırlıdır, çoğu çalışma mekanik ve korozyon özelliklerinin *in vitro* analizine odaklanmıştır [72]. Saf Zn, yük taşıyan tıbbi uygulamalar için yeterince güçlü değildir [65]. Mekanik mukavemetini arttırmada, Zn esaslı alaşımlar oluşturmak için Zn'nin diğer elementlerle alaşımlandırılması gerekir. Son zamanlarda yapılan bazı araştırmalar; alüminyum, nadir toprak, neodim ve itriyum gibi elementlerle alaşımlandırmanın Zn alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabileceğini gösterse de, bu alaşım elementlerinin çoğu potansiyel toksisitelerinden dolayı arzu edilmez [66, 73, 74]. Bu nedenle periyodik tablonun Mg, Ca (kalsiyum) ve Sr (Stronsiyum) gibi IIA grubu besin elementleri insan sağlığı üzerinde önemli mineral takviyeleri oldukları için daha çok tercih edilmektedir [74-76].

Tantalyum (Ta): Gözenekli tantal, benzersiz bir dizi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip bir biyomalzemedir. Ta elementi yüzyıllardır biyoygulama alanında kullanımı olan metalik elementler arasında yer almaktadır. Güvenli ve hızlı kemik büyümesine izin vermek için tamamen birbirine bağlı gözeneklere sahip yüksek hacimli bir gözenekliliğe (%80) sahiptir [77]. Kemik ve yumuşak doku ile entegrasyon için mükemmel bir yüzey görevi gören gözeneklilik ve sertlik açısından süngerimsi kemiğe benzer. Tantal gibi geçiş metalleri biyoyumlu elementler olarak rapor edilmiştir [14, 78] ve bu nedenle, bağlantı yer değiştirmeleri için imalat cihazları ve

yapıları gibi kullanım alanlarına sahiptir. Refrakter bir metal olan Ta, vasküler ligasyon klipslerinde, arteriyel stentlerde, tel örgülerde ve sütürlerde geniş uygulamalara alanlarında yer alır. Ferromanyetik özellikte olmadığı için yumuşak doku ortamında iyi hizmet eder ve Manyetik Rezonans (MR) gibi tanısal tarama sırasında yer değiştirmez, dönmez veya ısınmaz. Ta kaplamalar, ısıyla sertleşen polimer köpüğün pirolizi veya camı bir karbon iskeletinin yüzeyinde kimyasal buhar biriktirme yoluyla üretilir. Tungsten ve molibden içeren Tantal, *in vivo* koşullarda korozyona karşı oldukça dirençlidir ve mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Cerrahi implantların üretimi için alaşımsız Ta plakası, levha, şerit, çubuk ve tel gibi formlarının kullanıldığı iyi bilinmektedir. 100 nm kalınlığında Ta, Nb veya Ti filmi ile yüzeyi kaplanmış silindirik (4 mm çapında) polikarbonat polimer tıkaçlar, argon atmosferinde soğutulmuş (4°C) bir vakum odasında magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak elde edilir. Pt, Hf, Ta ve Zr gibi elementlerin mekanik dayanımlarının yüksek olmaması nedeniyle konakda implantasyonları sınırlıdır. Ta elementi, x-ışını bandında yüksek kütle absorpsiyon katsayısına sahiptir, bu da onu vücut sıvılarına karşı pratik olarak tamamen bağışık hale getirir ve tahriş etmez [14]. Ta elementi ve Ta esaslı alaşımlar yüksek yoğunlukları, ergime noktaları, mükemmel şekillendirilebilirlikleri, iyi termal iletkenlikleri, yeterli kırılma toklukları (düşük sıcaklıklarda bile), korozyon direnci ve kaynaklanabilirlikleri ile biyomalzeme olarak giderek daha fazla kullanım alanına erişmiştir [79].

Niyobyum (Nb): Nb, 2468°C ergime noktasına ve iyi termofiziksel özelliklere sahip refrakter bir metaldir [80]. Niyobyum, yeni alaşımlar geliştirmek için bir alaşım elementi olarak biyomedikal alanda büyük ilgi görmüştür ve bu nedenle, bağlantı yer değiştirmeleri için imalat cihazları ve yapıları için uygun kullanım alanları olarak kabul edilir. Kimyasal bileşimdeki değişiklikler nedeniyle, Ti-Nb ve Zr-Nb alaşımları gibi Nb içeren alaşımların, gelişmiş korozyon direncine ve biyoyumluluğa sahip olduğu kanıtlanmıştır [81, 82]. NiTi alaşımına Nb elementinin eklenmesi, NiTiNb alaşımının faz denge sistemini, alaşımın fiziksel özelliklerini etkili bir şekilde iyileştirebilen büyük ölçüde değiştirebilir [80, 83, 84]. Ayrıca, bazı çalışmalar, Nb elementinin dahil edilmesiyle yüzey kimyasındaki değişikliklerin kemik yapısı içerisindeki farklılaşmayı arttırdığını göstermiştir [85].

Stronsiyum (Sr): Stronsiyum, antirezorptif ve anabolik etkileri nedeniyle osteoporoz tedavisinde kullanılır. Ayrıca, vücutta depolanan toplam Sr içeriğinin %98'i, esas olarak yüzey değişimi veya iyonik yer değiştirme ile meydana gelen kemik kristallerine kolayca dahil edildiğinden dolayı iskelet sisteminde bulunabilir. Sr, preosteoblast farklılaşmasında kollajen ve kollajen olmayan protein sentezini destekler; osteoklast farklılaşması ve işlevinde engelleyici bir role sahiptir. Bu biyomalzemeler, 300 mm ile 500 mm arasındaki geniş gözenek boyutu nedeniyle %99 ara bağlantı ile gözenekli olarak işlev görür. Genel gözeneklilik, yük taşıma kapasitesinde kemik büyümesini artıran bir sıkıştırma mukavemetine sahiptir [86].

