

e- ISSN:2458-7575

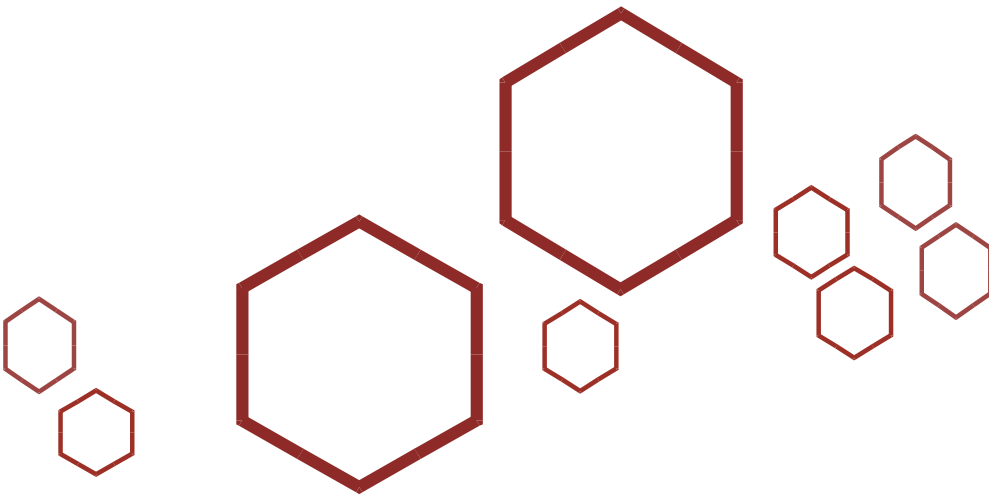
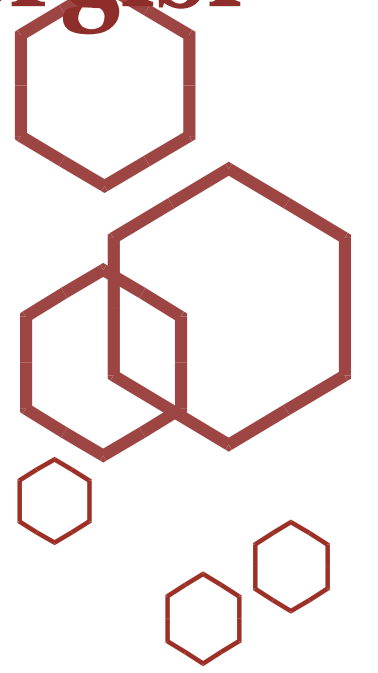
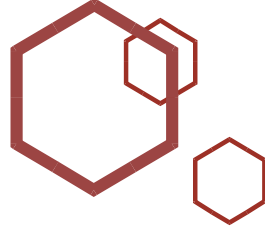


Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

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

Sekretarya / Secretariat

Arş. Gör. Damla KILIÇ ERİKGENOĞLU

Arş. Gör. Ezgi GÜLER

Arş. Gör. Kadriye Nurdanay ÖZTÜRK

Dil Editörü / Language Editor

Öğr. Gör. Dr. Ayça BAKİNER ÇEKİN

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Ülküye Duda GÜL (ulkuyedudu.gul@bilecik.edu.tr)
Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi

Doç. Dr. Tuğba YURDAKADİM (tugba.yurdakadim@bilecik.edu.tr)
Matematik Bölümü, Fen Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gülçin Akgören PALABIYIK (gulcin.akgoren@bilecik.edu.tr)
Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi



SAHİBİ / 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

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 yayın 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. Ahmet Murat Pinar / Pamukkale Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Makine Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Atakan Doğan / Eskişehir Teknik Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü/Elektronik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hakan Geren / Ege Üniversitesi/Ziraat Fakültesi/Tarla Bitkileri Bölümü/Tarla Bitkileri Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hasbi Yaprak / Kastamonu Üniversitesi/Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Yapı Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hayati Mamur / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü/Devreler ve Sistemler Teorisi Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hülya Özler / Sinop Üniversitesi/Fen-Edebiyat Fakültesi/Biyoloji Bölümü/Biyoloji Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz Aruntaş / Gazi Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Mehmet Yağmur / Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi/Ziraat Fakültesi/Tarla Bitkileri Bölümü/Tahıllar ve Yemelik Baklagiller Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Murat Olgun / Ankara Üniversitesi/Fen Fakültesi/Matematik Bölümü/Fonksiyonel Analiz Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Nermin Şarlık / Konya Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Hidrolik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Nizamettin Kahraman / Karabük Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/İmalat Mühendisliği Bölümü/İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Osman Yıldız / Kırıkkale Üniversitesi/Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Hidrolik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Özlem Girgin Atlıhan / Pamukkale Üniversitesi/Fen Fakültesi/Matematik Bölümü/Analiz ve Fonksiyonlar Teorisi Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Parisa Göker / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi/Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi/İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü/İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Türkan Göksal Özbalta / Ege Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Yapı İşletmesi Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Ünal Geçgel / Trakya Üniversitesi/Arda Meslek Yüksekokulu/Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü/Kimya Teknolojisi Pr./
- Prof. Dr. Zafer Türkmen / Giresun Üniversitesi/Fen-Edebiyat Fakültesi/Biyoloji Bölümü/Botanik Anabilim Dalı/
- Prof. Dr. Zuhal Kaynakçı Elinç / Akdeniz Üniversitesi/Mimarlık Fakültesi/İç Mimarlık Bölümü/İç Mimarlık Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Ali Ekber Irmak / Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi/Fen Fakültesi/Fizik Bölümü/Yoğun Madde Fiziği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Burcu İleri / Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi/Lapseki Meslek Yüksekokulu/Park Ve Bahçe Bitkileri Bölümü/Peyzaj Ve Süs Bitkileri Yetiştiriciliği Pr./
- Doç. Dr. Doğu Çağdaş Atilla / Altınbaş Üniversitesi/Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Pr. /
- Doç. Dr. Emre Dandı / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/Bilgisayar Yazılımı Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Emre Taş / Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi/Fen-Edebiyat Fakültesi/Matematik Bölümü/Analiz ve Fonksiyonlar Teorisi Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Fethi Dağdelen / Fırat Üniversitesi/Fen Fakültesi/Fizik Bölümü/Katıhal Fiziği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Gökhan Açıkbaş / Mersin Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı /
- Doç. Dr. İlker Tekin / Karabük Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı/
- Doç. Leyla Kubat / Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi/Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi/Seramik ve Cam Bölümü/Seramik Anasanat Dalı/
- Doç. Dr. Mehtap Tanyol / Munzur Üniversitesi/İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi/Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü/Kentleşme Ve Çevre Sorunları Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Recep Tuğrul Erdem / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Yapı Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Seda Örenay Boyacıoğlu / Aydın Adnan Menderes Üniversitesi/Tıp Fakültesi/Dahili Tıp Bilimleri Bölümü/Tıbbi Genetik Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Selin Muradiye Akçay / Aydın Adnan Menderes Üniversitesi/Ziraat Fakültesi/Biyosistem Mühendisliği Bölümü/Arazi ve Su Kaynakları Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Tolga Mert / Yıldız Teknik Üniversitesi/Makine Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Makine Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Doç. Dr. Vahap Yönten / Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Çevre Mühendisliği Bölümü/Çevre Teknolojisi Anabilim Dalı/

Hakem Listesi / Reviewer Board

- Dr. Öğr. Üyesi Adnan Uğur / Ordu Üniversitesi/Ziraat Fakültesi/Bahçe Bitkileri Bölümü/Sebze Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Burak Dökmetaş / Kafkas Üniversitesi/Mühendislik-Mimarlık Fakültesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü/Elektrik Makinaları Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Ersin Arslanbulut / Sivas Cumhuriyet Üniversitesi/Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu/Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü/Makine Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Gülfem Binal / Bartın Üniversitesi/Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü/Seramik Malzemeler Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Gürcan Lokman / Milli Savunma Üniversitesi/Hava Astsubay Meslek Yüksekokulu/Teknoloji Bilimleri Bölümü/Bilgisayar Programcılığı Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Hale Yıldızay / Kütahya Dumlupınar Üniversitesi/Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksekokulu/El Sanatları Bölümü/Çini Sanatı ve Tasarımı Pr./
- Dr. Öğr. Üyesi Hatice Erdem / Muş Alparslan Üniversitesi/Mühendislik-Mimarlık Fakültesi/Gıda Mühendisliği Bölümü/Gıda Teknolojileri Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Lütfiye Özpak / Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi/Tıp Fakültesi/Temel Tıp Bilimleri Bölümü/Tıbbi Biyoloji Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali Yalçınkaya / Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi/Mühendislik-Mimarlık Fakültesi/Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/Bilgisayar Yazılımı Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Elitaş / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Murat Aksel / Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi/Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Murat Batan / Batman Üniversitesi/Mühendislik-Mimarlık Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü/Hidrolik Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Nazım İmal / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü/Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Anabilim Dalı/
- Dr. Öğr. Üyesi Onur Demirel / Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/Mekatronik Mühendisliği Bölümü/Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı/
- 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 Rukiye Öztürk Mert / Hitit Üniversitesi/Fen-Edebiyat Fakültesi/Matematik Bölümü/Analiz ve Fonksiyonlar Teorisi Anabilim Dalı/

İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri / Research Articles

1	Kiremit Üretiminde Kuruma Hassasiyetinin Tespiti ve Çatlakların Giderilmesinde Bigot Yönteminin Kullanımı <i>Nihal Derin Coşkun, Eray Çaçın</i>	01-17
2	Doymuş Ca(OH)₂ ile Alkali Direnci Kuvvetlendirilmiş Bazalt Lifinin Çimento Harcı Performansına Etkisi <i>Lütfullah Gündüz, Şevket Onur Kalkan</i>	18-32
3	Mürdümük (<i>Lathyrus sativus</i> L.) Genotiplerinin Yem Kalitesi ve Besleme Değeri <i>İlknur Yıldırım, Erdem Gülümser, Hanife Mut, Uğur Başaran, Medine Çopur Doğrusöz</i>	33-38
4	Kütüphane Bireysel Çalışma Odaları İçin Bir Tasarım Önerisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Örneği <i>Merve Buldaç, Turgut Kalay</i>	39-53
5	Mikro Ölçekli Sıfır Değerlikli Demir (mZVI) Partikülü ile Sulu Çözeltilerden C.I. Vat Green 1 Boyasının Gideriminin İncelenmesi <i>Burçin Yıldız</i>	54-67
6	İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin AWGNGN Analizi <i>Damla Gümüş, Mehmet Bilim</i>	68-75
7	Esnek Ardışık-Çıkarımlı Kutupsal Kod Çözücünün FPGA Gerçeklemesi <i>Muhammet Fatih Sertkaya, Enver Çavuş</i>	76-81
8	Temporal Analysis of Meteorological and Hydrological Drought in the Middle Mediterranean Basin <i>Dilek Taylan, Tuba Aydın, Tahsin Baykal, Özlem Terzi</i>	82-94
9	Üniversal Freze Tezgâhlarında Düz Dişli Çark İmalatı Destek Yazılımı <i>Telat Türkyılmaz</i>	95-107
10	Manisa İçin Farklı Tipteki Trombe Duvarlarının Enerji, Ekonomi ve Çevresel Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması <i>Erdem Ersayın</i>	108-120
11	Bitki Bazlı Adsorbent Üzerine Boyar Madde Adsorpsiyonu: Bir Optimizasyon Çalışması <i>Erbil Kavci</i>	121-128
12	Effects of Different Irrigation Intervals and Irrigation Levels on Yield and Quality Components of Processing Tomatoes and Economical Analysis <i>İlker Elmas, Ali Kaan Yetik, Hayrettin Kuşçu</i>	129-139
13	XGBoost Algoritması ile İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu Öznitelik Seçme Tabanlı Jar Kötü Amaçlı Yazılımlarının Tespiti <i>Mahmut Tokmak</i>	140-152
14	Investigation of Vector Control Applications for Asynchronous Machines Using Online Parameter Estimation Methods <i>Nihat Pamuk</i>	153-161
15	Doğrusal Katılaştırılmış Sn-Zn Ötektik Alaşımında Altsoğumanın Hesaplanması <i>Mevlüt Şahin</i>	162-172

16	<i>Ophrys mammosa</i> Desf. subsp. <i>mammosa</i> (Orchidaceae) Polinaryumlarında Bazı Hormonların Araştırılması <i>Mehmet Aybeke</i>	173-180
17	Evaluation of SNPs and miRNAs in the <i>BID</i>, <i>MAPK10</i>, and <i>AGER</i> Genes Related to Alzheimer's Disease by Using <i>In Silico</i> Tools <i>Nur Demirci, Ebru Özkan Oktay, Mesut Karahan</i>	181-208
18	Some Matrix Applications on the Special Integer Number Sequences <i>Ümmügülsün Akbaba</i>	209-216

Derleme Makaleleri / Review Articles

19	Tel Ark Katmanlı İmalat (TAKİ) Yöntemi ve Farklı Malzemelerde Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi <i>Ersin Çakır, Mustafa Ulutan</i>	217-235
20	Bazı İterasyon Yöntemleri için Cesàro Ortalamasının Kuvvetli ve Zayıf Yakınsaklığı <i>Lale Cona, Çiğdem Kaygusuz</i>	236-253



Araştırma Makalesi - Research Article

Kiremit Üretiminde Kuruma Hassasiyetinin Tespiti ve Çatlakların Giderilmesinde Bigot Yönteminin Kullanımı

Implementation of the Bigot Method for the Determination of Drying Sensitivity and Removal of Cracks in Roof Tile Production

Nihal Derin Coşkun^{1*}, Eray Çaşın²

Geliş / Received: 11/03/2022

Revize / Revised: 02/01/2023

Kabul / Accepted: 19/01/2023

ÖZ

Türkiye’de kiremit sektörü her geçen gün gelişmekte ve geleneksel üretimlerin yerini ar-ge çalışmalarıyla değerlendirilen süreçler almaktadır. Bu doğrultuda Ece Kiremit üretim tesislerinde kiremit ürünlerin şekillendirme sonrası doğal kurutma esnasında kuruma çatlaklarının tespiti ve giderilmesi için bigot ve yeni reçete çalışmaları yapılmıştır. Bu hataların giderilebilmesi için tüm hammaddelerin Bigot Eğrilerinin çıkarılması, karakterizasyonları ve yeni reçete çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bigot Eğrisi mantığına göre kiremit numunelerinin nem atma özellikleri ve kuruma küçülmelerinin tespiti için tüm örneklerin 100 °C’de kuruma eğrileri çıkarılmış ve Bigot’a göre küçülme – nem eğrileri verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, çalışmada yer alan Gülücek kil, Gülücek kist ve Kınık kisti olmak üzere üç farklı kil çalışılmıştır. Gülücek Kistinin kuru küçülmesinin diğer hammaddelere göre daha az olduğu, neminin az bir kısmını (%1,04) attığında bütün kuru küçülmesini bitirdiğinden dolayı reçete içerisinde yüksek miktarda kullanımının kuruma çatlaklarına sebep olacağı çözümlenmiştir. Ayrıca yapılan karakterizasyon analizlerinin sonuçlarından da anlaşılacağı gibi, klorit ve klinoklor minerallerini içeren bir yapıda olduğundan su tutma özelliğinin de diğer hammaddelerden daha fazla olduğu görülmüştür. Oluşturulan reçete çalışmalarında 4 farklı reçete yapılarak Gülücek Kistinin oranı reçete içerisinde düşürülmüştür. Yapılan 4 reçetede de kuruma küçülmelerinin zamana bağlı olarak daha geniş aralıkta olduğu, fakat içerisindeki nemi daha çabuk bıraktığı görülmektedir. Özellikle Reçete 3 ve 4’ün öncelikli olarak üretim denemelerinin yapılması, olumsuz olabilecek durumlarda reçete 2’nin üretim denemesinin yapılması uygun bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler- Kiremit, Kil, Kurutma, Bigot

ABSTRACT

Roof tile sector in Turkey is continuing to develop every day and traditional production methods are replaced by processes evaluated via R&D studies. Accordingly, bigot and new recipe studies have been conducted at Ece Kiremit production facilities for the identification and elimination of drying cracks during natural drying following the shaping of roof tile products. Bigot Curves were drawn for all raw materials in addition to conducting studies for drawing out their characterizations as well as studies for new recipes for eliminating these faults. Based on the Bigot Curve logic, drying curves were drawn for all samples at 100 °C to identify the moisture release characteristics of roof tile samples as well as their drying shrinkage and curves were provided for shrinkage –

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: nihalderincoskun@odu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3024-9443>)

Seramik ve Cam Bölümü, Ordu Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Ordu, Türkiye

²İletişim: eraycasin@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-3698-2248>)

Ece Banyo Ar-Ge Merkezi, Çorum, Türkiye

moisture based on Bigot. As a result of the experimental studies conducted, three different clays were used in the study including Gülücek Clay, Gülücek Kist and Kınık Kist. It was analyzed that since Gülücek Kist has a lower dry shrinkage compared to the other raw materials and since it completes its dry shrinkage upon releasing a small portion (1,04 %) of its moisture, using it in high amounts in the recipe will lead to drying cracks. In addition, as can be understood from the results of characterization analyses, it was observed to have a greater water retention capacity compared with the other raw materials since it has a structure that includes minerals such as chlorite and clinocllore. A total of 4 different recipes were developed and the ratio of Gülücek Kist was decreased in the recipe. It can be observed for all 4 recipes that drying shrinkages are at a wider interval based on time but that the moisture is released faster. Recipes 3 and 4 were considered to have priority for production trials and it was considered appropriate to conduct production trial with recipe 2 in case any adverse results are obtained.

Keywords- Tile, Clay, Drying, Bigot

I.GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca barınma temel ihtiyaçlardan olmuştur ve bu sorunu gidermek için insanlar ahşap, taş, kerpiç, tuğla ve kiremit gibi çeşitli malzemelerden faydalanmıştır. Milattan 6000 yıl öncesine dayanan bu süreç elle şekillendirilip hazırlanan kiremit örneği olan kerpiçlerden buhar makinesinin 1786'da keşfiyle beraber üretimin makinelerle yapıldığı bir sürece dönüşmüştür. Kiremit üretiminde özellikle kullanılan Hoffman fırınlar, helezonlu şekillendirme makineleri Almanya'da gelişen teknolojinin tüm Dünya'ya yayılmasında öncü olmuştur [1,2]. 1895'te kamara kurutmaların keşfi ana hammadde killer olan kiremit ve tuğla sektöründe üretime büyük katkılar sağlamıştır [1]. Kiremit ve tuğla üretiminde hala geçmiş yüzyıllardaki adımlar takip edilmesine rağmen gelişen teknoloji ve yöntemler hammadde karakterizasyonu ve hazırlama aşamaları, pişirme, fırın tasarımları ve ileri mekanizasyonla daha kaliteli ürünler ortaya konmasını sağlamaktadır.