Magnezyum (Mg): İnsan vücudunda en çok bulunan dördüncü element olan ve %60 oranında kemiklerde bulunan Mg elementi, insan vücudu için çok önemli bir elementtir. Magnezyum ve alaşımları, mükemmel mekanik özellikleri, insan kemiğinkine benzer elastik modülü (45 GPa) [87] ve yüksek biyoyumlulukları nedeniyle biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler olarak büyük potansiyel göstermiştir [88]. Yine de, magnezyum alaşımlarının klinik uygulaması, özellikle klorür iyonları dahil agresif ortamlarda, zayıf korozyon dirençleri ile sınırlıdır [88]. Magnezyum alaşımlarının zayıf korozyon direnci, hızlı pH değeri artışına [89], hidrojen salınımına [90] ve mekanik mukavemetin hızlı düşüşüne [91] yol açarak implantasyon başarısızlığına neden olabilir. Magnezyum alaşımlarının korozyon direncini arttırmak için; alaşımlama [92], tane boyutunu inceltme [93], iyon implantasyonu [94], kaplama [95] ve benzeri birçok teknik yaygın olarak kullanılır. Bu teknikler arasında kaplama tekniği, magnezyum alaşımlarının hem korozyon direncini hem de biyoyumluluğunu iyileştirmek için en basit ve en etkili yöntemlerden biridir [96]. Son yıllarda Mg alaşımları, kemik-doku mühendisliğindeki uygulamalar için umut verici biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler olarak ün kazanmıştır. Bununla birlikte, biyolojik olarak bozunabilir saf Mg'nin diğer metalik biyomalzemelere kıyasla iyi beklentilerine rağmen, bu malzemenin ortopedik uygulamalar için kullanılmasında çeşitli zorluklar vardır. Zorluklardan biri, vücudun fizyolojik yükünü sürdürmek için yetersiz olan ve dolayısıyla yük taşıyan bir implant olarak kullanımını engelleyen saf Mg'nin düşük mekanik mukavemetidir [97]. Bu nedenle saf Mg'nin çeşitli alaşım elementleri ile güçlendirilmesi gerekmektedir. Mg esaslı yük taşıyan implantların geliştirilmesindeki bir diğer zorluk, fizyolojik ortamda hızlı bozulmalarıdır [98].

Zirkonyum (Zr): 1990'ların başında diş protez cerrahisi için zirkonya (ZrO₂) kullanıldı. Polimorfik zirkonya yapısı; zirkonyanın monoklinik (M), kübik (K) ve tetragonal (T) olmak üzere üç kristal formunda bulunur. Kristal formlar alaşımların mekanik özellikleri ile yakından ilgilidir. Zirkonya yüksek kırılma tokluğu ve mukavemeti, kimyasal kararlılık, üstün aşınma ve korozyon direnci, yüksek sertlik, düşük ısı iletkenlik ve biyoyumluluk gibi özellikleri ile biyomalzeme olarak kullanılmaya elverişli bir malzemedir. Zirkonyum oda sıcaklığında monoklinik bir yapı kazanır ve ortalama 1170 °C'de tetragonal faza, ortalama 2370 °C'de kübik faza dönüşür [99]. Zirkonyum elementi esaslı kütleli metalik camlar (bulk metallic glass, BMG), amorf yapıları

nedeniyle yüksek mukavemet ve sertlik, düşük Young modülü, yüksek yorulma limiti, iyi aşınma ve korozyon direnci sergiler ve bu da onları biyomalzeme adayları yapar [99]. Kısmen stabilize edilmiş zirkonya, oksit seramiklerle karşılaştırılabilir özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür ve bu nedenle implant malzemesi olarak dahil edilmesi düşünülmüştür. Tamamen stabilize edilmiş ZrO_2 ile karşılaştırıldığında, bu seramik, polikristal aluminadan iki kat daha fazla bükülme mukavemeti içeren ve malzeme özelliklerinde gözlemlenebilir biyolojik olarak bozunabilir bir değişiklik içermeyen daha uygun mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca, tetragonal partiküllerin monoklinik partiküllere martensitik dönüşümü sırasında enerji absorpsiyon özelliğinden dolayı yüksek kırılma direnci sergiler. Zr elementi; çoğu biyo uygulama alanlarında yer alan paslanmaz çelik gibi konak üzerinde uyumluluğu yüksek, mekanik olarak kararlı ve oldukça radyoopaktır [100]. Zr içerisinde yarılanma ömrü çok uzun olan radyoaktif elementler (uranyum, toryum, vb) de bulunur. Radyoaktif elementleri ayırmak ise oldukça maliyetli ve uzun bir süreç gereken işlemdir. Zirkonyum, titanyum elementi ile katı ergiyik oluşturabilmekte, benzer bir faz geçiş sıcaklığı ile aynı allotropik dönüşüme sahip olduğu için nötr bir element olarak kabul edilir. Zirkonya da, alumina gibi bulunduğu fiziksel ortam üzerinde inert etki gösterir. Çok daha yüksek çatlama ve bükülme direncine sahip olan zirkonya, uyluk kemiği protezlerinde başarıyla kullanılmaktadır [101].