Kiremit üretiminde kurutma teknolojisinin yanı sıra kullanılan temel hammaddelerde büyük önem taşımaktadır. Başlıca hammadde olan killer benzer kimyasal bileşime sahip olmalarına karşın fiziksel olarak farklı özellikler sergilemektedir. Bunları genel olarak yüzey killeri, şeyller ve ateş killeri olarak sınıflandırmak mümkündür [3]. Genellikle muskovitik ve lateritli killer kullanılarak üretilen kiremitler; mukavemet, termal özellikler ve tane boyut dağılımının düzenlenmesinin sonucu olarak sızdırmazlık dayanımları gibi fiziksel özelliklerinin de geliştirilmesi ile teknik detayların da göz önünde bulundurularak üretilen bir malzeme haline gelmiştir. Kiremitler, doğal killerden oluşturulduğundan insan sağlığını etkileyecek herhangi bir yabancı madde içermediği gibi dış etkenlerin etkisi altında kalmalarına rağmen (hava şartlarındaki değişiklikler gibi) uzun yıllar dayanıklı tüketim malzemesi haline gelmişlerdir. Kiremit üretiminde kullanılan killerin diğer seramik malzemelerin üretimlerinde kullanılan killerden farkı yüksek demir, silis ve karbonat içeriğine sahip olmalarıdır. Bu tip killer montmorillonit, kaolinit, kuvars, klorit ve illit gibi mineralleri içerir [4,5]

Killer plastik yapıya sahip su ile şekillendirilebilen, kurutma ve pişirme işlemleriyle sertleşen malzemelerdir. Plastikliğin oluşabilmesi için bünyenin su alması gereklidir. Bu fiziksel bir özelliktir. Ve her kilin bünyeye aldığı su miktarı değişiklik göstermektedir [6]. Şekillendirilen ürünün bünyesindeki bu suyun sonrasında bünyeden uzaklaştırılarak atılması gerekmektedir. Bu işlem kontrollü olmadığı veya bünye bileşiminde sorunlar olduğunda çatlaklar ve deformasyonlar meydana gelmekte bu da nihai ürün adedi ve kalitesinde etki etmektedir [5,6]. Mısırlılardan Babillilere, Asurlulardan 19. yy.'a kadar inşaatlarda kullanılan tuğla ve kiremitler incelendiğinde kurutma açık havada mevsim şartlarına bağlı olarak gerçekleştirilirken 1858'de ilk olarak kurutucuların ortaya çıktığı görülmektedir [7]. Gerek şekillendirme gerek kurutma kiremit üretiminde suyun atılmaya başladığı aşamalarıdır ve bu doğrultuda yapılan her işlem son ürüne etki etmektedir. Bu süreçte; sıcaklık, nem ve küçülme birbiriyle bağlantılı hareket etmektedir. Yalnızca ürün kalitesi değil, enerji maliyetleri, zaman ve toplam ürün miktarı da bu faktörlerden etkilenmektedir [8]. Yapılan çalışmada Ece Kiremit A.Ş. özelinde kiremit üretiminden elde edilen ürünlerde şekillendirme sonrası meydana gelen çatlakların nedeni ve bu sorunlara çözüm yöntemleri laboratuvar bazlı araştırılmıştır. Seramik ham malzemede ilk olarak kurutma su kaybının ani olduğu seramik malzemenin şekillendirmesi için gerekli olarak bünyeye almış olduğu ve küçülmeyi belirleyen suyun atıldığı, ikinci aşamada ise porlar içerisinde yer alan nispeten azalarak çatlakların oluşumuna kadar devam eden ve kurumada hassasiyet gerektiren aşamalar bulunmaktadır [9]. Bu hassasiyeti ölçmek malzemede meydana gelecek sorunları gidermek açısından önem taşımaktadır. Kuruma hassasiyeti indeksi olan Bigot ve Ratzemberger yöntemlerinden Chijsky-Bigot Metodu seçilmiştir [10].

Bigot yöntemi aşağıdaki denklem kullanılarak verilerin hesaplanmasıyla çizilen grafiklerle elde edilen verilerin değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır.

W_m = Şekillendirme nemi (%)

W_{cr} = Kritik Nem (%)

k = Kuruma Hassasiyeti Katsayısı

$$k = (W_m - W_{cr}) / W_{cr} \quad [11]$$

Bu yöntemin tercih edilmesinde etken kurutmada uygun sıcaklık, nem ve süreyi kolayca belirleyerek kurutmada enerji tüketiminin azaltılması, kurutma işlemi sonunda kusurlu tuğlaların azaltılmasını sağlayarak zaman açısından da kazanım sağlamasıdır. [11,12]. Ayrıca nihai sonuçların işletme için yeterli ve işlemin kolay uygulanabilir olması da bu etkenleri arttırmaktadır. Bigot metodu pek çok çalışmaya konu olmuş kuruma hassasiyetinin zamanla ve hammadde içeriğiyle orantılı değişimi gözlemlenmiştir [13,14]. Ancak kiremit sektörünün yoğun olduğu Çorum bölgesinde kullanılan ve çalışmada belirtilen hammaddeler üzerine uygulama yapılmaması bu alanda literatür oluşturması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada killerin yanı sıra killi toprakların alt tabakalarında bulunan ticari olarak kist olarak adlandırılan taşlaşmış kil mineralleri de kullanılmıştır. Kiremit üretiminde kullanılan killerin bileşimlerinden farklılık arz eden kistlerin oksit değerleri özellikle demir ve toprak alkalilerin oranlarında farklılık göstermektedir. Ayrıca killere oranla taşlı veya taşlaşmış yapıya sahip kistler özellikle maliyet açısından avantaj sağladığı ve üretimde kullanıma uygun olduğu için çalışmada yer almaktadır.

II. MALZEME VE YÖNTEM

Ece Kiremit bünyesinde üretimi yapılan kiremitlerin reçetesinde kullanılan hammaddeler üzerinde kurutma, küçülme, tane boyut dağılımı ve sinterleme testleri yapılarak mevcutta kullanılan kiremit reçetesinin kuruma çatlağı problemlerinin azaltılabilmesi için reçete önerileri hazırlanmıştır. Ece Kiremit üretim tesisinde kiremit üretimi için kullanılan 3 farklı yapıda kil ve kiremit kırığı bulunmaktadır. Çorum Bölgesi'nde üretim yapan fabrikada; Gülücek Kili, Gülücek Kisti ve Kınık Kisti kullanılmaktadır. Bu hammaddeler kimyasal analizlerde belirtilen içeriklere sahip olmakla birlikte stokiyometrik olarak hesaplanan bileşimlerde reçete hazırlanarak üretim gerçekleştirilmektedir.

Kiremit üretiminde hammadde olarak gelen kil ve kist öncelikle açıklıkları 1 mm'den başlayıp 250 mikrona kadar azaltılan sıralı valslerden geçirilmektedir. Vals açıklıkları sırasıyla 1mm-750µm-500µm-250µm olarak sıralanmaktadır. Her bir valsın altında seperasyon elekleri bulunmakta ve bu eleklerin üzerinde kalan malzemeler diğer valse aktarılırken kalanlar sistemden otomatik olarak banta inmektedir. Sistemde dağılımları yapılan 3 farklı malzeme belirli yüzde oranlarında karıştırılarak reçete elde edilmektedir.

Bu killer üzerinde Bigot eğrisi çalışmaları yapılmıştır. Bigot eğrilerinin çıkarılması için hammadde içerisindeki nem miktarının bilinmesi gerekmektedir. Hammadedeki nem miktarları farklı numuneler üzerinden karşılaştırılması amacıyla tüm hammaddelerin nemleri aynı orana getirilmiş ve belirli periyotlarla sabit ısı altında ne kadar su kaybettikleri bulunmuştur. Her tartımda tartım kaybı yazılarak bir tablo oluşturulmuş ve buna göre de hangi zaman aralığında ne kadar çok su kaybettiği belirlenmiştir. Bu değer bize killerin su bırakma kapasitesini ve bünye içerisinde su tutma zamanını vermektedir. Bunun belirlenmesindeki amaç beraber kullanılacak olan killerin kuruma hızlarının birbirine yakın olmadığı tespit durumunda, kuru malzemedeki çatlak oluşumlarının partiküllerin su bırakma oranına göre tespit edilmesidir.

Deneyisel çalışmada; her bir kiremit hammaddesinin bağıl su miktarı %18'e sabitlenmiş ve sabit sıcaklık altında (100°C) kuruma hızları ölçülmüştür. Bunun için 5 dakikalık periyotlarda numuneler üzerinden tartım alınmış ve tablolar oluşturulmuştur.

Bigot eğrilerinin bir diğer özelliği de nem değerinin küçülmeye olan etkisini incelemektir. Kil partikülleri bünyesi içerisine aldıkları yoğurma suyunu bırakırken kuru küçülmeye başlarlar. Bu da bünye içerisindeki su moleküllerinin sistemden çıkarak kil partiküllerinin birbirlerine olan mesafelerinin kısalması anlamına gelmektedir. Sabit sıcaklıkta belirli periyotlarda ölçümlenen kuru küçülmeler üzerinden bir tablo oluşturularak eğriler oluşturulmuş böylece aynı zaman dilimi içerisinde farklı küçülme değerlerine sahip olan killer bir arada reçetede kullanıldığında küçülme farklılıklarından dolayı çatlaklar meydana gelebilmektedir.

Deneyisel çalışmalarda; her bir kiremit hammaddesinin nemleri aynı orana getirilerek sabit sıcaklık altında 5 dakikada bir kuru küçülme ölçümleri alınmış ve bu değerler karşılaştırılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda 150x50x20mm boyutlarında kiremit hammaddelerinden yapılan plakalar kullanılmıştır. Bu plakalar eşit miktarda hammadde ve eşit miktarda su ile yoğrulmuş, şekillendirilmiş ve daha sonra deneyisel çalışmalara tabi tutulmuştur.

Ayrıca plakaların şekillendirme öncesinde bünyedeki su çıkışına etkisinin olmaması için tane boyut dağılımlarının da eşit olması için 500 mikron altına elenmiş ve tane boyut dağılımına bakıldıktan sonra şekillendirme işlemi yapılmıştır.

Zamansal olarak da killerin hangi zaman aralıklarında ne kadar küçüldüğü ve ne kadar su kaybettiği deneyisel olarak eğriler ile gösterilmiştir. Hammaddelerin tane boyut dağılımlarına ve reçete çalışmalarında

imalatta kullanılan mevcut reçetenin tane boyut dağılımları tespit edilmiştir. Üretimde kullanılan hammaddelerin faz analizleri X ışını kırınım desenleri (XRD) Rigaku, Rint 2000, Japan X-Işınları Diffraktometresinde (Cu-K α , 2 θ 5-70°, 2 $^\circ$ /dk), kimyasal analizleri Spectro X-Lab 2000 model XRF cihazında yapılmıştır. L*a*b* renk değerleri Konika-Minolta Chroma Meter CR-400 colormetreyle, Tane boyut analizleri Malvern marka zetasizer ile, teorik plastiklik değerleri pfefferkorn plastiklik ölçüm grafiklerinde elde edilen denklemlerle tablo haline getirilmiş ve üretim reçeteleri oluşturulmasında hammaddelerin karakterizasyon sonuçları göz önünde bulundurulmuştur.

III.BULGULAR

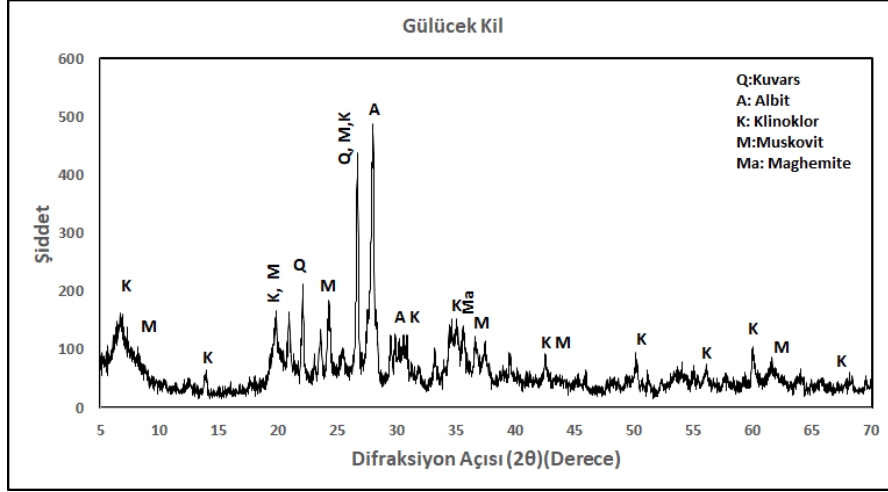
Çalışmada kullanılan hammaddelerin içeriklerinin tespiti amacıyla gerçekleştirilen XRF kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de tüm killer ve imalatta kullanılan reçetede dahil edilerek verilmektedir. Kullanılan hammaddelerin kompozisyonu çalışmada tüm prosesi kontrol etmektedir. Bu nedenle nihai reçeteleri elde etmede içeriğin bilinmesi üretim maliyetlerinden nihai ürün kalitesine, nihai ürün miktarından üretim sorunlarına pek çok üretimsel süreci etkilemektedir.

Tablo 1. Ece Kiremit A.Ş. Kiremit Üretiminde Kullanılan Killerin ve İmalat Reçetesinin Kimyasal Analiz Sonuçları

	Gülücek Kil (%)	Gülücek Kist (%)	Kımk Kist(%)	İmalat (%)
A.Z.	6.955	3.886	8.053	8.167
SiO₂	47.9431	48.7719	52.2527	47.3669
Al₂O₃	15.2538	13.9181	15.556	15.0132
Fe₂O₃	13.3315	14.6176	8.4458	12.8124
TiO₂	2.4338	2.3289	1.1189	2.1957
CaO	6.542	8.3022	5.3478	6.6579
MgO	3.6472	4.2166	4.3822	3.8699
Na₂O	2.2723	2.9077	1.6998	2.3897
K₂O	1.0912	0.5791	2.7043	1.0658
Cr₂O₃	0.046	0	0.0425	0
MnO	0.2037	0.2053	0.0938	0.1678
SO₃	0.0316	0	0.1042	0.0607
P₂O₅	0.249	0.2666	0.199	0.2329

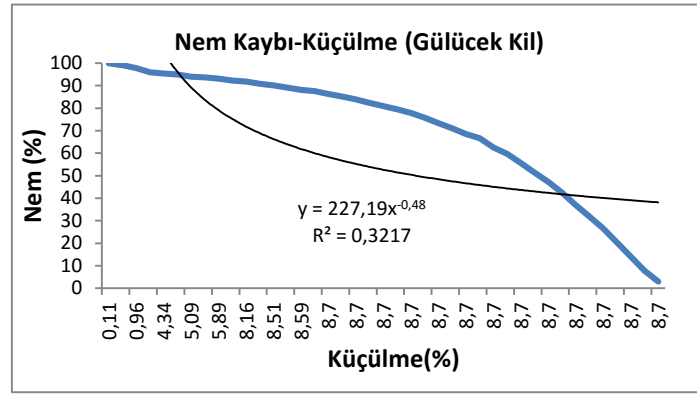
Killerin içerdiği minerallere göre kullanılan kilin özellikleri ve kiremit üretiminde etkileri de değişmektedir. Bu nedenle yapılan XRD analizleri doğrultusunda çalışmada yer alan Gülücek kili Şekil 1'de görüldüğü üzere incelenmiştir. Mineralojik olarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda bu kil; yüksek miktarda kuvars, albit, muskovit, maghemite ve klinoklor içeren mika tipi kil grubudur.

Potasyumlu feldspatik yapıların ayrışmasıyla meydana gelen levha şeklinde tabakalara sahip olması su tutma özelliğine işaret etmektedir. Yapıda yer alan klinoklor Tablo 1'de verilen kimyasal analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere Mg ve Fe açısından zengindir. Bu yapılar 950-970°C'lerde sinterlemeye olanak sunmakta ve ayrıca kırmızı pişme rengine sahip ürün eldesi sağlamaktadır.

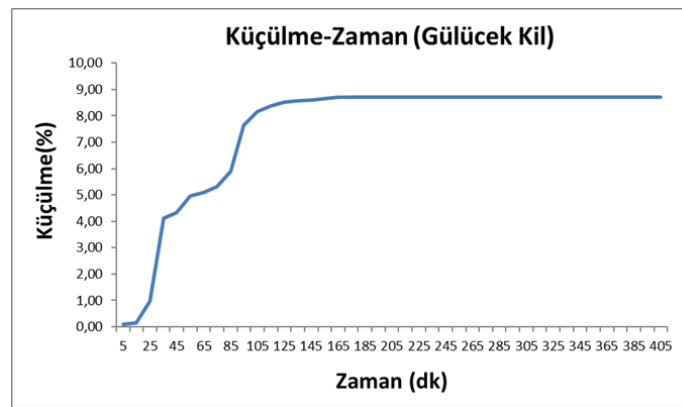


Şekil 1. Gülücek Kiline ait X ışınları desenleri

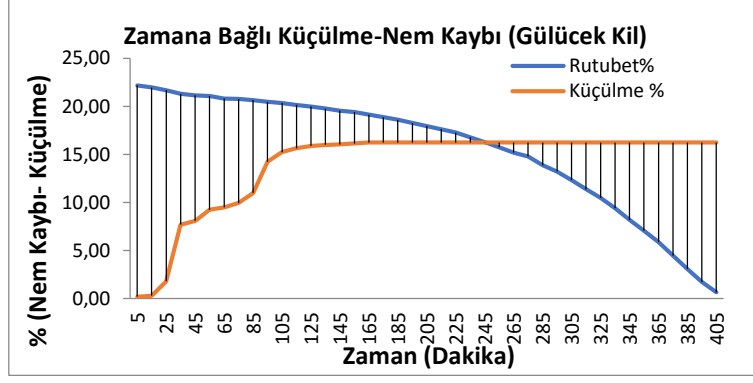
Çalışmada kullanılan Gülücek Kili, Gülücek Kisti ve Kınık Kisti'ne ait küçülme ve nem değerleri ve bunların zamana bağlı değişimleri gözlemlenmiştir. Elde edilen değerler şekil 2'den şekil 22'ye kadar grafiklendirilmiş ve tablo 2'den tablo 11'e kadar kategorize edilerek işletme şartlarında kullanılan farklı hammaddelerde küçülme, zaman ve nem faktörlerinin birbiriyle bağlantıları bu veriler doğrultusunda ortaya konmaktadır.



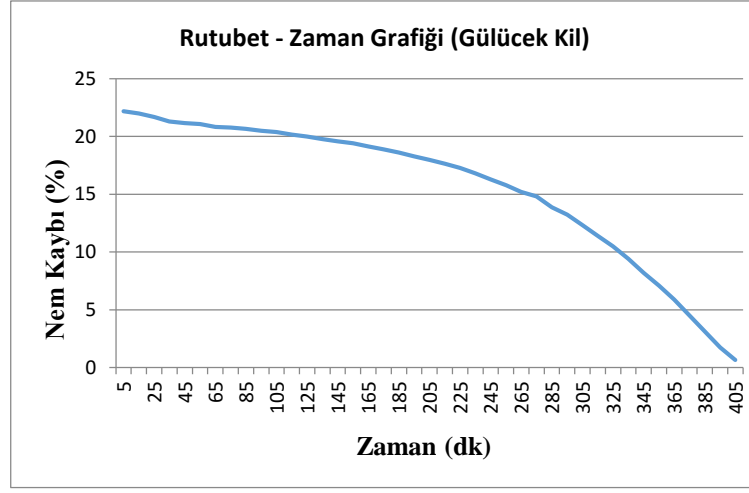
Şekil 2. Gülücek Kili Bigot Eğrisi



Şekil 3. Gülücek Kili Küçülme Zaman Grafiği



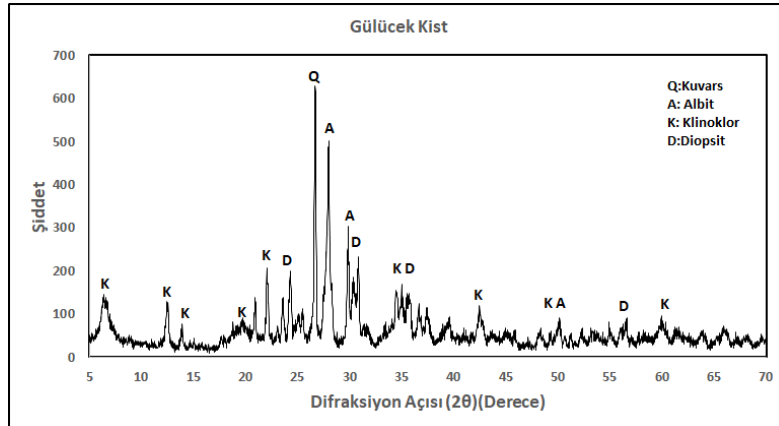
Şekil 4. Gülücek Kili Zamana Bağlı Küçülme ve Nem Kaybı Eğrisi



Şekil 5. Gülücek Kili Nem Kaybı– Zaman Grafiği

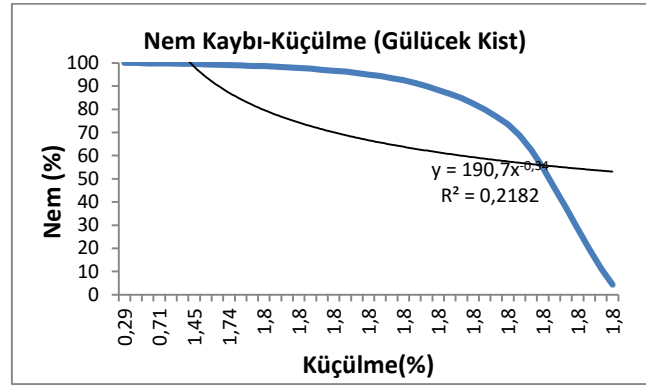
Gülücek Kili'ne ait veriler incelendiğinde kilin bigot eğrisinin ilk su kaybının olduğu nokta dışında lineer bir şekilde ilerlediği ve %0.11'le başlayan küçülme değerlerinin azalan bölümde %4.34'ten %8.7'ye kadar küçülmenin devam ettiği ancak bu aşamadan sonra lineer olarak kaybedilen neme rağmen küçülme değerlerinin sabitlendiği görülmektedir. Küçülme zaman grafiklerinde ise ilk 105 dk dan sonra değerlerin stabil hale geldiği tespit edilmektedir. Nemin lineer olarak düşüşü ve bigot eğrisinin sabitlenmeye başlaması kurutmada sorun çıkarmayacağını ancak ilk nem kaybının olduğu aşamalarda küçülme oranı yüksek olması itibarıyla de kontrollü kurutulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Zamana bağlı küçülme ve nem kaybı eğrisinde ilk 245 dk'da dengeye ulaşması da bu verileri desteklemektedir [15].

Şekil 6'da Gülücek Kisti'ne ait mineralojik veriler incelendiğinde bu kil; yüksek miktarda kuvars, albit, diopsit ve klinoklor içeren bir kil olduğu görülmektedir.

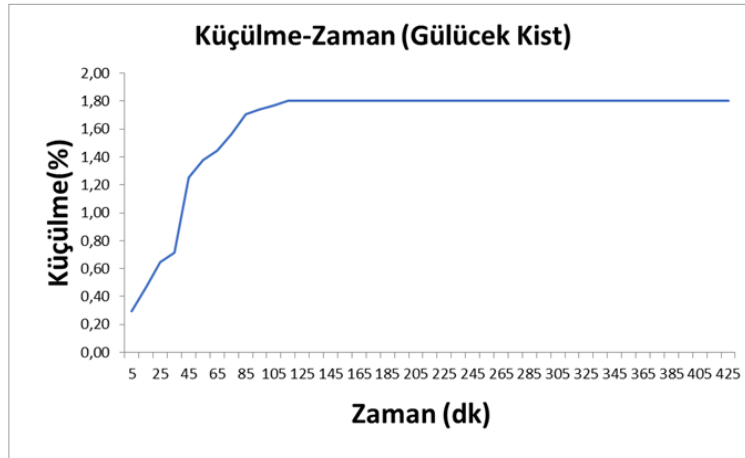


Şekil 6. Gülücek Kistine ait X ışınları desenleri

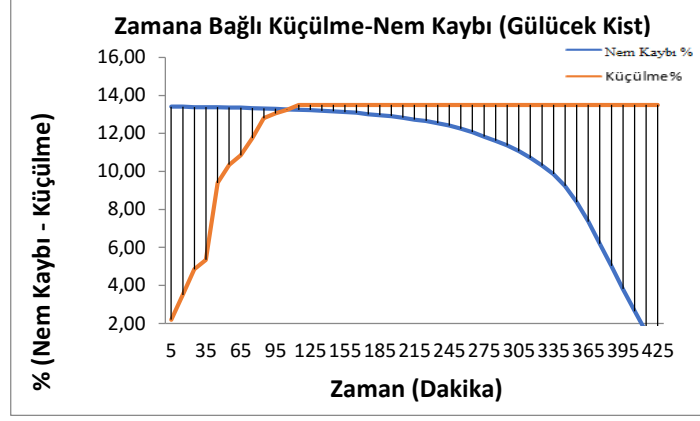
Gülücek kist hammaddesi Gülücek kili ile benzerlik göstermekte ancak demir oranı gülücek kilinde ~%13.3 iken Gülücek kistinde bu oran ~14.6 değerinde olduğu görülmekte bu da yapıda daha kırmızı bir pişme rengi elde edilmesine neden olmaktadır. Ancak Fe oranında olduğu gibi CaO oranının da yüksek olması sarılık b* değerlerini de etkilemektedir. Tablo 2’de verilen %1.8’lik küçülme değeri diğer killere oranla çok düşüktür. Zamana bağlı küçülme değerleri incelendiğinde Gülücek kilinde 245dk olan sürenin Gülücek kistinde 105 dk olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca nem kaybı zaman grafikleri incelendiğinde Gülücek kilinde 405 dk.’da ~%20’ye ulaşan %nem değerinin Gülücek kistinde 425 dk.’da ~%12 nem olacak şekilde değiştiği görülmektedir. Tablo 3’te de görüldüğü üzere teorik plastisite değerleri diğer hammaddelerin 1/3 oranındadır ve reçete içerisindeki sert hammaddelerden olduğu görülmektedir. Şekil 6’da verilen faz içerikleri incelendiğinde klorit ve demir yüksekliğinden kaynaklı klinoklor değerinin fazlalığı ve buna bağlı olarak düşük su tutma kabiliyetine sahip bir kil olduğu tespit edilmiştir. Mineralojik olarak yapıda içerdiği diopsit; Ca ve Mg silikattan oluşmakta bu da kiremit üretiminde en büyük problemlerden biri olan kireç oluşumunu tetikleyen bir mekanizmaya sahip olduğunu ortaya koymaktadır [16].



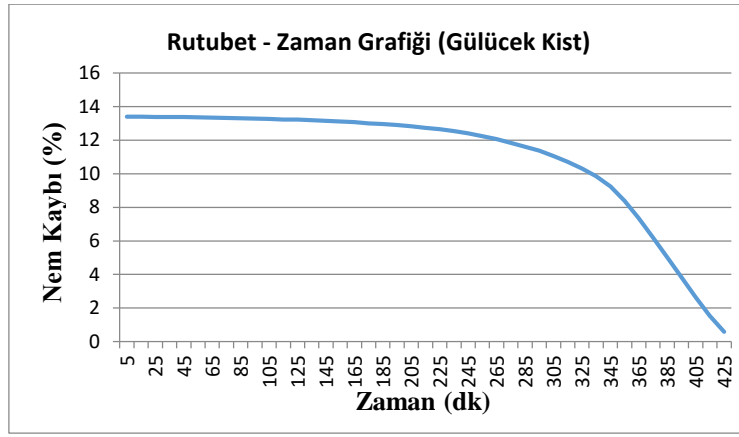
Şekil 7. Gülücek Kisti Bigot Eğrisi



Şekil 8. Gülücek Kisti Küçülme Zaman Grafiği

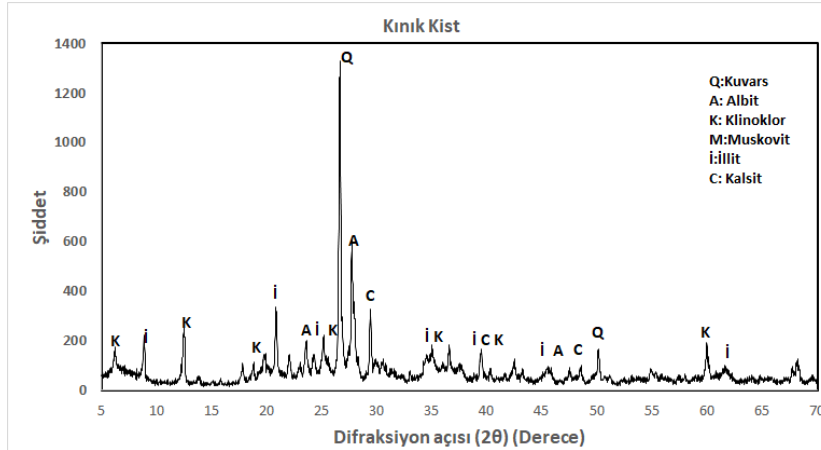


Şekil 9. Gülücek Kisti Zamana Bağlı Küçülme ve Nem Kaybı Eğrisi



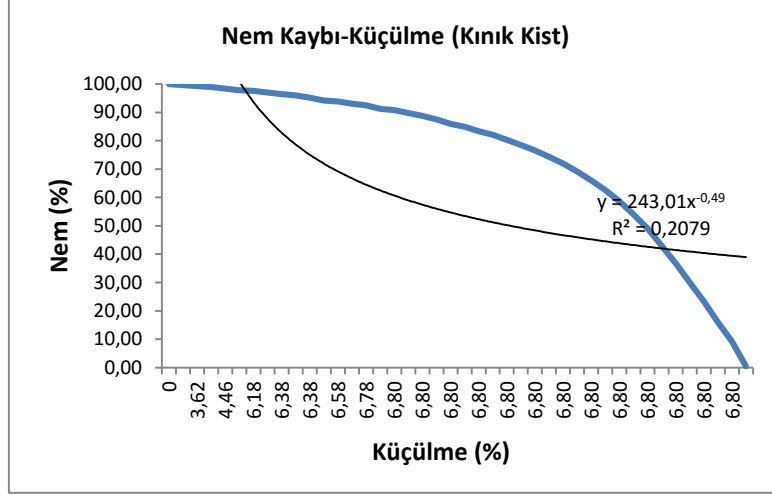
Şekil 10. Gülücek Kisti Nem Kaybı - Zaman Grafiği

Reçetede kullanılan bir diğer hammadde ise Kıvık Kistidir. Kıvık hammaddesi kiremit killерinde yaygın olarak gözlemlenen klinoklor mineralini içermektedir. Ayrıca yapısında illitik yapıda kil barındırması kiremitin şekillendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu yapı bünyede su tutma kabiliyeti ile alınan higroskopik suyun uzun süre atılmamasını sağlamaktadır. Tablo 1’de verilen kimyasal analiz sonuçlarından görüldüğü üzere Fe oranı ~%8.5 değeri ile kırmızı pişme rengi diğer killere oranla daha düşüktür. Ancak CaO oranının diğer killere oranla daha düşük olması reçete içerisinde kullanımında kireç oluşumunun azalmasını sağlamaktadır. Şekil 11’de verilen mineralojik analizde kıvık kistin yapıda kuvars, albit, klinoklor, muskovit, illit ve kalsit minerallerini içerdiğini göstermektedir. Bu malzemede kalsitin fazla olması ve tablo 1’de verildiği üzere ateş zayıyatı miktarının yüksek olması yapıda demirin yüksek olmasına rağmen diğer minerallerin yapının pişme sonrası rengini etkilediğini göstermektedir.

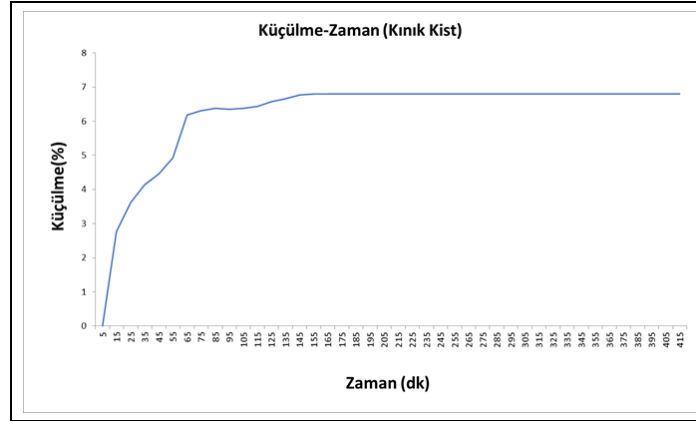


Şekil 11. Kıvık Kistine ait X ışınları desenleri

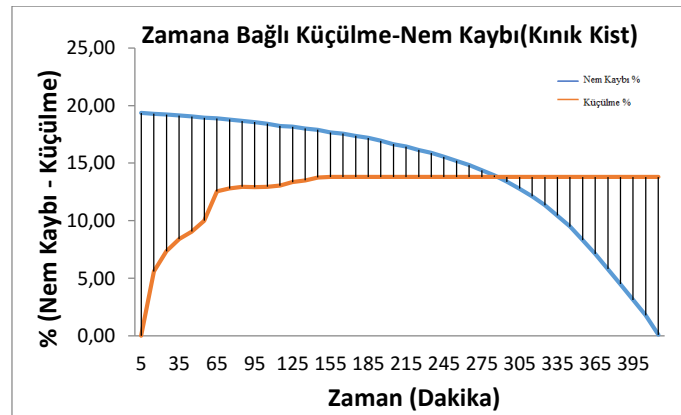
Bigot eğrisi incelendiğinde lineer bir akış sergilediği görülen Kınık kisti küçülme zaman grafikleri incelendiğinde ilk 65 dk. bünyedeki küçülmenin hızlı bir şekilde gerçekleşirken 65-145 dk arasında daha yavaş bir küçülme meydana geldiği ve bu aşamadan sonra dengeye ulaştığı gözlemlenmektedir. Zamana bağlı nem kaybı grafikleri incelendiğinde ise kullanılan hammaddeler arasında ~295 dk.'lık uzun bir süreden sonra dengeye ulaştığı görülmektedir. Nem kaybının ~%20'lere kadar ulaşması bünyede su tutma kabiliyeti yüksek bir kil olarak görev yaptığını göstermektedir. Kritik noktadan sonra malzeme su kaybını tamamlayarak küçülme işleminin son bulduğu grafiklerden gözlemlenmektedir [17].



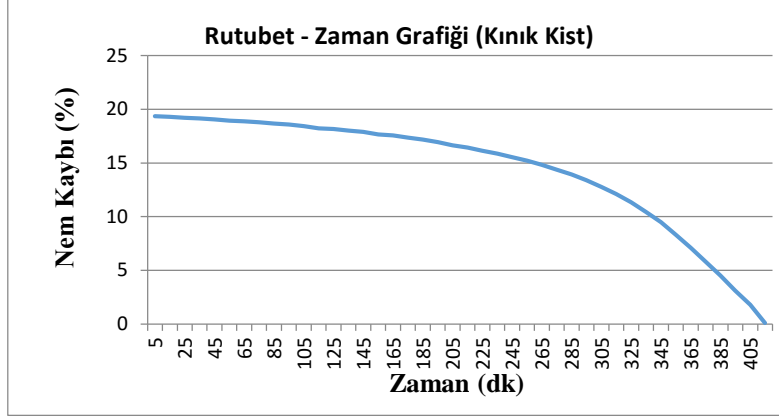
Şekil 12. Kınık Kisti Bigot Eğrisi



Şekil 13. Kınık Kisti Küçülme Zaman Grafiği



Şekil 14. Kınık Kisti Zamana Bağlı Küçülme ve Nem Kaybı Eğrisi



Şekil 15. Kınık Kisti Nem Kaybı – Zaman Grafiği

Yapılan laboratuvar çaplı analizlerde kuru küçülme, pişme küçülmesi (toplam küçülme) ve ateş yayıatı verileri analiz edilmiş ve Tablo 2’de elde edilen değerlerde gösterilmiştir. Reçete içerisinde kullanılan hammaddelerin nem oranlarını atabilme yeteneklerinin yakın düzeylerde olması gerekmektedir. Buna bağlı olarak küçülme oranlarının da birbirine yakın olması reçete içerisindeki kullanım oranlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Tablo 2. Kiremit Hammaddelerinin Fiziksel Özellikleri

	Kuru Küçülme (%)	Toplam Küçülme (%)	A.Z. (%)
Gülücek Kil	8.7	9.8	6.72
Gülücek Kist	1.8	2	4.22
Kınık Kist	6.8	7.6	6.96
İmalat	6.7	7.5	7.63

Deneyel çalışmalarda her bir hammadde şekillendirilerek küçülme ve nem kaybı değerleri incelenmiştir. Ayrıca her ölçüm belirli bir zaman aralığında yapılmıştır. Nem Kaybı- küçülme eğrisi (Bigot Eğrisi) karşılaştırmalarındaki verilerin yanı sıra pfefferkorn plastiklik eğrilerinin regresyon çizgisindeki formül ile teorik plastisite değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Teorik Plastisite Değerleri

	Teorik Plastisite
Gülücek Kil	299.69
Gülücek Kist	91.86
Kınık Kist	293.56
İmalat	239.4

Hammaddelerin teorik plastisite sonuçlarına bakıldığında. Vakum pres (ekstrüzyon) yöntemi ile şekillendirilen bu tip killerin plastiklik değerlerinin yüksek olması beklenmektedir. Ancak Gülücek Kistin plastikliğinin az olması diğer hammaddelere göre bünye içerisinde sert hammadde gibi davranmasına sebep olmaktadır. Bu değişim yaş bünyenin içerisine aldığı su miktarının diğer hammaddelerle kıyaslandığında daha düşük olmasıyla açıklanmakta ve kuruma hassasiyeti diğer hammaddelerle farklılık göstermektedir [18].