Titanyum (Ti): Titanyum elementi, yeryüzünde bulunan element sıralamasında dokuzuncu, metal sıralamasında ise dördüncü sırada yer almaktadır [102]. Mikroyapıların ince ve kaba taneli ya da lamelli ve eşeksiz olması, titanyum ve alaşımlarının mekanik özelliklerini etkiler. Titanyum elementinin yoğunluğu düşük, mukavemeti yüksek olan bir element olarak bilinmektedir. Elastik modülü değeri insan kemiğine yakın, 240-270 Mpa çekme dayanımına sahip, mükemmel korozyon direnci ile biyoyumluluğu yüksektir [103-105]. Titanyum ve alaşımları biyomalzeme uygulamalarında 1930'lu yılların sonlarına doğru diğer alaşımlara kıyasla hafif olmasından dolayı kullanılmaya başlanmıştır. Üstün biyoyumluluk, toksik etki oluşturmaması titanyumun en çok kullanılan metallerin arasında gösterilmesine neden olmaktadır. Titanyum; magnetik olmayan, hafif, işlenebilir mekanik özellikler gibi üstün özellikleri olduğu için en çok tercih edilen metalik biyomalzemeler grubu içerisinde yer almaktadır. Titanyum alaşımlarından NiTi alaşımlarının en önemli özelliği sıcaklık ile şekil değiştirebilmeleridir (Şekil hatırlama etkisi). Şekil hatırlamalı bu alaşımlar ortodontik teller, yapay kalplerde kullanılan yapay kaslar, stentler ve ortopedik kelepçelerde kullanılmaktadırlar. Titanyumun maliyetinin yüksek olması bu elementin dezavantajıdır. Bu kapsamda bir diğer parametre ise alaşımlarının kullanım sıcaklığını 600°C ile sınırlı olmasıdır [106]. Titanyum elementi yüzeyinde oksit tabakası bulundurur. Oksit tabaka, titanyumun yüzeyinde korozyona karşı direncini artırır ve biyoyumu sağlar. Titanyum ve alaşımlarının oksit tabakalı yüzeyi, hücre büyümesine geniş olanaklar sunar [107]. İmplantasyon uygulamalarında genellikle titanyum yüzeyi oksitle kaplanır [108, 109]. Titanyum alaşımları farklı element katkılarıyla biyomedikal uygulamalar için geniş kullanım alanı sağlarlar. En çok saf Ti ve Ti-6Al-4V (Ti-6/4 olarak da gösterilir) alaşımları olmak üzere; bunların yanında molibden, paladyum, kalay, vanadyum, alüminyum, niyobyum, tantalum ve zirkonyum gibi elementler katılarak bazı mekanik ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesiyle çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Günümüzde titanyum alaşımları; diş implantları, splintler, kron köprü ve kısmi protez, stentler ve bağlayıcıları, eklem protezi gibi medikal ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır [110].

Vanadyum (V): Vanadyum, yeryüzünde yaygın olduğu bilinen temel bir elementtir. Yıllardır biyoyapı alanlarında kullanımı mevcut olan V elementi; NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan elementler içerisinde yer almaktadır [111]. V elementi, Nb elementi ile karşılaştırıldığında düşük ergime noktasına sahiptir ve düşük özgül ağırlıktadır [112]. İnsanlarda kullanılmak için geliştirilen ilk metal alaşımı olan vanadyum çeliği kırık kemiklerin tedavisinde vida ve plaka olarak kullanılmıştır. Vanadyum çeliğinin, *in vivo* testler üzerindeki çalışmalar sonrası korozyon direncinin uygun olmadığını tespit edilmiş ve tıbbi uygulama alanlarında kullanılması sınırlandırılmıştır. Günümüzde biyomalzeme olarak en yaygın kullanılan titanyum alaşımı eser miktarda V elementi içeren, Ti6Al4V'dur. Bu alaşımın üretilmesinde V elementi alaşımda katkı elementi olarak kullanılmaktadır. Yapı içerisindeki Al elementi α fazını stabilize edip α fazından β fazına geçiş sıcaklığını artırırken, vanadyum elementi ise β fazını stabilize eder. Bu alaşımlar, korozyonlu ortamlarda yorulmalara karşı oldukça duyarlı olarak geliştirilmişlerdir [113].

Molibden (Mo): Periyodik tablonun 6B grubunda yer alan bir geçiş elementidir. Mo gümüşü beyaz bir metaldir, sert ve çok sağlamdır. Yüksek elastik sınırlar içerisinde yer almaktadır. Toksikitesi küçük kabul edilir. Saf Mo, 10,2 g/cm³ yoğunluğa ve 2617 °C ergime noktasına sahiptir. Mo'nun birincil kullanımı, çelik ve dökme demirde alaşımlama elementi olarak metalurjik uygulamalardadır. Mo, mineral asitlerin neden olduğu korozyona karşı özellikle iyi bir dirence sahiptir [114]. Co-Cr alaşımlarında, daha ince taneler üretmek için Mo elementi eklenir, bu da dökümden sonra daha fazla mukavemet sahip olması anlamı taşır. Bu element, daha güçlü β -

stabilize edici özelliği ile temelinde bir alaşımlandırma elementi olarak seçilmiştir. Kalça yüzey yenileme cerrahisinde protez olarak Co-Cr-Mo alaşımları geliştirmek için son yirmi yılda artan bir eğilim vardır [23].

Altın (Au): Altın soy bir metal olarak, biyoyumluluğu yüksek bir elementtir. Alaşımlama ile mekanik özellikleri yükseltilebilir. Dişçilik uygulamalarında başlıca yapı malzemesi olarak kullanılır. Saf altına kıyasla altın alaşımlarının işlenebilirlik özellikleri daha fazladır. Ömürlerinin uzun olması, yüksek kararlılık ve yüksek korozyon direncine sahip olduklarından dolayı yararlı metaller olarak bilinir. Dişçilik endüstrisinde özellikle kaplama malzemesi olarak kullanılan bu alaşımlar, genel olarak atomik ağırlığı %75 ve üzerinde altın, geri kalanlarını ise soy metaller oluşturmaktadır. Bakır ve platin elementleri ilaveleri ile bu tür alaşım gruplarının dayanıklılıkları artırılırken, alaşıma katılan çinko elementi ilavesi sonucu alaşımın ergime sıcaklığını düşürmede üstün rol oynamaktadır [41].

Gümüş (Ag): Atom numarası 74 ve ergime noktası 960.8 °C olan Ag metali özellikle; iyonlarının bakteriyi yok edici etkisinin olduğu ve güçlü bir inhibitör (hastalığın yayılmasını önlemede etkin rol sağlayan parametre) olarak kullanıldığı uzun zamandır bilinmektedir. Bu element %95'den fazla kızılötesi yansıtma özelliğine sahiptir. Gezegen de en çok ısı iletkenliğine ve en çok elektrik iletkenliğine sahip elementtir. Gümüş aynı zamanda, insan vücudunun içinde ve dışında bir antimikrobiyaldir. Az miktarlarda kullanıldığı zaman toksik değildir. Gümüş iyonları antiviral ve antifungal özelliklere de sahiptir ve dokuların yenilenmesinde rol oynayarak oldukça güvenli ve antimikrobiyal biyoyumlu malzeme olarak kabul edilmektedir [115]. Gümüş elementinin biyomalzeme olarak kullanılmasının canlılar üzerinde bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, güneş ışınlarına uzun süre maruz kalan insanlarda deri, göz gibi pigmentleri tahrip edebilir veya vücut içerisinde organlara taşınarak konak üzerindeki doku ve organlara zarar verebilir. Ancak; gümüş diğer metallerle karşılaştırıldığında en az toksik metallerden biridir. İlk antibiyotik maddenin gümüş olduğu düşünülmektedir. Günümüzde ise, bakteriyel enfeksiyon risklerinin olduğu her yerde, bandajlar ya da yanık tedavisinde kullanılan ilaçlara kadar sağlık ürünlerinin çok geniş çaplı alanlarda antimikrobiyal olması açısından gümüş elementinden faydalanılmaktadır [116].

Krom (Cr): Kobalt alaşımlı biyomalzemeler genel olarak yüksek aşınma, sıcaklık ve korozyon direncine sahiptirler. Yapı içerisindeki krom elementi yüzdesinin artması, alaşımın çözeltilere karşı olan korozyon direncini de arttırmaktadır bu durum ise onları biyomalzeme olarak kullanılmasını yönünden etkin kılar. Ni-Cr alaşımlarının yüksek asit/alkali direncinin yanı sıra yüksek sıcaklıklarda büyük tokluk ve mukavemet gibi avantajları olmasına rağmen, Ni' ye karşı yaygın aşırı duyarlılık nedeniyle diğer alaşımlardan daha yüksek biyolojik risk oluştururlar [117]. Alaşımlara yüksek yüzdelik oranlarda eklenen Cr elementi, korozyon direncini ve ısıl direnci artırır [118]. Dişçilik ve ortopedi sektöründe kullanım alanları oldukça yaygındır. Co, Cr ve Ni yüksek toksik elementler olarak sınıflandırılmasına rağmen [119], CoCrMo alaşımı toksik elementin iyon salınımını sınırlayan yüksek korozyon direnci nedeniyle yüksek biyoyumluluk gösterir [64].

Platin (Pt): Platin elementinin korozyona olan dirençleri yüksek olmasına rağmen mekanik özellikleri düşüktür bu yüzden; platin ve diğer soy metaller kalpte atınımların başlamasını uyarıcı otonom merkezde elektrot ya da sinirsel uyarım cihazları olarak kullanılır [120]. Platin, tantal ve zirkonyum gibi elementlerin mekanik dayanımlarının yüksek olmaması nedeniyle implant olarak kullanım alanları sınırlıdır.