Kiremit hammaddeleri ve imalat reçetesi tane boyut dağılımları Tablo 4’te verilmiştir. Hammaddelerin tane boyut dağılımlarına bakıldığında. 300 mikron altı tanelerin oranının %72-77 (Gülücek Kist: %74.37, Gülücek Kil: 71.82, Kınık Kist: 76.45) oranları arasında olduğu görülmüştür. Tane boyut dağılımının 300 ile 45 mikron aralığında hammaddelerde yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Reçetede yüksek miktarda kullanılan Gülücek Kilinin 32 mikron altı ince taneli partikül oranının %23.03 olduğu ve genel anlamda bu oranlarda hammaddelerin kullanımında paketlenme sorunu yaratmayacağı düşünülmektedir.

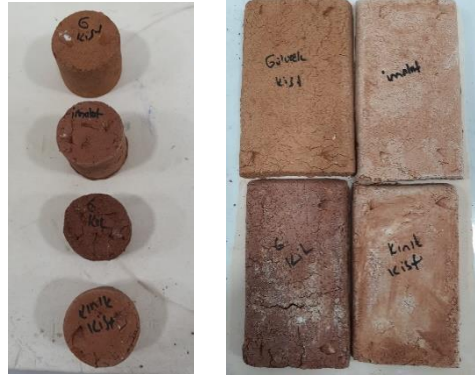
Tablo 4. Hammaddelerin ve İmalat Reçetesinin Tane Boyut Dağılımı (Kümülatif)

ELEK (mikron)	Gülücek Kist (%)	Gülücek Kil (%)	Kınık Kist (%)	İmalat (%)
710	7.08	3.27	8.85	7.82
500	11.97	9.22	14.28	13.02
300	25.63	28.18	23.55	21.49
150	41.08	32.2	35.7	35.11
125	44.07	48.41	38.97	38.28
63	56.62	57	51.58	53.13
45	61.1	62.84	59.18	59.76
32	65.55	76.97	63.81	64.65

Ece Kiremit bünyesinde kullanılan imalat reçetesi yukarıda belirtilen killer ve imalattan elde edilen kırıklarda çok düşük yüzdelere reçeteye dahil edilmesiyle hazırlanmıştır. Mevcut reçetede kullanılan hammaddelerin dağılımları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. İmalat Reçetesi Hammaddelerinin Oranları

Hammaddeler	Oran (%)
Gülücek Kili	57.71
Gülücek Kisti	19.47
Kınık Kisti	19.10
Kiremit Kırığı	3.72



Şekil 16. Kiremit Üretiminde Kullanılan Hammaddelerin ve bünyenin pişmiş örnekleri

Şekil 16'da verilen görselde imalat reçetesi ve kullanılan killerin şekillendirilmiş işletme şartlarında sinterlenmiş örnekleri yer almaktadır. Elde edilen örneklerin renk ölçümleri yapılmıştır. Renk ölçüm sonuçları tablo 6,7 ve 8'de verilmektedir. Kiremit hammaddelerinin karışım oranları değiştirilerek yapılması planlanan yeni reçetelerin renk değerlerinin imalat reçetesindeki renk değerlerine yakın değerlerde olması ve kiremit pişme renginin bozulmaması sağlanmalıdır. Bu nedenle hazırlanan reçetelerde bu analiz sonuçları göz önüne alınmıştır. Renk ölçümlerinde ΔE hesaplaması yapılabilmesi için referans olacak bir pişmiş kiremit numunesi gereklidir. Çalışmada pişmiş kiremit numunesi referansı için imalat reçetesi kullanılmıştır. Malzemenin değerleri üzerinden ΔE hesaplaması tabloda verilmiştir. Elde edilen verilerden a*kırmızılık değeri en yüksek olan kınık kisti hammaddesinin ΔE değerlerinin diğer hammaddelere göre düşük olduğu ve renk değerlerinin yapıda yer alan minerallerden kaynaklandığı ve bu minerallerin mikroyapıda meydana gelen değişimler hakkında yol gösterici olabileceği öngörülmektedir. Yapıda demir kırmızı rengine neden olurken kalsit içeriklerinin yapıda sarı rengi arttıracığı ve diğer safsızlıklarında yapıda mavilik b* (-) yönde değişime neden olduğu tablolarda görülmektedir [19].

Tablo 6. İmalat ve hammaddelerin renk değerleri

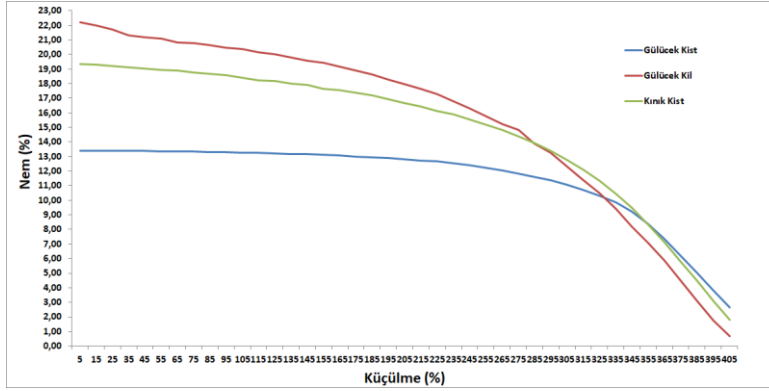
	Gülücek Kil	Gülücek Kist	Kınık Kist	İmalat
L	37.84	51.12	48.51	45.83
a*	17.54	17.73	19.25	18.85
b*	20.29	29.81	24.86	24.06
ΔE	8.931355	7.893098	2.825314	

Renk ölçümlerinde L (Lightness Brightness) Açıklık Koyuluk. a* Kırmızılık-Yeşillik ve b* değeri ise Mavilik-Sarılık değerlerini vermektedir. Tablo aşağıdaki gibidir.

Tablo 7. Renk ölçümlerinde L a* b* sembollerinin karşılığı

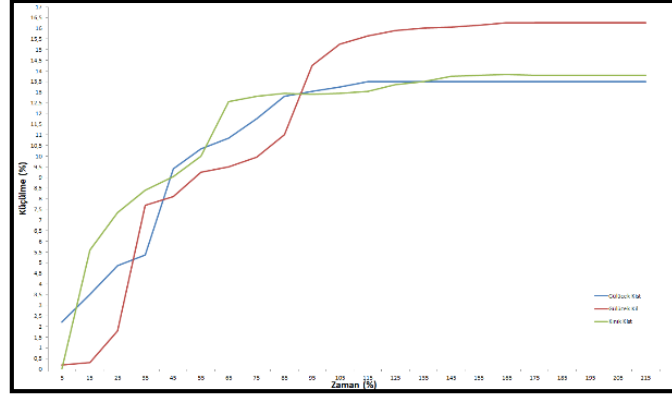
	-	+
L	Siyahlık artar	Beyazlık artar
a*	Yeşillik artar	Kırmızılık artar
b*	Mavilik artar	Sarılık artar

Kiremit üretiminde doğal kurutma ile kurutulan kiremitlerde kullanılan hammaddelerin farklı kuruma zamanlarında olmasından ve farklı kuru küçülme değerleri göstermesinden dolayı çatlak oluşumları meydana geldiği belirlenmiş ve yapılan analizler çatlakların nasıl oluşabileceğini açıklamak için yapılmıştır. Yapılan hammadde analizlerinin sonuçlarını birlikte değerlendirmek için veriler tek bir tabloda grafiklendirilmiştir. Sonuçta Şekil 17, 18 ve 19’de verilen grafikler elde edilmiştir. Verilerin birbiri ile kıyaslanması açısından önceki aşamalarda elde edilen sonuçlar tek bir grafikte toplanarak tek tek incelemenin yanı sıra kümülatif değerlendirme imkânı elde edilmiştir.



Şekil 17. Bigot Eğrisi

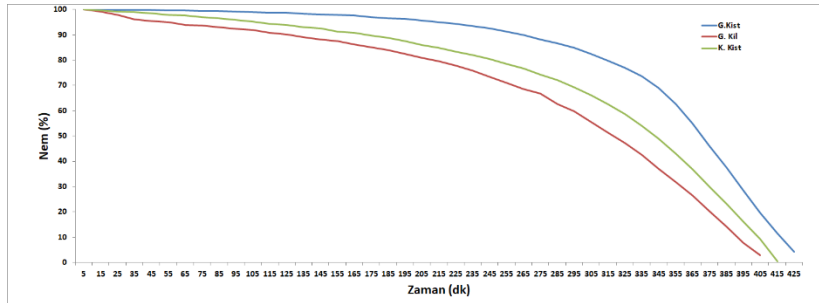
Hammaddelerin küçülme–nem kaybı eğrilerine bakıldığında laboratuvarında yapılan deneysel sonuçlara göre Gülücek Kisti 105 dakikada, Gülücek Kili 245 dakikada ve Kınık Kisti 265 dakikada küçülme – nem kaybı eğrilerinin çakıştığı görülmüştür. Bu çakışma küçülmenin bitmiş olduğunu fakat maksimum küçülme değerine ulaştıktan sonra bünyenin su bıraktığını göstermektedir. Gülücek Kistindeki çakışmada maksimum küçülmeye neminin yalnızca %1.04’ünü bırakarak geldiği görülmektedir. Bu aşamadan sonra nem 315 dakikada bünyeden çıkmaktadır. Aynı şekilde hemen hemen yakın zamanlarda küçülme – nem kaybı eğrilerinin çakıştığı gözlemlenen Kınık Kisti ve Gülücek Kilinde maksimum küçülmelerini tamamladıklarında Gülücek kilinde %13.69, Kınık Kistinde ise %8.73 oranında nem atabilmişlerdir.



Şekil 18. Küçülme Zaman Grafiği

Kuru küçülme değerlerine bakıldığında Gülücek Kilinin % 8.7 küçüldüğü, Kınık Kistin % 6.8 küçüldüğü ve Gülücek Kistin % 1.8 oranında küçüldüğü görülmüştür. Yukarıdaki veriler ile karşılaştırıldığında, yalnızca bu analiz için, yakın küçülme değerlerine sahip olan Gülücek Kili ve Kınık Kistin imalat reçetesi içerisinde küçülme ve nem atabilme yeteneklerinin birbirine yakın olduğu ve yalnızca iki hammaddeden yapılabilecek reçetede çatlak riskinin mevcut imalat reçetesine göre daha az olduğu tespiti yapılmıştır. Fakat Gülücek Kistin su bırakma özelliği ve küçülme değerinin de diğer hammaddelere göre az olmasından dolayı bünye içerisinde çatlak oluşumunu tetikleyebilecek hammadde olduğu söylenebilmektedir.

Şekil 19'da verilen karşılaştırmalı Nem – zaman eğrisinde görüldüğü gibi, tüm hammaddelerin eşdeğer zamanda nem atabilme yetenekleri farklıdır. 3 hammaddenin de nem atabilme yeteneklerinin farklı olması çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Gülücek Kistin su bırakma yeteneğinin zayıf olması uzun zaman aralıklarında suyunu atmasından dolayı ve küçülme grafiklerinde de diğer hammaddelere göre daha az küçülmesi, bünye içerisinde daha fazla su kalmasına sebep olmakta ve kuruma çatlaklarına sebep olmaktadır.



Şekil 19. Zamana Bağlı Nem Kaybı Eğrisi

Hammadde çalışmalarından alınan sonuçlara göre 4 farklı kiremit reçetesi yapılmıştır. Bu reçetelerde; Gülücek Kisti'nin kuruma eğrilerine bakıldığında kuruma eğrisinin diğer hammaddelere göre daha geç olduğunun ve reçete içerisindeki oranının da kuruma çatlaklarına sebebiyet verebileceği düşünülerek reçetelerdeki oranları düşürülmüştür.

IV.SONUÇLAR

Hammaddeler üzerine yapılan analizlerden elde edilen verilerden yola çıkılarak Tablo 7'de verilen reçete çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında hammaddelere uygulandığı üzere reçetelerin bigot eğrileri ve diğer parametreleri ölçülerek karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 8. Deneme Reçeteleri

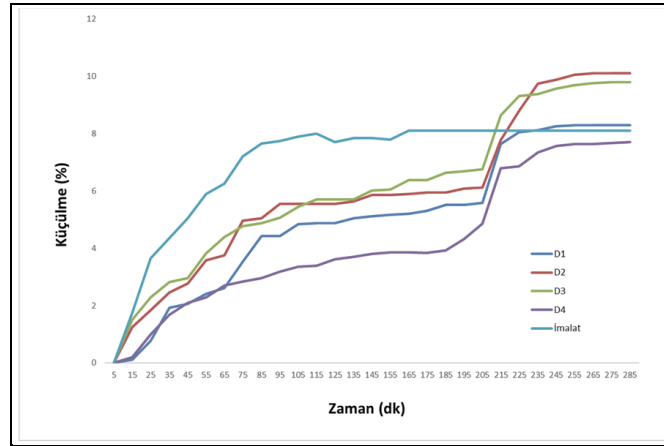
	Mevcut İmalat (%)	D1 (%)	D2 (%)	D3 (%)	D4 (%)
Gülücek Kil	57.71	58	62.5	67	58
Gülücek Kist	19.47	12.5	9.5	9.5	10
Kınık Kist	19.10	26	24.5	20	28.5
Kiremit Kırığı	3.72	3.5	3.5	3.5	3.5
Toplam	100	100	100	100	100

Gülücek Kisti yapılan deneysel çalışmalardan sonra bünyesinde tuttuğu nemini diğer hammaddelere göre daha çabuk atması, kuru küçülme değerinin diğer hammaddelere göre daha düşük olmasından kaynaklı olarak neminin yalnızca %1.04'ünü bırakarak maksimum küçülmeye geldiği gözlemlenmiş ve reçete denemeleri bu parametreler dikkate alınarak yapılmıştır. Yalnız Gülücek Kisti'nin Fe₂O₃ oranı diğer hammaddelere göre daha fazla olduğundan kiremitlerin kırmızılık değerlerinin değişebileceği öngörülmüştür.

Tablo 9. Denemeler Sonucunda Kiremitlerin ve Hammaddelerin Renk ve Ateş Zayıyatı Sonuçları

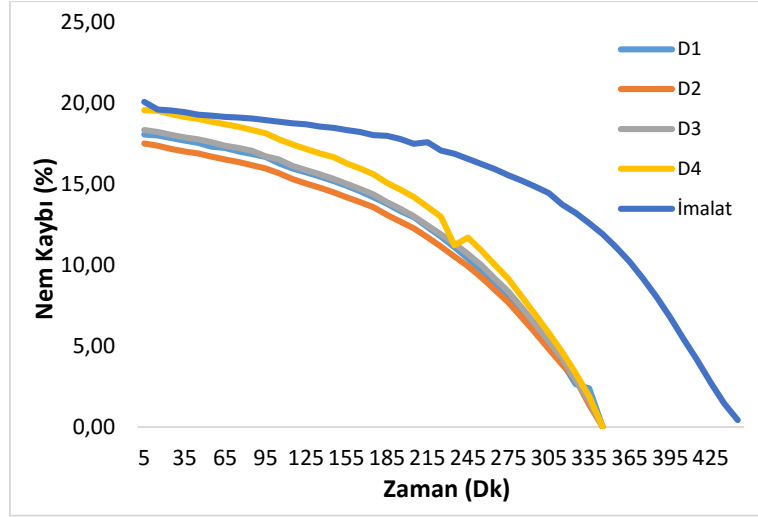
	Gülücek Kist	Gülücek Kil	Kinik Kist	İmalat	D1	D2	D3	D4
LOI	4.11	6.5	6.13	6.09	6.12	6.22	6.27	6.34
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
L	51.12	37.84	48.51	45.83	47.9	48.53	45.85	47.54
a*	17.73	17.54	19.25	18.85	15.98	16.69	16.6	17.25
b*	29.81	20.29	24.86	24.06	19.47	20.8	21.44	23.19
ΔE	7.893098	8.931355	2.825314	Referans	5.795679	4.752178	3.453592	2.498199

Deneysel çalışmalar bilgi, tasarım ve ayrıca üretim yöntemlerinin de gizliliği açısından herhangi bir kalıp veya kiremit numunesinin pişmiş veya şekillendirilmiş halleri kullanılmadan laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup referans örneğe en yakın değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Yapıda yer alan demir yoğunluğu yüksek olduğu için yapıda su tutma kabiliyetini etkilediğini ve aynı zamanda a* (kırmızılık) değerlerinin ise en iyi sonuç alınan D2 ve D3 reçetelerinde birbirine yakın olduğu diğer çalışmalarda farklı sonuçlar oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 20. Reçetelerin Küçülme – Zaman Grafiği

Hammadde denemelerinde kuru küçülmenin en düşük olduğu Gülücek Kistin'in %1.8 kuru küçülmesinin olduğu görülmüştür. Yapılan denemelerde Gülücek Kistin'in kuru küçülmesinin az olmasının reçete içerisindeki hammaddelerin küçülmelerinde dengesizlik yarattığı, kuru küçülme devam ederken malzemenin homojen olarak nemi atmadığından da kritik bölgelerde kuruma çatlakları olabileceği tespit edilmiştir. Reçetede oranları düşürülerek denemeler yapılmıştır. Gülücek Kistin'in reçetede oranının düşürülmesi kuru küçülmeyi arttırmaması beklenmiştir. Deneme 2 ve 3'te bu oranın yüksek olduğu görülmüştür.