IV. SONUÇ

Biyomalzeme araştırmaları alanında, kemik onarımı ve implant tercihi için bozunabilir malzemeler aktif olarak aranır ve biyobozunurluk yapıları ikinci bir ameliyattan kaçınmayı ve hastalar için ağrı ve maliyeti azaltmayı sağladığından dolayı çok fazla ilgi görür. Genel olarak biyouygulama alanlarında kullanılacak olan malzemelerin; mekanik özellikleri, biyolojik davranışları, biyolojik bozunma mekanizmaları, şekil verilebilirlikleri, üretilebilirlikleri, maliyetleri ve konak üzerinde uzun hizmet ömrü sunabilmesine bağlı olarak geliştirilebilir. Sadece seçilecek olan malzemelerin özellikleri biyomalzemelerin hizmet ömrünü etkilemez aynı zamanda konak üzerinde kullanım yeri ve hizmet edeceği süre oldukça önemlidir. Biyomalzemelerin kullanılmasında kilit faktör biyoyumdur. Konak üzerinde daha uzun ömürlü hizmet süresine sahip olan yeni nesil biyomalzemelerin üretimi ve tasarımları, kullanılacak olan malzemelerin seçimi ile değişecektir. Bu çalışmada, biyouygulama alanlarında kullanılan biyomalzemelerin kullanım alanları ve metalik biyomalzeme olarak kullanılan temel elementler hakkında bilgi verilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Arsiwala A., Desai P. and Patravale V. (2014). Recent advances in micro/nanoscale biomedical implants. *Journal of Controlled Release*. 189, 25-45.
- [2] Lu W., Wei Z., Gu Z.-Y., Liu T.-F., Park J., Park J., Tian J., Zhang M., Zhang Q. and Gentle III T. (2014). Tuning the structure and function of metal-organic frameworks via linker design. *Chemical Society Reviews*. 43(16), 5561-5593.
- [3] Park J. B. and Lakes R. S. (2007). Composites as biomaterials. *Biomaterials*. 207-224.
- [4] Almasry M. G. (2016). *Ortopedik İmplantların Hasta Vücuduna Biraktığı Atıklar Ve Alerjik Etkileri*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [5] Boretos J. W., Eden M. and Fung Y. (1985). Contemporary biomaterials: material and host response, clinical applications, new technology and legal aspects.
- [6] Bruck S. Blood compatibility of synthetic polymers—An introduction. (1974): Charles C Thomas Springfield.
- [7] Chandran K. B. Cardiovascular biomechanics. (1992). New York University Press.
- [8] McGivney B. A., McGettigan P. A., Browne J. A., Evans A. C., Fonseca R. G., Loftus B. J., Lohan A., MacHugh D. E., Murphy B. A. and Katz L. M. (2010). Characterization of the equine skeletal muscle transcriptome identifies novel functional responses to exercise training. *BMC genomics*. 11(1), 1-17.
- [9] Hildebrand H. F. (2013). Biomaterials—a history of 7000 years. *BioNanoMaterials*. 14(3-4), 119-133.
- [10] Dharmaretnam M., Ahamed R., Devika F. and Niomi T. The Seven Sisters and the Four Eggs. (2001): Loris.
- [11] Ping D. (2014). Review on ω phase in body-centered cubic metals and alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English letters)*. 27(1), 1-11.
- [12] Hench L. L. (1982). Biomaterials, an interfacial approach. *Biophysics and bioengineering series*. 4, 62-86.
- [13] Balci E., Dagdelen F., Qader I. N. and Kok M. (2021). Effects of substituting Nb with V on thermal analysis and biocompatibility assessment of quaternary NiTiNbV SMA. *The European Physical Journal Plus*. 136(2), 1-13.
- [14] Balci E. and Dagdelen F. (2022). Thermal, Structural Properties and Potential Dynamic Corrosion Study of Ti-27Ni-21Nb-2Ta SMA. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*. 46(1), 353-359.
- [15] Hill D. Design engineering of biomaterials for medical devices. (1998).
- [16] Kawahara H., Mimura Y., Ōki M., Kubo K., Soeda Y. and Nomura Y., editors. Institute of Clinical Materials, Osaka and Asahi University, School of Dentistry. Oral Implantology and Biomaterials: Proceedings of the 3rd International Congress of Implantology and Biomaterials in Stomatology, Osaka, April 27-29, 1988; 1989: Elsevier Science Limited
- [17] King P. H. and Fries R. C. Design of biomedical devices and systems. (2003). Marcel Dekker New York-Basel.
- [18] Knight S. R., Aujla R. and Biswas S. P. (2011). Total Hip Arthroplasty-over 100 years of operative history. *Orthopedic reviews*. 3(2).
- [19] Teo A. J., Mishra A., Park I., Kim Y.-J., Park W.-T. and Yoon Y.-J. (2016). Polymeric biomaterials for medical implants and devices. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2(4), 454-472.
- [20] Wong J. Y. and Bronzino J. D. Biomaterials. (2007). CRC press.

- [21] Bai L., Gong C., Chen X., Sun Y., Zhang J., Cai L., Zhu S. and Xie S. Q. (2019). Additive manufacturing of customized metallic orthopedic implants: Materials, structures, and surface modifications. *Metals*. 9(9), 1004.
- [22] Park J. B. and Lakes R. S. (2007). Metallic implant materials. *Biomaterials*. 99-137.
- [23] Wnek G. E. and Bowlin G. L. Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering. (2008). CRC Press.
- [24] Höland W., Schweiger M., Watzke R., Peschke A. and Kappert H. (2008). Ceramics as biomaterials for dental restoration. *Expert review of medical devices*. 5(6), 729-745.
- [25] Schnitman P. A. (1990). Dental implants: State of the art, state of the science. *International journal of technology assessment in health care*. 6(4), 528-544.
- [26] Gebelein C. and Koblitz F. Biomedical and dental applications of polymers. (2013). Springer Science & Business Media.
- [27] O'brien W. J. (2002). Dental materials and their selection, 2002. *Quintessence*.
- [28] Ariga K., Minami K., Ebara M. and Nakanishi J. (2016). What are the emerging concepts and challenges in NANO? Nanoarchitectonics, hand-operating nanotechnology and mechanobiology. *Polymer Journal*. 48(4), 371-389.
- [29] Heli H. and Rahi A. (2016). Synthesis and applications of nanoflowers. *Recent patents on nanotechnology*. 10(2), 86-115.
- [30] Jain S., Jain A. P., Jain S., Gupta O. N. and Vaidya A. (2013). Nanotechnology: An emerging area in the field of dentistry. *J Dent Sci*. 10, 1-9.
- [31] Balasundaram G., Storey D. M. and Webster T. J. (2014). Novel nano-rough polymers for cartilage tissue engineering. *International journal of nanomedicine*. 9, 1845.
- [32] Ige O. O., Umoru L. E. and Aribu S. (2012). Natural products: a minefield of biomaterials. *International Scholarly Research Notices*. 2012.
- [33] Katz E. and Willner I. (2004). Integrated nanoparticle–biomolecule hybrid systems: synthesis, properties, and applications. *Angewandte Chemie International Edition*. 43(45), 6042-6108.
- [34] He H., Wu Y., He N. and Deng Y. (2015). The latest progress of on-site pathogens detection techniques and instruments based on nucleic acid. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 15(9), 6342-6356.
- [35] Gupta S. K., Kizilbash S. H. and Muanza T. M. Targeted Therapies For Glioblastoma: A Critical Appraisal.
- [36] Zhao C., Rehman F. U., Jiang H., Selke M., Wang X. and Liu C.-Y. (2016). Titanium dioxide-tetra sulphonatophenyl porphyrin nanocomposites for target cellular bio-imaging and treatment of rheumatoid arthritis. *Science China Chemistry*. 59(5), 637-642.
- [37] Yao C. and Webster T. J. (2006). Anodization: a promising nano-modification technique of titanium implants for orthopedic applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 6(9-10), 2682-2692.
- [38] Bhat S. V. (2002). Overview of biomaterials. *Biomaterials*. Springer; p. 1-11.
- [39] Mathew M., Runa M., Laurent M., Jacobs J., Rocha L. and Wimmer M. (2011). Tribocorrosion behavior of CoCrMo alloy for hip prosthesis as a function of loads: a comparison between two testing systems. *Wear*. 271(9-10), 1210-1219.
- [40] Black J. (1992). Allergic foreign-body response in biological performance of materials. *Fundamentals of biocompatibility*. New York: Dekker.
- [41] Pasinli A. (2004). Biyomedikal uygulamalarda kullanılan biyomalzemeler. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 4(4), 25-34.
- [42] Hench L. L. and Andersson Ö. (1993). Bioactive glasses. An introduction to bioceramics. World Scientific; p. 41-62.
- [43] Güven Ş. (2014). Biyouyumluluk ve biyomalzemelerin seçimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 2(3), 303-311.
- [44] Ercan E. (2014). Nikelce zengin niti şekil hatırlamalı alaşımın oksidasyon davranışının incelenmesi/Investigation of oxidation behavior at ni-rich niti shape memory alloy. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi.
- [45] Williams D. (1990). An introduction to medical and dental materials. Concise Encyclopedia of Medical & Dental Materials. 2nd Edition, The MIT Press, Cambridge.
- [46] Lane W. A. (1895). Some remarks on the treatment of fractures. *British medical journal*. 1(1790), 861.
- [47] Lambtte A. (1909). Technique et indication des prothèses dans le traitement des fractures. *Presse med*. 17, 321.
- [48] Sherman W. (1912). Vanadium steel bone plates and screws. *Surg Gynecol Obstet*. 14, 629-634.
- [49] Chen Q. and Thouas G. A. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 87, 1-57.

- [50] Savinyg P. and Girovd E. (2002). Metallic Biomaterials. *Kungl Tekniska Högskolan*. 11-15.
- [51] Smith D. C. (1993). Dental implants: materials and design considerations. *International Journal of Prosthodontics*. 6(2).
- [52] Parr G. R., Gardner L. K. and Toth R. W. (1985). Titanium: the mystery metal of implant dentistry. Dental materials aspects. *The Journal of prosthetic dentistry*. 54(3), 410-414.
- [53] Variola F., Brunski J. B., Orsini G., de Oliveira P. T., Wazen R. and Nanci A. (2011). Nanoscale surface modifications of medically relevant metals: state-of-the art and perspectives. *Nanoscale*. 3(2), 335-353.
- [54] Çakır A. (1995). İnsan vücudunda kullanılan metalik implantların dünü ve bugünü. *8th. International Metallurgy and Materials Congrees*. 1131, 1137.
- [55] Brooks A., Clayton C., Doss K. and Lu Y. (1986). On the role of Cr in the passivity of stainless steel. *Journal of the Electrochemical Society*. 133(12), 2459.
- [56] Navarro M., Michiardi A., Castano O. and Planell J. (2008). Biomaterials in orthopaedics. *Journal of the royal society interface*. 5(27), 1137-1158.
- [57] Agarwal G. C., Berman B. M. and Stark L. (1969). A lumped parameter model of the cerebrospinal fluid system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. (1), 45-53.
- [58] Şimşek İ. (2017). *Toz Metalurjisi İle Üretilen Titanyum Alaşımı Biyomalzemelerin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 30-44.
- [59] Biesiekierski A., Wang J., Gepreel M. A.-H. and Wen C. (2012). A new look at biomedical Ti-based shape memory alloys. *Acta biomaterialia*. 8(5), 1661-1669.
- [60] Pramanik S., Agarwal A. K. and Rai K. (2005). Chronology of total hip joint replacement and materials development. *Trends in Biomaterials & Artificial Organs*. 19(1), 15-26.
- [61] Van Noort R. (1987). Titanium: the implant material of today. *Journal of Materials Science*. 22(11), 3801-3811.
- [62] Duan K. and Wang R. (2006). Surface modifications of bone implants through wet chemistry. *Journal of Materials Chemistry*. 16(24), 2309-2321.
- [63] Davis J. (2003). Materials for medical devices. *ASM Handbook Series*.
- [64] Evans E. and Thomas I. (1986). The in vitro toxicity of cobalt-chrome-molybdenum alloy and its constituent metals. *Biomaterials*. 7(1), 25-29.
- [65] Zhu D., Cockerill I., Su Y., Zhang Z., Fu J., Lee K.-W., Ma J., Okpokwasili C., Tang L. and Zheng Y. (2019). Mechanical strength, biodegradation, and in vitro and in vivo biocompatibility of Zn biomaterials. *ACS applied materials & interfaces*. 11(7), 6809-6819.
- [66] Bowen P. K., Drelich J. and Goldman J. (2013). Zinc exhibits ideal physiological corrosion behavior for bioabsorbable stents. *Advanced Materials*. 25(18), 2577-2582.
- [67] Bowen P. K., Guillory II R. J., Shearier E. R., Seitz J.-M., Drelich J., Bocks M., Zhao F. and Goldman J. (2015). Metallic zinc exhibits optimal biocompatibility for bioabsorbable endovascular stents. *Materials Science and Engineering: C*. 56, 467-472.
- [68] Guillory R. J., Bowen P. K., Hopkins S. P., Shearier E. R., Earley E. J., Gillette A. A., Aghion E., Bocks M., Drelich J. W. and Goldman J. (2016). Corrosion characteristics dictate the long-term inflammatory profile of degradable zinc arterial implants. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2(12), 2355-2364.
- [69] Ma J., Zhao N. and Zhu D. (2015). Endothelial cellular responses to biodegradable metal zinc. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 1(11), 1174-1182.
- [70] Ma J., Zhao N. and Zhu D. (2016). Bioabsorbable zinc ion induced biphasic cellular responses in vascular smooth muscle cells. *Scientific reports*. 6(1), 1-10.
- [71] Shearier E. R., Bowen P. K., He W., Drelich A., Drelich J., Goldman J. and Zhao F. (2016). In vitro cytotoxicity, adhesion, and proliferation of human vascular cells exposed to zinc. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2(4), 634-642.
- [72] Li H., Xie X., Zheng Y., Cong Y., Zhou F., Qiu K., Wang X., Chen S., Huang L. and Tian L. (2015). Development of biodegradable Zn-1X binary alloys with nutrient alloying elements Mg, Ca and Sr. *Scientific reports*. 5(1), 1-14.
- [73] Li H., Zheng Y. and Qin L. (2014). Progress of biodegradable metals. *Progress in natural science: materials international*. 24(5), 414-422.
- [74] Zheng Y. F., Gu X. N. and Witte F. (2014). Biodegradable metals. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 77, 1-34.
- [75] Feyerabend F., Fischer J., Holtz J., Witte F., Willumeit R., Drücker H., Vogt C. and Hort N. (2010). Evaluation of short-term effects of rare earth and other elements used in magnesium alloys on primary cells and cell lines. *Acta biomaterialia*. 6(5), 1834-1842.