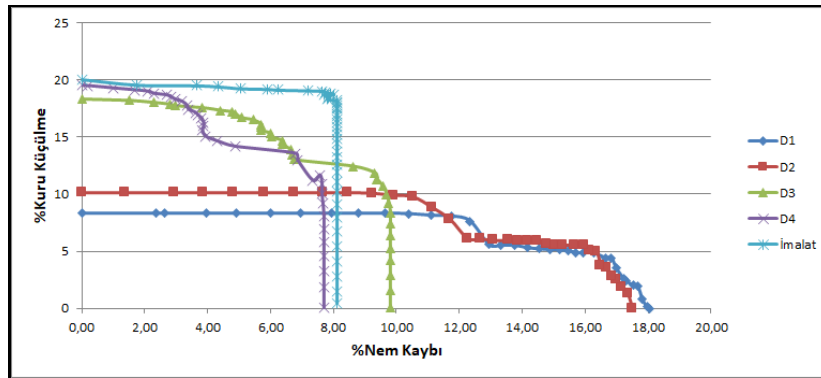


Şekil 21. Reçetelerin Nem Kaybı – Zaman Karşılaştırma Grafiği

Nem kaybı – Zaman grafiklerine bakıldığında, 100 °C’de yapılan kurutma çalışmalarında Gülücek Kistinın reçetelerdeki oranının azaldığında kiremitlerin daha çabuk kuruduğu. Gülücek Kistinın içerisinde su tuttuğunu göstermektedir. Killere göre kistlerin şekillendirme zorluğu ve içerisine aldığı nemi yapısında bulunan klorit ve klinoklardan ötürü bırakamaması kurutma süresinin de uzamasına etkindir. Özellikle klorit gibi ClO_2^- gibi bir yapıda olmasından ötürü sistemde su ile girdiği reaksiyonda kireç oluşumunu tetiklediği ve şişerek suyu bırakmadığı teorik olarak açıklanabilmektedir [6]. Reçetelerde Fe_2O_3 oranının fazla olduğu Gülücek Kistinın tamamen çıktığında a^* değerinin düşeceği bilindiği için reçetede oranı %50 azaltılmıştır. Hammaddelerin nem atabilme yetenekleri birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu hammaddelerin iki tipi kist biri de kildir. Killerin nemini atarken plastiklikleri yüksek olduğundan homojen nem atabilme ve tabakaları arasından suyu rahat bırakabilme özelliklerinden dolayı reçete denemelerinde kil oranı artırılarak yapılan Deneme 2 ve 3 reçetelerinde daha iyi ve üretimde kuruma çatlaklarının daha az olacağı görülmüştür.

İmalat reçetesinin zamana bağlı küçülme grafiğinde kısa zaman içerisinde küçülmesinin bittiği, nem kaybı grafiği ile karşılaştırıldığında ise küçülme maksimuma geldiğinde nemini atmaya devam ettiği görülmüştür. Bu sonuçlar göz önünde bulundurularak Gülücek Kistinın mineralojik özelliklerinden kaynaklı olarak bu duruma sebebiyet verdiği düşünülmüş ve reçetede kullanım oranı azaltıldığında kuru küçülmenin daha uzun zaman diliminde olmasının üretimde de kuruma çatlaklarını kesilebileceğini göstermektedir.

Şekil 22’de tüm reçeteler için kuru küçülme ve nem kaybının birlikte verildiği grafik incelendiğinde üretimde Deneme 3 ve 4’ün denenebileceği. Mevcut reçetelerden verim alınmadığı takdirde Deneme 2’nin de üretimde uygulanabileceği öngörülmektedir.



Şekil 22. Reçetelerin Kuru küçülme –Nem Kaybı Grafiği

Tablo 10’da yer alan teorik plastisite değerlerinin de pfefferkorn plastiklik testi eğrilerden hesaplanması yapılmıştır. Bu kapsamda teorik plastisitenin reçetede Gülücek Kisti oranının azalması ile arttığı görülmüştür. Plastiklik oranının artmasının üretimde şekillendirme ve kurutma aşamalarında kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.

Tablo 10. Reçetelerin Teorik Plastisite Değeri

	Teorik Plastisite
D1	319.52
D2	325.94
D3	319.26
D4	317.93
İmalat	239.4

Tablo 11. Yapılan Deneme Reçetelerinin Elek Analizleri

	D1	D2	D3	D4	İmalat
710	9.88	9.26	9.62	10	7.82
500	15.91	14.87	15.71	17.18	13.02
300	24.77	24.23	23.6	26.04	21.49
150	37.39	37.68	35.01	38.16	35.11
125	40.48	41.06	37.56	40.91	38.28
63	55.08	55.51	51.4	54.79	53.13
45	60.86	60.98	57.62	59.8	59.76
32	65.53	65.92	62.94	65.28	64.65

Tablo 11’de tane boyut analizleri incelendiğinde imalat reçetesinde 300 mikron altı tanelerin %73-78 arasında olduğu (D1: %75.23- D2: %75.77- D3: %76.4- D4: %73.96 ve imalat: %78.51) tespit edilmiştir. Tane boyu malzemenin bünyesindeki suyu sıcaklıkla dışarı verebilme kabiliyetini ve aynı zamanda küçülme değerlerinde etkili olduğu üzere incelemeler tablo 10’da verilmiştir. D3 ve D4 reçetelerinde değerlerin imalata yakın olduğu 300 ile 45 mikron aralığında tane partikül oranı açısından D2 -D3 ve D4 reçetelerinin ince tane boyut dağılımına sahip olduğu ve kurumaya neden olan kireç oluşumunun öğütme ile yapı içinde dağılmasına ve daha az sorun oluşturmasına neden olduğu öngörülerek bu açıdan avantaj oluşturacağı düşünülmektedir.

Kiremit üretiminde temel hammadde killer olduğu ve her geçen gün artan yeni hammadde arayışları doğrultusunda içerik olarak daha kompleks ancak maliyeti düşük kil ve türevi malzemelerin araştırılmasının önem kazandığı görülmektedir. Elde edilen veriler doğrultusunda malzemelerin kimyasal mineralojik ve fiziksel değişimlerinin birlikte değerlendirildiğinde çalışmada gözlemlendiği üzere rengin oluşumundan küçülmeye, nem miktarından kurumaya pek çok faktörün nihai ürün eldesini etkilediği sonucu elde edilmektedir [20]. Bu sonuçların literatürde bölge hammaddeleri için yol gösterici olacağı ve bu alanda pek çok işletmenin olduğu bölge kiremit sektörüne verileri ve sorunları değerlendirmede yardımcı olacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Ece Banyo Ar-Ge Merkezine çalışmada verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Bacıoğlu. A. & Bacıoğlu. S. (2013). *Tuğla ve Kiremit /Üretim-Yatırım-İşletme*. Yaman Ofset.
- [2] İşlek. A. (2010). *Bayburt ilinin bazı endüstriyel hammaddelerinin karakterizasyonu ve tuğla-kiremit üretiminde kullanılabilirliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [3] Işık. İ. (2010). *Tuğla ve Kiremit Üretim Teknolojisi Ders Notları*. Yayınlanmamış. Kütahya.
- [4] Daday. M. & Kara. A. (2017). Development of using local raw materials deposits in Eskisehir region. Turkey. *J. Aust Ceram Soc* 53, 591–597.
- [5] Demirbilek F. (2007). *Kaolinitik ve illitik seramik killerinin farklı sıcaklıklarda mineralojik yapılarının plastikliklerinin ve fiziksel özelliklerinin değişimi*. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [6] Uz. V. (2004). *İnorganik. Organik ve biyolojik bazlı ilavelerin killerin seramik özellikleri üzerine etkisi*. Doktora Tezi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [7] SERSA. (2021). Seramik Sağlık Gereçlerinde Kurutma.
- [8] Madan. E. (2014). *Seramik fırınlarında atık baca gazından enerji geri kazanımı ve bir uygulama*. Yüksek Lisans Tezi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı. Bilecik.
- [9] Oummadi. S., Nait-Ali. B., Alzina. A., Paya. M.C., Gaillard. J.M., Smith. D.S., (2020). *Optical method for evaluation of shrinkage in two dimensions during drying*

- of ceramic green bodies. *Open Ceramics*, 2.
- [10] Aungatichart. P. & Wada S. (2009). *Correlation between Bigot and Ratzenberger drying sensitivity indices of red clay from Ratchaburi province (Thailand)*. *Applied Clay Science* 43, 182–185.
- [11] Daday. M. (2015). *Ekstrüzyon ile hızlı pişirim terracotta dış cephe kaplaması üretiminde süreç parametrelerinin araştırılması* Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı. Eskişehir.
- [12] Mancuhan. E., Özen. S., Sayan. P., & Sargut. S.T. (2016). *Experimental investigation of green brick shrinkage behavior with Bigot's curves*. *Drying Technology*. 2, 1-7.
- [13] Sokolar. R. & Nguyen. N. (2021). The Effect of Class C Fly Ash on the Plasticity and Ageing of Ceramic Mixtures Based on Kaolin. *Materials*, 14, 2761.
- [14] Vasic. M. R., (2022). Estimation of the drying behaviour for different clay raw materials – drying sensitivity techniques review. *Journal of Silicate Based and Composite Materials* 74(3), 88-93.
- [15] Uz. V., Işık. İ., Özdağ. H., Demirbilek. F., & Demirbilek. M., (2006). The preliminary study on the effect of plasticity and drying behaviour of extrusion formed clay for the tile&brick manufacturing. *D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 12, 105-116.
- [16] Çoban. F. (2004). Gümeli (İvrindi-Balıkesir) talk oluşumlarının mineralojik. jeokimyasal özellikleri. *Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi* 17(1).
- [17] Atasanov. A. (2005). Drying Properties of a Ceramic Mass Resistible to Aggressive Environment. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 40(4) 311-314.
- [18] Güngör. E. (2005). *Seramik Sağlık Gereçlerinde Kurutma Hızını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Odtü Fen Bilimleri Enstitüsü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. Ankara.
- [19] Uz. V., Işık. İ., Coşkun. N.D., Yener. S. & Çaşın. E., (2018). *Characterization of Commercial Clays Using in Ceramic Sanitaryware Sector*, SERES IV. International Ceramic, Glass, Porcelain, Enamel, Glaze and Pigment Congress, p. 191, October 10-12, Eskişehir Turkey.
- [20] İssi. A., Coşkun N.D., Tiryaki. V. & Uz. V., (2017). *Castng and Sintering of Sanitaryware Body Containing Fine Fire Clay (FFC)*. *J. Aust. Ceram. Soc.* 53, 157-162.



Araştırma Makalesi - Research Article

Doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile Alkali Direnci Kuvvetlendirilmiş Bazalt Lifinin Çimento Harcı Performansına Etkisi

Influence of Alkali Resistant Basalt Fiber Strengthened with Saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on Cement Mortar Performance

Lütfullah Gündüz¹, Şevket Onur Kalkan^{2*}

Geliş / Received: 11/04/2022

Revize / Revised: 17/01/2023

Kabul / Accepted: 20/01/2023

ÖZ

Bu çalışmada, takviye lifler ile çimento matrisi arasında daha yüksek uyumluluğa sahip bazalt lif takviyeli çimento harçları hazırlamak için, bazalt lifleri yüzey işlemi yapılmadan, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile muamele edilerek ayrı ayrı çimento harcında kullanılmış ve harcın fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Kıyılmış bazalt lifleri toplam karışımın ağırlıkça %0.05, %0.10, %0.15, %0.20 ve %0.25 oranında kullanılmış ve lif takviyeli çimento harçları $40 \times 40 \times 160$ mm test numuneleri olarak üretildikten sonra suda küre tabi tutulmuşlar ve birim hacim kütle, yayılma, eğilme ve basınç dayanımı ve kuruma büzülmesi özelliklerinin değişimine dair deneysel bir araştırma sunulmaktadır. Bu çalışma, beş farklı grup çimento harcının karşılaştırması şeklinde tamamlanmıştır. Birinci grup harç numuneleri, bazalt lifi içermeyen kontrol numuneleri olmak üzere bir seri olarak üretilmiştir. İkinci grup harçlarda, işlem görmemiş yalın bazalt lifleri ayrı bir seri olarak çimento harcında kullanılmıştır. Üçüncü grupta, çimento harcı karışım dizaynına ağırlıkça %0.10 TiO_2 ilave edilmiş ve işlem görmemiş yalın bazalt lifleri kullanılmıştır. Dördüncü ve beşinci grup çimento harcında ise, sırasıyla 28 gün ve 56 gün boyunca önceden hazırlanmış doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solüsyonlarında bekletilerek alkali ortama direnci ve kimyasal kararlılığı artırma işlemi yapılmış bazalt lifleri kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarında işlem görmemiş yalın bazalt lifleri harcın dayanımını artırırken, 28 günlük basınç dayanımları %0.10'un üzerinde yalın lif kullanımıyla azalmıştır. Harç karışımına TiO_2 ilave edilmesiyle birlikte basınç dayanım değerleri kontrol harcına kıyasla iyileşmiştir. Bazalt lifinin doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solüsyonlarında bekletilme süresi arttıkça, lifin bünyesine daha yüksek miktarda çözelti emilimi sağlanmaktadır. Bu işlemle lifin hem alkali dayanımı iyileştiği hem de çimento hidrasyonunda lifin bağ yeteneğinin artarak harcın dayanımının iyileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, lif oranı arttıkça kuruma büzülmesinin azaldığı, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile işlem görmüş liflerin kullanılmasıyla bu azalmada daha etkin sonuçlar alınabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Çimento Harcı, Lif Takviyesi, Bazalt Lif, Alkali Direnci, $\text{Ca}(\text{OH})_2$

ABSTRACT

In this study, to prepare basalt fiber reinforced cement mortars with higher compatibility between reinforcing fibers and cement matrix, basalt fibers were treated with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and without surface treatment, and used in cement mortar separately and the physical and mechanical properties of the mortar were compared. In this study, an

¹İletişim: lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2487-467X>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Çiğli, İzmir

^{2*}Sorumlu yazar iletişimi: sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0250-8134>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Çiğli, İzmir

experimental investigation of the variation of flexural and compressive strength and drying shrinkage of fiber reinforced cement mortars is presented. Chopped basalt fibers were used at the rate of 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20% and 0.25% by weight of the total mixture in fiber reinforced cement mortars. Samples were produced as 40×40×160 mm and then cured in water. This study was completed as a comparison of five different groups of cement mortars. The first group mortar samples were produced as a series of reference samples, which did not contain basalt fiber. In the second group of mortars, untreated basalt fibers were used as a separate batch in cement mortar. In the third group, 0.10% by weight TiO₂ was added to the cement mortar mix design and untreated bare basalt fibers were used. In the fourth and fifth group cement mortars, basalt fibers were used in a way to increase resistance to alkaline environment and chemical stability by keeping them in pre-prepared saturated Ca(OH)₂ solutions for 28 days and 56 days, respectively. According to the results of the study, while untreated basalt fibers increased compressive strength of mortars at 3 and 7 days, 28-day compressive strengths decreased with the use of more than 0.10% untreated fiber. With the addition of TiO₂ to the mortar mixture, the compressive strength values improved compared to the reference mortar. As the soaking time of basalt fiber in saturated Ca(OH)₂ solutions increases, higher amount of solution absorption is provided into the fiber. With this process, it was observed that both the alkali resistance of the fiber improved and the strength of the mortar improved by increasing the bonding ability of the fiber in cement hydration. In addition, it has been determined that as the fiber ratio increases, the drying shrinkage decreases, and more effective results can be obtained by using Ca(OH)₂-treated fibers.

Keywords- Cement Mortar, Fiber Reinforcement, Basalt Fiber, Alkali Resistance, Ca(OH)₂

I. GİRİŞ

Bazalt, inşaat endüstrisinde farklı amaçlarla kullanılan volkanik kökenli doğal bir kayadır. En yaygın kullanımı kırmataş beton agregası olarak görülmekle birlikte, daha ince tane boyutlarında sıva ve harç agregası veya dolgu materyali olarak kullanımları da görülmektedir. Ayrıca, kesme taş olarak da yapı ve kaplama taşı kullanımlarını görmek mümkündür. Bazalt kayacı, 1300-1700°C arasındaki sıcaklıklarda ergitilebilir özelliğe sahip olup, uygun viskozitedeki erimiş bazalt bir memeden geçirilerek 6-20 µm kalınlığında ince lifler halinde bükülebilmektedir [1]. Isıl işleme lif formatına getirilen bazalt lifler (BL), cam liflere benzer bir yapıya sahip yeni bir inorganik elyaf türü olarak bilinmektedir.

Geleneksel çimento harcı, su ile birlikte belirli bir oranda bağlayıcı ve ince agrega içeren yapı malzemesidir. Bununla birlikte, çimento bağlayıcılı harç uygulamalarında harcın durabilitesi, basınç ve eğilmeye karşı mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla değişen çap ve uzunluklarda sentetik ve/veya organik esaslı farklı lif türleri kullanılmaktadır. Çimento harcının yapısal bütünlüğünü iyileştirmek ve harcı güçlendirmek için karbon lifler, organik lifler, cam lifleri veya sentetik lifler kullanılabilir de, volkanik bazalt kayacından elde edilebilir bazalt lifler doğal yapısı ve nispeten düşük enerji ile elde edilebilmesi bakımından ön plana çıkabilmektedir [2]. BL'ler çimento bağlayıcılı harç kombinasyonlarında cam elyaf, polivinil alkol (PVA) lif, selülozik elyaf, karbon elyaf vb. elyaflara benzer şekilde donatı elemanı olarak kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Yaygın olarak çimento harç tasarımlarında kullanılan lifler arasında cam lifi alkali koşullara karşı yüksek hassasiyete sahiptir. BL'ler cam liflere kıyasla daha yüksek değerlerde asit ve alkali korozyon direncine sahip olup, son yıllarda büyük ilgi görmüştür. BL'ler güçlü alkalilerde cam elyaflardan daha kararlıyken, güçlü asitlerde kimyasal kararlılığı daha düşüktür [3-5]. Diğer taraftan, BL'ler, E-cam elyafına (ilk yaygın sentetik kompozit takviyesi, özellikle elektriksel yalıtım uygulamaları için geliştirilmiştir) göre en az %16 daha yüksek elastisite modülüne, eşdeğer gerilme mukavemetine ve daha iyi alkaline direncine, mükemmel ara yüzey kesme mukavemetine sahip elyaf malzemelerdendir [6].

Kimyasal olarak inert ve daha sert yapıda olan karbon elyafların, özel nitelikteki harç kombinasyonları hariç, yüksek maliyet ve anizotropi dezavantajları sebebiyle geleneksel olarak uygulana gelen çimento harcı tasarımlarında tercihe bağlı kullanımları görülebilmektedir. Sentetik veya polimerik lifler, düşük elastik modülü, düşük erime noktası özelliği ve inorganik matrislerle zayıf ara yüzey bağlarına sahip olması sebebiyle esneklik, sıcaklığa dayanım ve yüksek mukavemet performansı arzu edilen çimento esaslı harç bileşimlerinde kullanımları sınırlı olmaktadır. Bu amaçla, özel nitelik taşıyabilen yeni nesil çimento esaslı harç kombinasyonlarında bazalt lif kullanımları önem kazanmaktadır.

Elyaf takviyeli çimento esaslı harçlarda yüksek performanslı takviye malzemelerinin çoğunluğu genellikle yüksek mukavemet ve elastisite modülü sağlamasının yanı sıra, aynı zamanda yüksek kimyasal ve termal stabilite sergilemesi de gerekmektedir [1]. Çimento harçları alkali bir ortama sahiptir. Alkali ortamda lifler kimyasal yapıları bağlamında reaksiyona girerek çimento matris yapısında bağ yapma dereceleri zayıflayarak,

matristen ayrılabilmekte ve harcın dayanım performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle çimento matrislerinde donatı takviyesi olarak kullanılacak lif türlerinin alkali ortama direnç açısından kimyasal stabilitesinin önceden etüt edilip, zayıf karakteristik sergileyen liflerin kullanımları öncesinde alkali ortama karşı dirençli hale getirilmesi önemlidir. Cam elyaflar evrensel olarak yüksek performanslı kompozit malzemelerde kullanılmasına rağmen, alkali koşullarda zayıf bir stabiliteye sahiptir [7]. Son yıllarda farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalarda BL'nin çimento bağlayıcılı sistemlerde kullanımında başlıca iki hususa dikkat çekilmiştir [8-13]: *Çimento hidratasyonunda alkalilik özelliğinin minimize edilmesi veya bazalt lifinin yüzeyi ve bünyesi alkali ortam için kimyasal ön bir işleme kuvvetlendirilmesi* işlemi. Bu alternatif uygulamalar ile bazalt lifleri çimento hidratasyonunun alkali ortamına karşı daha kimyasal kararlı bir forma getirilmiş olur. Ayrıca, çalışmada ayrı bir seri olarak TiO₂ katkılı harçlar üretilmiştir. TiO₂'nin bazalt liflerinde kaplama malzemesi olarak kullanılması ile birlikte bazalt liflerinin alkali korozyonuna karşı dayanımının arttığı diğer araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [14].

Bu makalede, bazalt liflerinin çimento harcında donatı materyali olarak kullanımı ile harcın basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kuruma büzülmesi değerlerindeki değişim hakkında kapsamlı yapılan bir araştırma çalışmasının özetle bulguları sunulmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada, bazalt liflerinin doymuş Ca(OH)₂ ile alkali direncinin kuvvetlendirilme işlemleri tanımlanmış ve alkali dirençli BL'lerin çimento harcında takviye elemanı olarak kullanımlarında kimyasal kararlılıkları, harcın mekanik ve rötre performansına olan etkileri karşılaştırmalı olarak özetle tartışılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

A. Malzemeler ve Test Numuneleri

Bazalt lif takviyeli çimento harcı (BLTÇH) test numunelerinin hazırlanmasında karma suyu hariç ana agrega, bağlayıcı malzeme ve katkı malzemeleri olarak 4 ayrı malzeme türü kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1 standardına uygun PÇ42.5R (42.5 N/mm²) Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal içeriği Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, çimentonun özgül ağırlığı 3.11, priz başlangıcı ve priz sonu değerleri 150 dk ve 220 dakika, 28 günlük basınç dayanımı 52 MPa'dır. Ana agrega malzeme olarak yüzey kuru yoğunluğu 2,72 g/cm³ ve maksimum tane boyutu 2,0 mm olan silis kumu kullanılmıştır. Piyasa koşullarından tedarik edilen 13 µm çapında ve 18 mm uzunluğunda kıyılmış bazalt lifi kullanılmış olup bazı teknik özellikleri Tablo2'de verilmiştir. Katkı maddesi olarak rutil esaslı toz formda TiO₂ piyasadan temin edilerek kullanılmıştır. Tüm BLTÇH test numunelerinin hazırlanmasında kullanılan karışım oranları Tablo3'te verilmiştir. Çalışma programında tüm test numunelerinin mukayesesi amacıyla kütlece 1(su):2(çimento):6(kum) karışım oranlarında bir kontrol karışımı tasarlanmıştır (BL0). BL0 karışımı haricinde bazalt lif takviyeli 4 ayrı grup karışım tasarımı daha yapılmıştır. Tüm gruplarda sırasıyla toplam karışımın ağırlıkça %0.05, %0.10, %0.15, %0.20 ve %0.25 oranlarında bazalt lifi silis kumu ile yer değiştirmeli olarak 5 ayrı seri test numuneleri hazırlanmıştır. İlk grupta piyasadan temin edildiği şekliyle bazalt lif (yalın formda) karışımlarda kullanılmıştır. İkinci grupta, karışıma TiO₂ toz formda her bir seride toplam karışımın ağırlıkça %0.10'u kadar sabit oranda silis kumu ile yer değiştirmeli olarak ilave edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü gruplarda ise sırasıyla 28 gün ve 56 gün boyunca önceden hazırlanmış doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekletilerek, alkali ortama direnci ve kimyasal kararlılığı artırma işlemi yapılmış bazalt lifleri kullanılmıştır. Tüm karışımlarda karma suyu olarak İzmir ili şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 1. PÇ42.5R Portland çimentosunun kimyasal içeriği

Oksit	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	KK
Ağırlıkça, %	63.31	19.36	4.32	2.86	1.33	0.41	0.19	2.86	3.35

Tablo 2. Bazalt lifinin bazı teknik özellikleri.

Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Gerilmesi (GPa)	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)	Yumuşama Noktası (°C)	Kopma Uzaması (%)	Su emme (%)
2.7	4.60	95-105	950	≈3.0	<0.55

Tablo 3. BLTÇH test numunelerinin hazırlanmasında kullanılan karışım oranları (ağırlıkça %).

Test	PÇ	0-2 mm Kum	Bazalt Lif	TiO ₂	Su	s/ç	su/katı
<i>Kontrol Karışımı:</i>							
BL0	22.2	66.70	0.00	0.00	11.1	0.50	0.125
<i>Yalın Bazalt Lif Takviyeli:</i>							
BL1	22.2	66.65	0.05	0.00	11.1	0.50	0.125
BL2	22.2	66.60	0.10	0.00	11.1	0.50	0.125
BL3	22.2	66.55	0.15	0.00	11.1	0.50	0.125
BL4	22.2	66.50	0.20	0.00	11.1	0.50	0.125
BL5	22.2	66.45	0.25	0.00	11.1	0.50	0.125
<i>TiO₂ Takviyeli:</i>							
BL6	22.2	66.55	0.05	0.10	11.1	0.50	0.125
BL7	22.2	66.50	0.10	0.10	11.1	0.50	0.125
BL8	22.2	66.45	0.15	0.10	11.1	0.50	0.125
BL9	22.2	66.40	0.20	0.10	11.1	0.50	0.125
BL10	22.2	66.35	0.25	0.10	11.1	0.50	0.125
<i>28 gün boyunca doymuş Ca(OH)₂ solüsyonunda Güçlendirilmiş Bazalt Lif Takviyeli</i>							
BL11	22.2	66.65	0.05	0.00	11.1	0.50	0.125
BL12	22.2	66.60	0.10	0.00	11.1	0.50	0.125
BL13	22.2	66.55	0.15	0.00	11.1	0.50	0.125
BL14	22.2	66.50	0.20	0.00	11.1	0.50	0.125
BL15	22.2	66.45	0.25	0.00	11.1	0.50	0.125
<i>56 gün boyunca doymuş Ca(OH)₂ solüsyonunda Güçlendirilmiş Bazalt Lif Takviyeli:</i>							
BL16	22.2	66.65	0.05	0.00	11.1	0.50	0.125
BL17	22.2	66.60	0.10	0.00	11.1	0.50	0.125
BL18	22.2	66.55	0.15	0.00	11.1	0.50	0.125
BL19	22.2	66.50	0.20	0.00	11.1	0.50	0.125
BL20	22.2	66.45	0.25	0.00	11.1	0.50	0.125

B. Test Metodolojisi

Bazalt lifinin yalın formda çimento harcı karışımında kullanımıyla erken yaşlarda basınç dayanımı kazandığı, ancak ilerleyen yaşlarda ise dayanım kaybettiği yapılan test çalışmalarında tecrübe edinildi. Kum, çimento ve su karışımıyla oluşan çimento harcı alkali bir karakteristiktir. Bazalt lifi herhangi bir işlem yapılmaksızın çimento bileşenli bir harç karışımında kullanımında, ortamın alkalilik durumundan etkilenecek lifin bağ yapma performansında bir zayıflama söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle, bazalt lifi herhangi bir işlem yapılmaksızın çimento bağlayıcı harç karışımında doğrudan kullanıldığında genellikle ilerleyen yaşlarda çimento bileşenli matrislerde mukavemet düşüklüğüne sebep olmaktadır. Bu nedenle, bazalt liflerinin öncelikle alkali ortama karşı dirençli bir forma getirilmesi ve ondan sonra harç karışımlarında kullanılması gerekir. Bazalt lifinin çimento bağlayıcı sistemlerde kullanımında başlıca iki hususa dikkat etmek gerekmektedir: Çimento hidratasyonunda alkalilik özelliğinin minimize edilmesi ve bazalt lifinin yüzeyi ve bünyesi alkali ortam için kimyasal ön bir işlemle kuvvetlendirilmesi gerekmektedir [1, 8].

Testler için tasarlanmış tüm karışımlar laboratuvar ortamında (ortalama 22°C ve %50 RH) bir çimento mikserinde karıştırılmıştır. Taze harç formunu oluşturmak için öncelikle katlı formdaki malzemeler 3 dakika boyunca homojene yakın bir dağılım oluşuncaya kadar karıştırılmıştır. Daha sonra katı formdaki karışıma karışım suyu eklenerek 3 dakika daha malzemeler mikserde karıştırılmıştır. Taze yaş harç karışımı oluşturulduktan sonra, karışım 3 dakika dinlendirilerek 40×40×160mm boyutlarında prizma kalıplara dökülmüştür. Her bir karışım tasarımına ait 9 adet numune dökümü yapılmıştır. Dökümden sonra, numunelerin her biri, kalıptan çıkarmadan önce laboratuvarında yaklaşık 24 saat bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numunelere, mekanik test günlerine kadar 23±2°C'lik termostatlı bir ortamda su içerisinde kür işlemi yapılmıştır. Testler için kürlemesi tamamlanan numuneler sudan çıkartılarak öncelikle 100 °C'de 24 saat havalandırılmalı bir etüvde kurutulmuştur. Sonrasında numuneler 3, 7 ve 28. günlerinde basınç ve eğilme dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Sertleşmiş harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları TS EN 1015-11'e [15] göre yapılmıştır. Kuruma büzülmesi (rötre) testi ASTM C 596-09 [16] standardına göre yapılmıştır. Rötre testi için 25×25×285 mm boyutlarında prizmalar

üretmiş, numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ve $\%50 \pm 5$ bağıl nemde bir kurutma odasında tutulmuştur. Her karışım için üç adet prizma numune üretilmiştir. 24 ± 1 saatte numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra tüm numunelerde uzunluk değeri için ilk ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm kontrol veya 0 günlük ölçüm olarak kullanılmıştır. Sonraki ölçümler, ilk ölçümden sonra 1, 3, 7, 14, 28 ve 72. günlerde yapılmıştır. Harç karıştırdıktan hemen sonra, taze harcın yayılma ve kıvam analizi TS EN 1015-3'te [17] belirtilen prensiplere göre ölçülmüştür. Ayrıca sertleşmiş harç numunelerinin ASTM C642 (2017) [18] standardına göre yoğunluk değerleri analiz edilmiştir.

Bu çalışmada yalnız bazalt lifinin alkali ortama direncini artırmak amacıyla iki ayrı uygulama yapılmıştır. Birinci uygulamada çimento harcı karışımlara yalnız bazalt lifi ile birlikte toz formda rutil esaslı TiO_2 ağırlıkça $\%0.10$ sabit oranda ilave edilerek (BL6 – BL10), TiO_2 katkısının bazalt lifinin çimento matris yapısındaki dayanım değerlerine etkileşimi analiz edilmiştir. Bu uygulamada, bazalt lifinin karışıma ilave edilmeden önce TiO_2 'yle kimyasal kaplanması yerine alternatif bir yaklaşımla karışımda serbest TiO_2 partiküllerinin varlığıyla bazalt lifinin kimyasal kararlılık kazanıp kazanmadığı dayanım testleri ile analiz edilmiştir. İkinci uygulama da ise bazalt lif demetleri 56 gün boyunca önceden hazırlanmış doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solüsyonlarında bekletilerek, alkali ortama direnci ve kimyasal kararlılığı artırma işlemi yapıldı. Bekleme süresinden sonra doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solüsyonlarından lif demetleri alındı ve distile su ile yıkandı. Yıkanan lif demetleri daha sonra 24 saat oda sıcaklığında damıtılmış suya daldırıldı ve sonrasında ilaveten 24 saat daha kurutuldu. Tüm prosedürlerden sonra, her bir lif demeti için kimyasal kararlılıkları bağlamında ağırlık değişimleri aşağıdaki Eşitlik 1 ile hesaplandı.

$$\text{Ağırlık değişimi (\%)} = (1 - ((M_0 - M) / M)) \times 100 \quad (1)$$

Burada; M_0 , solüsyona batırılmadan önce numune ağırlığını (g), M, Solüsyon emdirildikten sonra numune ağırlığını (g) temsil etmektedir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

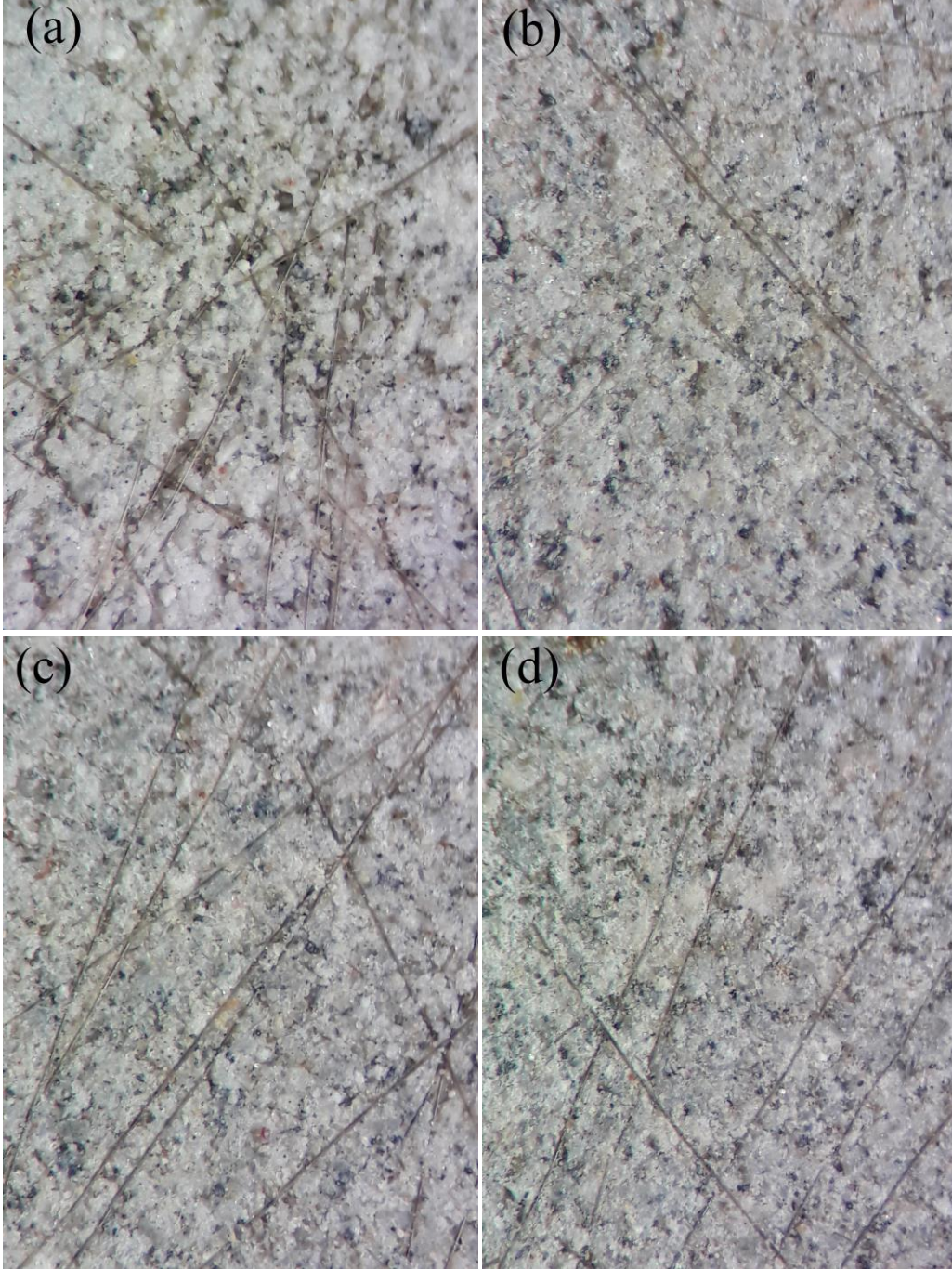
BLTÇH test numunelerinin yaş birim hacim kütle, sertleşmiş harç birim kütle ve yayılma değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Ayrıca, harç numunelerinin mikroskop görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Mikroskop görüntüleri Nikon marka (SMZ 745T) stereo mikroskop ile elde edilmiştir.

Tablo 4. BLTÇH test numunelerinin analiz bulguları.