- [76] Zeng R., Dietzel W., Witte F., Hort N. and Blawert C. (2008). Progress and challenge for magnesium alloys as biomaterials. *Advanced Engineering Materials*. 10(8), B3-B14.
- [77] Bobyn J., Stackpool G., Hacking S., Tanzer M. and Krygier J. (1999). Characteristics of bone ingrowth and interface mechanics of a new porous tantalum biomaterial. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*. 81(5), 907-914.
- [78] Balci E. and Dagdelen F. (2022). The comparison of TiNiNbTa and TiNiNbV SMAs in terms of corrosion behavior, microhardness, thermal and structural properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1-7.
- [79] Dagdelen F., Balci E., Qader I., Aydogdu Y. and Saydam S. (2021). Effects of Substituting Nb with Ta on Microstructure and Thermal Properties of Novel Biocompatible TiNiNbTa Shape Memory Alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 122(14), 1572-1580.
- [80] Balci E., Dagdelen F., Qader I. N. and Kok M. (2021). Effects of substituting Nb with V on thermal analysis and biocompatibility assessment of quaternary NiTiNbV SMA. *The European Physical Journal Plus*. 136(2), 145.
- [81] Dalstra M., Denes G. and Melsen B. (2000). Titanium- niobium, a new finishing wire alloy. *Clinical orthodontics and research*. 3(1), 6-14.
- [82] Xu J., Weng X.-J., Wang X., Huang J.-Z., Zhang C., Muhammad H., Ma X. and Liao Q.-D. (2013). Potential use of porous titanium–niobium alloy in orthopedic implants: preparation and experimental study of its biocompatibility in vitro. *PloS one*. 8(11), e79289.
- [83] Dagdelen F. and Aydogdu Y. (2019). Transformation behavior in NiTi–20Ta and NiTi–20Nb SMAs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 136(2), 637-642.
- [84] Dagdelen F., Balci E., Qader I., Ozen E., Kok M., Kanca M., Abdullah S. and Mohammed S. (2020). Influence of the Nb content on the microstructure and phase transformation properties of NiTiNb shape memory alloys. *JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society*. 72(4), 1664-1672.
- [85] Osathanon T., Bepinyowong K., Arksornnukit M., Takahashi H. and Pavasant P. (2006). Ti-6Al-7Nb promotes cell spreading and fibronectin and osteopontin synthesis in osteoblast-like cells. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 17(7), 619-625.
- [86] Zreiqat H., Ramaswamy Y., Wu C., Paschalidis A., Lu Z., James B., Birke O., McDonald M., Little D. and Dunstan C. R. (2010). The incorporation of strontium and zinc into a calcium–silicon ceramic for bone tissue engineering. *Biomaterials*. 31(12), 3175-3184.
- [87] Zhao D., Witte F., Lu F., Wang J., Li J. and Qin L. (2017). Current status on clinical applications of magnesium-based orthopaedic implants: A review from clinical translational perspective. *Biomaterials*. 112, 287-302.
- [88] Yu W., Zhao H., Ding Z., Zhang Z., Sun B., Shen J., Chen S., Zhang B., Yang K. and Liu M. (2017). In vitro and in vivo evaluation of MgF₂ coated AZ31 magnesium alloy porous scaffolds for bone regeneration B Biointerfaces.
- [89] Angrisani N., Reifenrath J., Zimmermann F., Eifler R., Meyer-Lindenberg A., Vano-Herrera K. and Vogt C. (2016). Biocompatibility and degradation of LAE442-based magnesium alloys after implantation of up to 3.5 years in a rabbit model. *Acta biomaterialia*. 44, 355-365.
- [90] Kuhlmann J., Bartsch I., Willbold E., Schuchardt S., Holz O., Hort N., Höche D., Heineman W. R. and Witte F. (2013). Fast escape of hydrogen from gas cavities around corroding magnesium implants. *Acta biomaterialia*. 9(10), 8714-8721.
- [91] Chen Y., Xu Z., Smith C. and Sankar J. (2014). Recent advances on the development of magnesium alloys for biodegradable implants. *Acta biomaterialia*. 10(11), 4561-4573.
- [92] Li H. and Zheng Y. (2016). Recent advances in bulk metallic glasses for biomedical applications. *Acta biomaterialia*. 36, 1-20.
- [93] Davis T., Bichler L., D'Elia F. and Hort N. (2018). Effect of TiBor on the grain refinement and hot tearing susceptibility of AZ91D magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 759, 70-79.
- [94] Wu H., Wu G. and Chu P. K. (2016). Effects of cerium ion implantation on the corrosion behavior of magnesium in different biological media. *Surface and Coatings Technology*. 306, 6-10.
- [95] Li K., Wang B., Yan B. and Lu W. (2013). Microstructure, in vitro corrosion and cytotoxicity of Ca-P coatings on ZK60 magnesium alloy prepared by simple chemical conversion and heat treatment. *Journal of Biomaterials Applications*. 28(3), 375-384.
- [96] Liu P., Pan X., Yang W., Cai K. and Chen Y. (2012). Improved anticorrosion of magnesium alloy via layer-by-layer self-assembly technique combined with micro-arc oxidation. *Materials Letters*. 75, 118-121.