Test	Bazalt Lif Oranı (ağırlıkça %)	Yaş Harç Birim Hacim Kütle (kg/m^3)	Sertleşmiş Harç Birim Hacim Kütle (kg/m^3)	Yayılma (mm)
<i>Kontrol Karışımı:</i>				
BL0	0.00	2134	1920	216
<i>Yalın Bazalt Lif Takviyeli:</i>				
BL1	0.05	2125	1911	197
BL2	0.10	2116	1902	183
BL3	0.15	2108	1895	179
BL4	0.20	2101	1887	176
BL5	0.25	2097	1883	171
<i>TiO_2 Katkılı:</i>				
BL6	0.05	2123	1909	197
BL7	0.10	2114	1900	182
BL8	0.15	2106	1893	178
BL9	0.20	2099	1885	176
BL10	0.25	2095	1882	170
<i>28 gün boyunca doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solüsyonunda Güçlendirilmiş Bazalt Lif Takviyeli:</i>				
BL11	0.05	2125	1911	196
BL12	0.10	2116	1902	182
BL13	0.15	2108	1895	177
BL14	0.20	2101	1887	176
BL15	0.25	2097	1883	171

Tablo 4. (Devamı)

Test	Bazalt Lif Oramı (ağırlıkça %)	Yaş Harç Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Sertleşmiş Harç Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Yayılma (mm)
56 gün boyunca doymuş Ca(OH) ₂ solüsyonunda Güçlendirilmiş Bazalt Lif Takviyeli:				
BL16	0.05	2125	1911	195
BL17	0.10	2116	1902	181
BL18	0.15	2108	1895	177
BL19	0.20	2101	1887	175
BL20	0.25	2097	1883	169

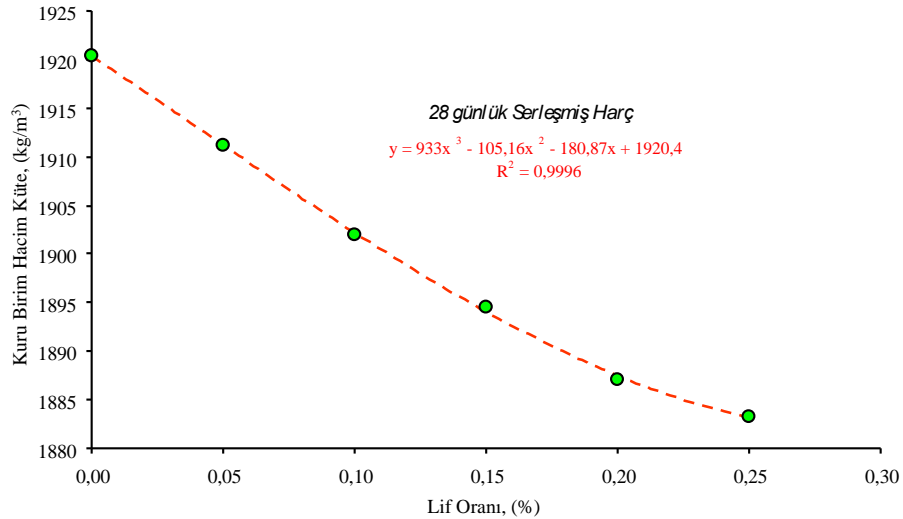


Şekil 1. BL katkılı harç numunelerinin mikroskop görüntüleri

A. Birim Hacim Kütle ve Yayılma

Bileşiminde bazalt lif takviyesi kullanılmaksızın tasarlanmış kontrol harcı (BL0) örneğinin taze harç yaş birim hacim kütlesi ortalama 2134 kg/m^3 'tür. Doymuş Ca(OH)_2 ile alkali direnci kuvvetlendirilmemiş yalın bazalt lif takviyeli harç karışımlarının (BL1-BL5) yaş birim hacim kütle değerleri ortalama $2097\text{-}2125 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişmektedir. BL oranı arttıkça, yaş harç birim hacim kütle değeri düşük değerlerde de olsa azalmaktadır. BL0 harcına göre ortalama %0.42-%1.73 oranında artan lif oranı bağlamında yaş yoğunluğu düşmektedir. Bununla birlikte 28 gün ve 56 gün boyunca doymuş Ca(OH)_2 solüsyonunda güçlendirilmiş bazalt lif takviyeli çimento harcı karışımlarının (BL11-BL15 ve BL16-BL20) yaş birim hacim kütle değerleri de yalın bazalt lif takviyeli harç karışımların değerleri ile aynı olduğu belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, alkali direnci kuvvetlendirilmiş bazalt lifi, harç tasarımında harcın yaş yoğunluk değerine değişim etkisi olmadığı gözlenmiştir. Harç tasarımlarında ağırlıkça %0.10 sabit oranda TiO_2 katkısıyla oluşturulmuş test numunelerinin (BL6-BL10) ise yaş birim hacim kütle değerleri ortalama $2095\text{-}2123 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişmektedir. TiO_2 katkısının harç karışımlarında yaş yoğunluğunun değişimine etken bir parametre olmadığı görülmüştür. Tüm test numunelerinde yaş yoğunluk değişimi için gözlenen değişim veya etkileşim, benzer bir eğilimle sertleşmiş harç formları için de geçerli olduğu belirlenmiştir.

Kontrol harcı (BL0) örneğinin yayılma tablası yöntemiyle ölçülmüş yayılma değeri 216 mm'dir. Doymuş Ca(OH)_2 ile alkali direnci kuvvetlendirilmemiş yalın bazalt lif takviyeli harç karışımlarının (BL1-BL5) yayılma değerleri ise 197 mm'den 171 mm'ye kadar düşmektedir. Bazalt lif oranı arttıkça yayılma değeri düşmekte ve harcın işlenebilirliği bu oranda azalmaktadır. BL0 harcına göre yalın BLTÇH test numunelerinin yayılma değerlerindeki değişim artan lif oranı bağlamında sırasıyla %8.8, %15.3, %17.1, %18.5 ve %20.8 oranlarında gözlemlenmiştir. Bazalt lif içeriğinin artmasıyla harcın akışkanlığının ve sarkma özelliğinin belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Matris yapıda rastgele yönlendirilmiş kısa bazalt liflerinin kumu tuttuğu, harçta suyun hareket etmesini engellediği ve bazalt liflerinin yüzeyine taze harç bünyesinde oluşan küçük topaklanmaların aynı anda hareket eden suyu azaltarak akışkanlık özelliğini etkilediği düşünülmektedir. Bazalt lifinin çimento harcı karışımlarında bu etkisine yönelik benzer bulgular farklı araştırmacıların çalışmalarında da vurgulanmıştır [19, 20]. Bazalt lif içeriğinin artmasıyla sertleşmiş harç numunelerinin ortalama kütlesi azalmıştır (Şekil 2). Matris yapıda rastgele yönlendirilmiş bazalt liflerin oluşturduğu donatı fonksiyonunun harcın gözenekliliğini arttırdığı düşünülmekte ve buna bağlı olarak harcın yoğunluğu azalmaktadır.



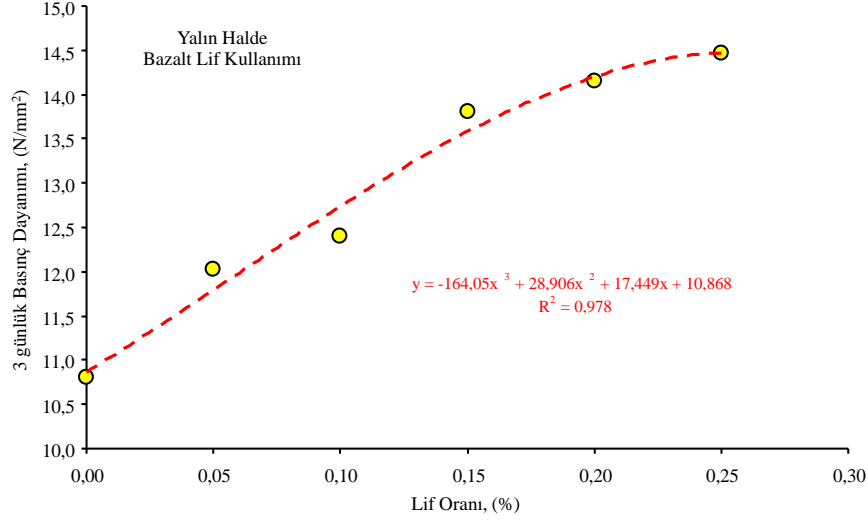
Şekil 2. Bazalt lif oranı-sertleşmiş harç yoğunluk ilişkisi.

Doymuş Ca(OH)_2 ile alkali direnci kuvvetlendirilmiş bazalt lifli karışımların yayılma değerleri eşdeğer oranlarda yalın bazalt lif takviyeli karışımların yayılma değerlerine göre bir miktar daha düşük olduğu görülmüştür. Lifin alkali direncini kuvvetlendirmek amacıyla Ca(OH)_2 etkileşimi sonrasında lif yüzeylerinde mikron büyüklüklerinde CaCO_3 kristalleşmeleriyle kaplanmış olduğu görülebilmektedir. Bu kristalleşmelerin lifin matris yapıda tutuculuğu artırması ve karışım hamurunda suyun hareketini kısıtlayarak akışkanlık özelliğini azalmasına sebep olduğu düşünülmüştür. Alkali direnci için doymuş Ca(OH)_2 etkileşim oranı arttıkça, bazalt lifinin yayılmanın azalmasına olan etkisinin arttığı görülmüştür. Diğer taraftan, yalın bazalt lif takviyeli harç karışımlarına eşit oranda TiO_2 ilavesiyle, bazalt liflerinin çeperlerinde TiO_2 'nin ince partiküller şeklinde yer yer tutunduğu gözlenmiştir. Bu tutunmaların lif yüzeylerinde çeper oluşturarak karma suyunun hamur içerisinde

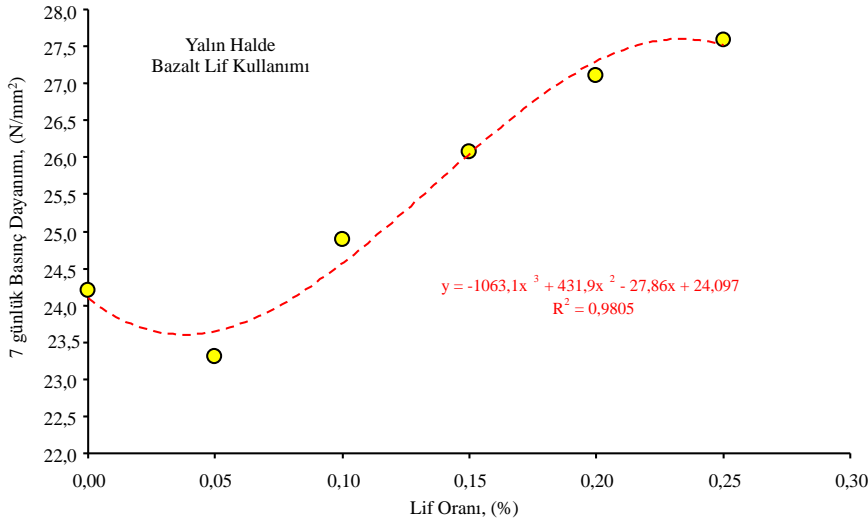
hareketini engellediği ve bu sebeple minimum miktarlarda da olsa harcın yayılma değerini ve kıvamını azalttığı düşünülmektedir.

B. Basınç ve Eğilme Dayanımı

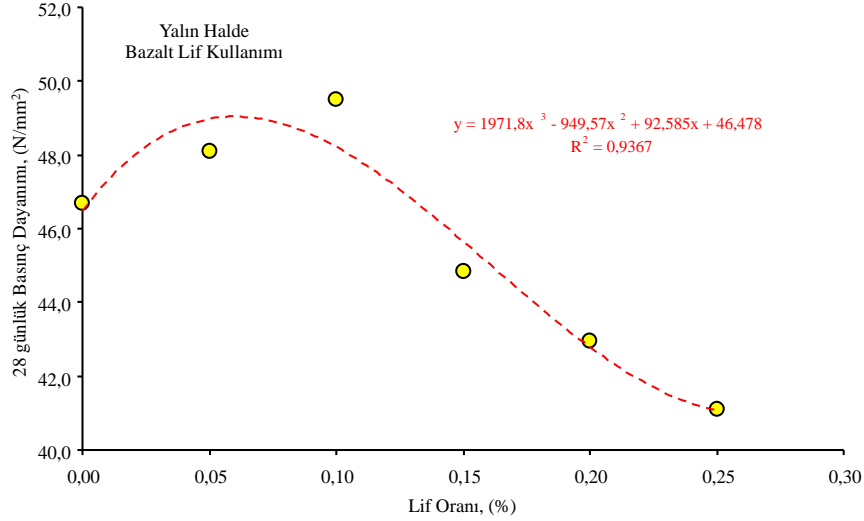
Tüm BLTÇH test numunelerinin 3, 7 ve 28 gün sonrası basınç dayanımı ve eğilme dayanım değerleri analiz edilmiştir. Yalın bazalt lif takviyeli test numunelerinin sertleşme yaşlarına göre basınç dayanımı değişimleri Şekil 3 – Şekil 5'te sırasıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bazalt lif takviyesi kullanılmaksızın tasarlanmış kontrol harcı (BL0) test örneğinin 3, 7 ve 28 günlük yaşlarda basınç dayanım değerleri sırasıyla 10.8 N/mm², 24.2 N/mm² ve 46.7 N/mm²'dir.



Şekil 3. Bazalt lif oranı-basınç dayanımı ilişkisi (3 gün sertleşme yaşı).



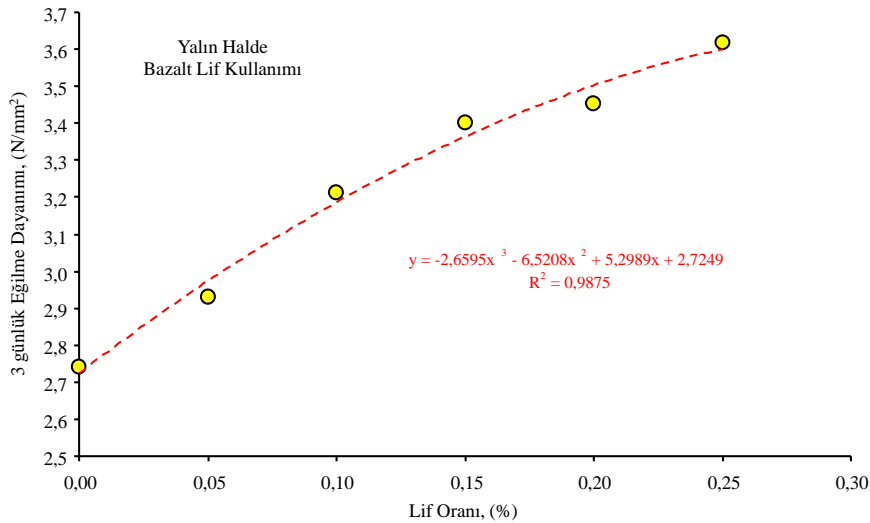
Şekil 4. Bazalt lif oranı-basınç dayanımı ilişkisi (7 gün sertleşme yaşı).



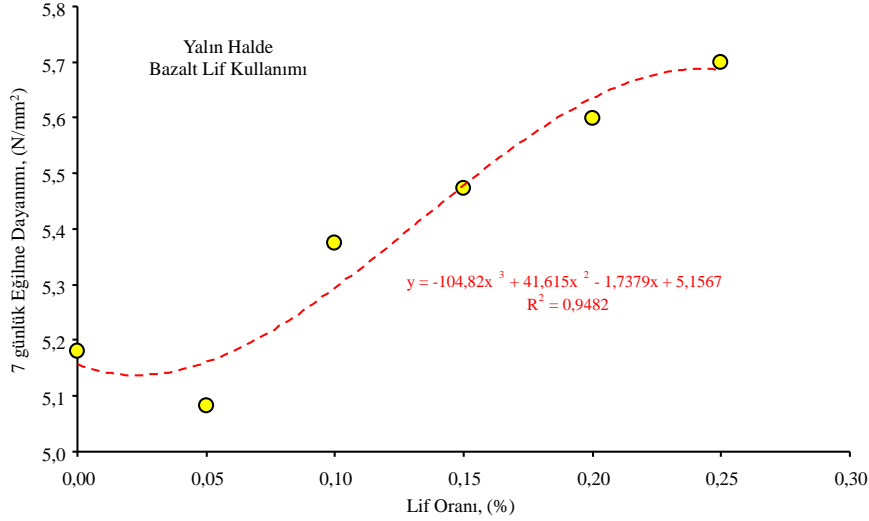
Şekil 5. Bazalt lif oranı-basınç dayanımı ilişkisi (28 gün sertleşme yaşı).

Şekil 3 – Şekil 5 irdelendiğinde görüldüğü üzere, kontrol örneğine göre bazalt lif ilave oranına bağlı yalın bazalt lif takviyeli çimento harcı dayanımlarında sırasıyla %11.2, %14.7, %27.7, %30.9 ve %33.9'luk artışlar olmuştur. Erken yaşlarda çimento harcında yüksek oranda bazalt lif ilave edilmesi dayanımı önemli ölçüde iyileştirmektedir. Örneğin %0 lif kullanımlı test örneğinin basınç dayanımı 10.8 N/mm²'den ağırlıkça %0.25 yalın bazalt lif takviyesiyle 3 günlük yaş sonrası basınç dayanımı 14.5 N/mm²'e yükselerek mukavemet kazanmıştır. Ancak bazalt lif ilavesi ilerleyen yaşlarda harcın mukavemetini azaltıcı etkiler göstermiştir. 7 gün küre tabi tutulan çimento harcı numunelerinin kontrol harcına göre ağırlıkça %0.05'lik bazalt lif kullanımında dayanım değeri %3.7'lik bir oranda düşüş göstermiştir. Bazalt lif oranının bu değer üzerinde ilave oranlarında aynı yaşlarda %14'e varan mukavemet artışları olmuştur. Çimento harcı yaşı arttıkça, yalın bazalt lif etkisiyle mukavemet kazanma oranı erken yaşlara kıyasla düşmüştür. 28 gün kür uygulanan numunelerde ise ağırlıkça %0.05 ve %0.10'luk bazalt lif takviyesinde basınç dayanımlarında %3 ve %6'lık birer artış olmuştur. Ancak, ağırlıkça lif kullanım oranı >%0.15'in üzerine çıktığında ise sırasıyla %4, %8 ve %12'lik dayanım düşüşleri olmuştur (Şekil 5). Lif artış miktarına bağlı dayanım düşüşü, yalın bazalt lifleri ile çimento matrisi arasındaki ara yüzeyde aderans kabiliyetinin azalması ve yaşlanmaya bağlı zayıf karakteristiğinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, çimento harcı matrisine yüksek elastik modüllü elyaf eklendikten sonra ilerleyen yaşlarda harcın dayanımlarının azalabileceği farklı araştırmalarda da rapor edilmiştir [21].

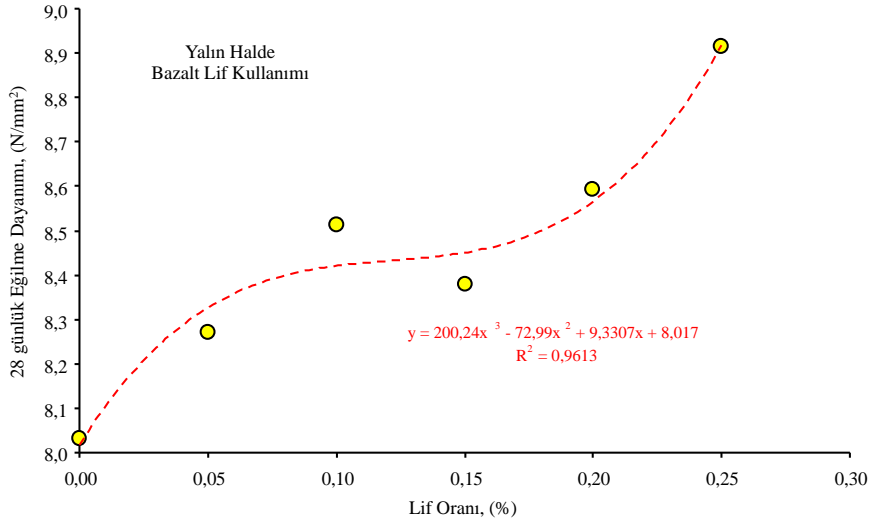
Diğer taraftan yalın bazalt lif takviyeli test numunelerinin sertleşme yaşlarına göre eğilme dayanımı değişimindeki karakteristik eğilim, basınç dayanımı davranışına kıyasla farklılıklar göstermektedir. Bazalt lif takviyesi kullanılmaksızın tasarlanmış kontrol harcı (BL0) test örneğinin 3, 7 ve 28 günlük yaşlarda eğilme dayanım değerleri sırasıyla 2.7 N/mm², 5.2 N/mm² ve 8.0 N/mm²'dir. Yalın bazalt lif oranlarına bağlı eğilme dayanımı değişimleri 3, 7 ve 28 günlük numuneler için sırasıyla Şekil 6 – Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 6. Bazalt lif oranı-eğilme dayanımı ilişkisi (Numune yaşı:3 gün).