- [97] Witte F. (2010). The history of biodegradable magnesium implants: a review. *Acta biomaterialia*. 6(5), 1680-1692.
- [98] Coulthard P., Esposito M., Slater M., Worthington H. and Kay E. (2003). Prevention. Part 5: Preventive strategies for patients requiring osseointegrated oral implant treatment. *British dental journal*. 195(4), 187-194.
- [99] Hua N., Huang L., Wang J., Cao Y., He W., Pang S. and Zhang T. (2012). Corrosion behavior and in vitro biocompatibility of Zr–Al–Co–Ag bulk metallic glasses: An experimental case study. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 358(12-13), 1599-1604.
- [100] Black J. Biological performance of materials: fundamentals of biocompatibility. (2005). Crc Press.
- [101] Ong K. L., Lovald S. and Black J. Orthopaedic biomaterials in research and practice. (2014). CRC press.
- [102] Yılmaz Y., Avcı B. and Demirören H. (2019). Biyomalzeme Sektöründe Kullanılan Titanyum ve Alaşımları.
- [103] Yalcin B. M. and Karahan T. F. (2007). Effects of a couple communication program on marital adjustment. *The Journal of the American Board of Family Medicine*. 20(1), 36-44.
- [104] Akdaş Y. F. (2006). *Termal Oksidasyon Yöntemi İle Cp-ti Ve Ti6al4v Alaşımının Yüzey Modifikasyonu*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [105] Williams D. F., Cahn R. W. and Bever M. B. Concise encyclopedia of medical & dental materials. (1990).
- [106] Lütjering G. and Williams J. C. Titanium matrix composites. (2007). Springer.
- [107] Karal Z. *Biyoyumlu metallerden lazer ablasyon yöntemiyle nanoparçacık üretimi ve karakterizasyonu*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [108] Kasuga T., Kondo H. and Nogami M. (2002). Apatite formation on TiO₂ in simulated body fluid. *Journal of Crystal Growth*. 235(1-4), 235-240.
- [109] Wang X.-X., Yan W., Hayakawa S., Tsuru K. and Osaka A. (2003). Apatite deposition on thermally and anodically oxidized titanium surfaces in a simulated body fluid. *Biomaterials*. 24(25), 4631-4637.
- [110] Park J. and Lakes R. S. Biomaterials: an introduction. (2007). Springer Science & Business Media.
- [111] Campbell F. C. Phase diagrams: understanding the basics. (2012). ASM international.
- [112] Shi X., Yang H., Mao H., Li Y., Zhang J. and Yin X. (2018). Effect of plastic deformation of V nanowires on the transformation characteristics of NiTiV alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 735, 162-165.
- [113] Collings E. (1984). The physical metallurgy of titanium alloys. *Metals Park Ohio*. 3.
- [114] Marcus P. (1994). On some fundamental factors in the effect of alloying elements on passivation of alloys. *Corrosion Science*. 36(12), 2155-2158.
- [115] Kırkıl Ş. (2014). At kestanesi kabuklarından kimyasal aktivasyon yöntemi ile elde edilen aktif karbonlara gümüş adsorpsiyonu.
- [116] Karakaya F. (2021). *Yeşil sentez yöntemiyle Ruscus aculeatus L. bitkisi kullanılarak gümüş nanopartiküllerin sentezi ve antibiyofilm, antimikrobiyal, antikanser aktivitelerinin incelenmesi*. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [117] Karaköse E. and Keskin M. (2015). Effect of microstructural evolution and elevated temperature on the mechanical properties of Ni–Cr–Mo alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 619, 82-90.
- [118] Tur K. (2009). Biomaterials and tissue engineering for regenerative repair of articular cartilage defects. *Archives of Rheumatology*. 24(4), 206-217.
- [119] Yamamoto A., Honma R. and Sumita M. (1998). Cytotoxicity evaluation of 43 metal salts using murine fibroblasts and osteoblastic cells. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and the Australian Society for Biomaterials*. 39(2), 331-340.
- [120] Bronzino J. D. and Peterson D. R. The biomedical engineering handbook: Four volume set. (2018). CRC press.