Şekil 7. Bazalt lif oranı-egilme dayanımı ilişkisi (Numune yaşı:7 gün).



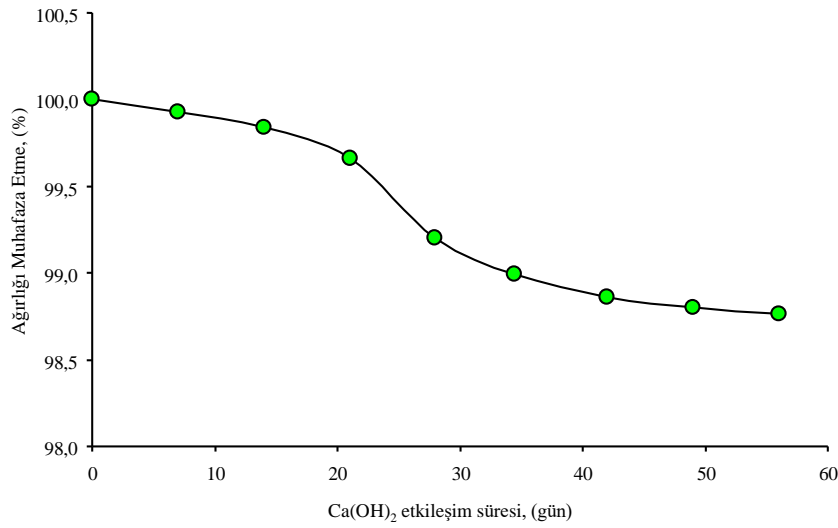
Şekil 8. Bazalt lif oranı-egilme dayanımı ilişkisi (Numune yaşı:28 gün).

Şekil 6 – Şekil 8 irdelendiğinde, çimento harcı karışımlarına bazalt lifi ilavesi, erken yaşlarda basınç mukavemetine benzer şekilde harcın eğilme dayanımını iyileştirmiştir. Ancak, ilerleyen yaşlarda basınç mukavemetini düşürücü etkisi, eğilme dayanımında gözlenmemiş olup, aksine eğilme dayanımları da iyileşmiştir. 3 günlük yaşa ulaşıldığında test numunelerinin eğilme dayanımları artan lif kullanım oranına bağlı olarak 2.9 N/mm²'den 3.6 N/mm²'ye %26.92'lik artış göstermiştir. Kontrol örneğine göre mukayese edildiğinde bazalt lif ilave oranına bağlı eğilme dayanımlarında sırasıyla %6.9, %17.2, %24.1, %26 ve %32'lik artışlar olmuştur. Erken yaşlarda çimento harcında yüksek oranda bazalt lif ilavesi eğilme dayanımını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Örneğin, kontrol örneğinin eğilme dayanımı 2.7 N/mm²'den ağırlıkça %0.25 yalın bazalt lif takviyesiyle 3 günlük yaş sonrası eğilme dayanımı 3.6 N/mm²'e artarak, daha esnek bir karakteristik kazanmıştır. 7 günlük yaşa ulaşan çimento harcı numunelerinde (BL1) kontrol harcına göre ağırlıkça %0.05'lik bazalt lif takviyesinde eğilme dayanımı %1.9'luk oranda düşmüştür. Lif takviyesi >%0.05 oranı üzerine çıktığında eğilme dayanımında %10'a varan iyileşmeler olmuştur. Bununla birlikte 28 günlük yaşlarda ise yalın bazalt lif takviyeli tüm numunelerin eğilme dayanımlarında artış gözlenmiştir. Kontrol örneğine göre kıyasla bazalt lif ilave oranına bağlı eğilme dayanımlarında sırasıyla %8.3, %8.5, 8.4, %8.6 ve %8.9'luk artışlar olmuştur. Literatür incelendiğinde, benzer şekilde bazalt liflerinin harçlarda eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabildiği görülebilmektedir [22]. Bu iyileşmenin sebebi olarak; bazalt lifleri, çimento harcı karışımlarında kullanılabilen selülozik lif, PVA, polipropilen ve cam elyaf gibi diğer tür liflere göre çekme gerilme değerleri en yüksek lif türlerindedir. Bu bağlamda, çimento harcı içerisine bazalt lifleri ilave edildiğinde, matris yapıda rastgele yönelmiş bazalt liflerin oluşturduğu donatı uzanımları boyunca çekme gerilmesi taşıma kapasitesinin artışına paralel olarak eğilme dayanımlarının yükseldiği düşünülmektedir.

C. TiO_2 Katkısının ve $Ca(OH)_2$ ile Alkali Dirençli Bazalt Lifi Takviyesinin Dayanma Etkisi

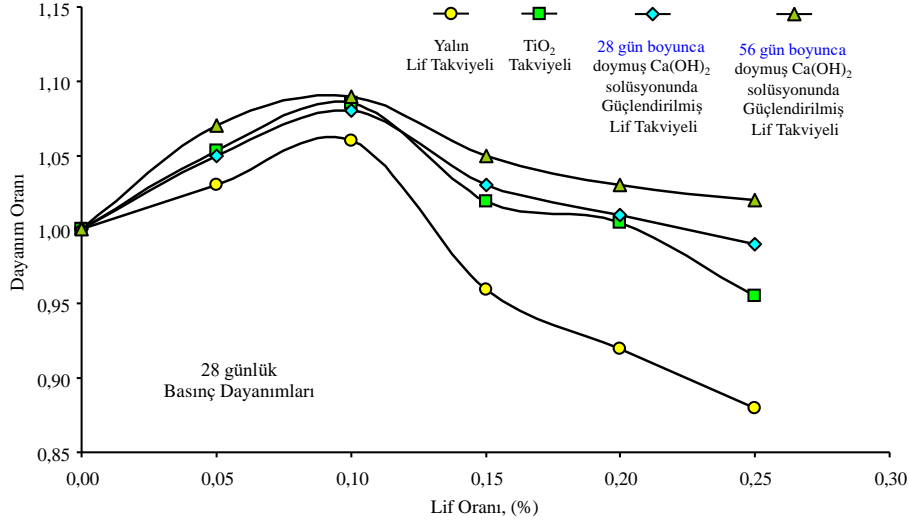
Bazalt lifinin çimento bağlayıcılı sistemlerde kullanımı ve alkali ortama uyumluluğunu sağlamak amacıyla KOH, NH_3 , NaOH, $NaOH+Na_2CO_3$ çözeltileri gibi kimyasal solüsyonlarda belirli bir periyotta bekletilmek suretiyle alkali direnci artırılabilir [1]. Bununla birlikte, Zr_2O veya TiO_2 bileşenleri ile de kimyasal kaplama işlemi yapıldıktan sonra kullanımı sağlanabilmektedir [23]. Bir diğer alternatif işlem ise bazalt lifi belirli bir periyotta daldırma yöntemiyle doymuş $Ca(OH)_2$ solüsyonunda bekletilerek bazalt lifinin çok düşük ağırlık kaybıyla birlikte alkali ortama yüksek direnç göstermesi sağlanabilmektedir [1]. Konu üzerine yapılan farklı araştırmalarda zayıf alkali solüsyona batırılmış bazalt lifinin çok kararlı olduğu, güçlü alkali solüsyona batırılmış bazalt elyafın ise yüksek ayrışma sabitine bağlı olarak zayıf bir şekilde kalıcılık sergilediği gözlenmiştir. Bazalt elyafın alkali çözeltilerdeki çekme dayanım değeri büyük ölçüde azalır. Lee ve ark. [1] alkali çözeltide bazalt elyafın kimyasal kararlılığı üzerine farklı konsantrasyonlarda hazırladıkları KOH, NH_3 , NaOH çözeltilerde ve doymuş $Ca(OH)_2$ solüsyonunda bazalt liflerinin 90 gün süreyle bekletildikten sonra alkali dirence en mukavim bazalt lifinin doymuş $Ca(OH)_2$ ve NH_3 solüsyonuna maruz kalmış numunelerinde oluştuğunu rapor etmişlerdir.

Bu çalışmada, 56 gün boyunca doymuş $Ca(OH)_2$ solüsyonlarına maruz bırakılmış bazalt lif demetlerinin ağırlık değişimi (ağırlığını muhafaza etme, ağırlık tutma) analizi Şekil 9'da verilmiştir.



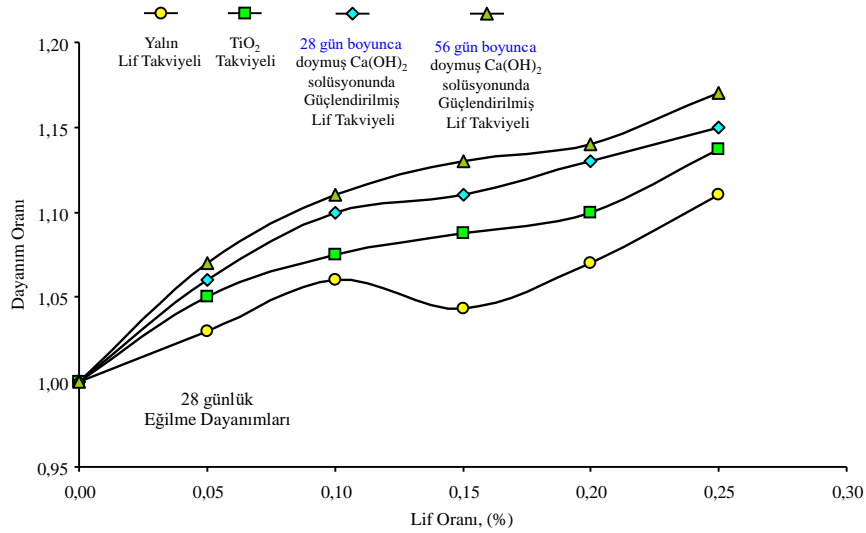
Şekil 9. Doymuş $Ca(OH)_2$ solüsyonlarına maruz bırakılmış bazalt liflerinin ağırlık değişimi.

56 gün boyunca doymuş $Ca(OH)_2$ solüsyonlarına batırılarak kimyasal etkileşime maruz bırakılmış bazalt lif demetlerinin, alkali ortamda ortalama %1.24'lük bir ağırlık kaybı ile 56 gün sonunda ağırlığının %98.76'sını muhafaza etmiştir. Solüsyona maruz kalma süresi arttıkça genel eğilim, ağırlığını muhafaza etme kabiliyetinde minimum değerlerde de olsa bir düşme söz konusudur. GB/T 23265 standardında [24] çimento bağlayıcılı karışımlarda kullanılacak bazalt liflerinin alkali dirençli olmasını zorunlu kılınmıştır. Ayrıca, bazalt liflerinin $100^{\circ}C$ 'de 4 saat süreyle doymuş $Ca(OH)_2$ çözeltisine maruz kaldıktan sonra ağırlığı muhafaza etme oranının %75'ten az olmaması öngörülmüştür [25]. Bu değerlendirmeye göre, çalışma kapsamında kimyasal etkileşime maruz bırakılmış bazalt liflerinin tümü, öngörülen değerleri sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında 28 güne kadar solüsyonda bekletilme süresinde önemli bir düşme oranı gözlenmiş olup, 28 gün sonrasındaki ağırlık değişiminin daha düşük düzeylerde olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, 28 gün ve 56 gün boyunca doymuş $Ca(OH)_2$ solüsyonlarında bekletilerek kimyasal kararlılığı artırılmış bazalt lif demetlerinden alınan örnekler, çalışma kapsamında alkali direnci kuvvetlendirilmiş iki ayrı bazalt lif takviyesi olarak çimento harcı karışımlarına ilave edilerek yeni seri test numuneleri hazırlanmıştır. Bu seriler, 28 gün solüsyona maruz kalan lif takviyeli seriler BL11-BL15; 56 gün solüsyona maruz kalan lif takviyeli seriler BL16-BL20 olarak kodlanmıştır. Bu serilerdeki BLTÇH numuneleri yalın lif konumu ve TiO_2 katkılı harç karışımlarına kıyasla dayanım performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analiz yaklaşımında, tüm BLTÇH test numunelerinin dayanım değerleri kontrol harcı (BL0) değerine oranlanarak "dayanım oranı" bir parametre olarak tanımlanmıştır. Tüm BLTÇH test numunelerinin 28 günlük yaş sonrası basınç dayanımı ve eğilme dayanımları bağlamında "dayanım oranı" ilişkisi grafiksel gösterimle sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Lif oranı –dayanım oranı ilişkisi (28 günlük basınç dayanımı).

Tüm BLTÇH test numunelerinin basınç dayanımı değişimi irdelendiğinde, yukarıda da değinildiği üzere yalın bazalt lifi takviyeli çimento harcı test numunelerinin dayanımı, kontrol harcı dayanımına göre %0.10'luk lif oranı sonrasında düşmektedir. Harç karışımına TiO₂ ilave edilmesiyle birlikte basınç dayanım değerlerinde kontrol harcına kıyasla bir iyileşme gözlenmiş olup, özellikle ağırlıkça %0.15 bazalt lif kullanım oranlı karışıma kadar basınç dayanım değerleri sırasıyla (BL6 – BL8) 1.05, 1.09 ve 1.02 oranlarında iyileşme göstermiştir. Lif oranı %0.20'lik karışımda (BL9) ise dayanım değeri kontrol karışımına eşdeğer bir mukavemete ulaşmıştır. Ancak, >%0.20 üzerindeki lif kullanım oranının da ise 0.96'lık dayanım oranı ile mukavemet değeri düşmüştür. Çimento matrisinde serbest TiO₂ partiküllerinin karma suyu etkisinde hızla çözünerek bazalt lif boyu uzanımlarında aderans oluşturarak yer yer tutunduğu, bu sebeple alkali direncini kısmi şekilde kuvvetlendirerek harcın dayanım kazanmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Diğer taraftan doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekletilmiş bazalt liflerinin ise çimento matrisinde daha etkin bir rol aldığı tecrübe edilmiştir. 28 gün boyunca etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinden ağırlıkça %0.25 bazalt lif kullanım oranlı karışıma kadar dayanım oranı artmıştır. %0.25'lik karışımda (BL15) ise dayanım değeri kontrol karışımına eşdeğer bir mukavemete ulaşmıştır. 56 gün boyunca etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinin dayanım oranı artmıştır. En yüksek dayanım oranı 1.09'luk oranla %0.10'luk lif kullanımı için elde edilmiştir. Bu bulgulara göre, bazalt lifinin doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekletilme süresi arttıkça, lifin bünyesine daha yüksek miktarda çözelti emilimi sağlanmaktadır. Bu işlemle hem alkali dayanımı iyileştiği hem de çimento hidrotasyonunda lifin bağ yeteneğinin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 11. Lif oranı –dayanım oranı ilişkisi (28 günlük eğilme dayanımı).

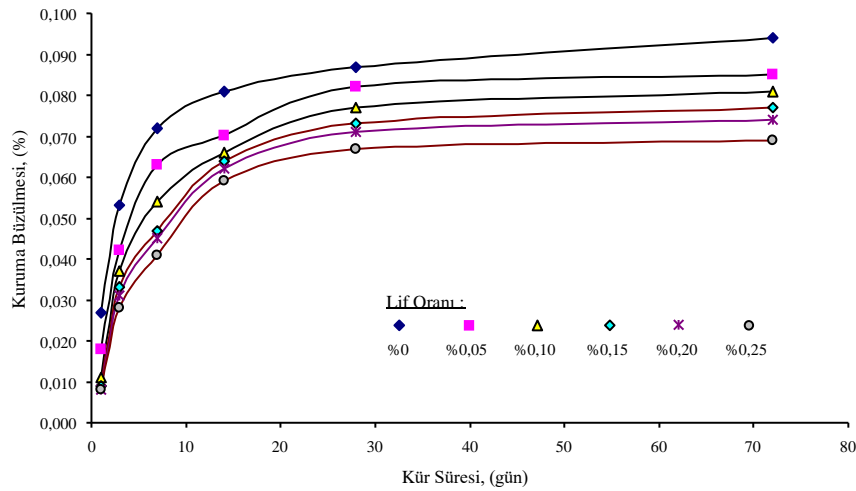
Tüm BLTÇH test numunelerinin eğilme dayanımı değişimi irdelendiğinde ise, yalın BLTÇH test numunelerinin dayanım oranı, lif takviye miktarına bağlı olarak sırasıyla 1.03, 1.06, 1.04, 1.07 ve 1.11 olarak artmıştır. Harç karışımına TiO₂ ilavesiyle dayanım oranındaki bu artış daha belirgin bir değer kazanmış olup, lif

oranı arttıkça eğilme bağlamında dayanım oranı artmakta ve 1.14 değerine kadar ulaşmaktadır. TiO₂ partiküllerinin lif boylarına tutunarak yer yer kaplama rolü üstlendiği ve lifin matris yapıda taşıyıcılık özelliğini geliştirdiği düşünülmektedir. Bu da dayanım oranı artışına neden olmaktadır. Diğer taraftan doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekletilmiş bazalt liflerinin ise çimento matrisinde basınç dayanımına olan etkisine kıyasla daha yüksek bir katma değer sağladığı gözlemlenmiştir. 28 gün boyunca etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinin dayanım oranları 1.06'dan 1.15'e kadar geliştiği, benzer şekilde 56 gün boyunca etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinin dayanım oranları ise 1.07'den 1.17'e kadar gelişmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına benzer olarak, Vyacheslav ve ark. [22] nispeten düşük miktarda bazalt lifi kullanımı ile (%0.2, %0.4, %0.6, %1) bazalt liflerinin çimento harcının basınç dayanımını artırabileceğini tespit etmişlerdir. Bazalt liflerinin doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekletilme süresi arttığında, alkali direnci de artış eğilimi göstermiş ve çimento matrisinde eğilme davranışı bağlamında daha yüksek dayanım oranlarının oluşmasını sağlamıştır. Diğer bir deyişle, alkali direnci kimyasal etkileşimle kuvvetlendirilmiş bazalt lifleri, çimento harcının eğilme mukavemetini artıran lif kullanım oranına göre artırmaktadır. Alkali direnci kuvvetlendirilmiş liflerin çimento hidrasyonunda bağ yapma özelliğinin iyileşmesiyle birlikte lif boyu ekseninde çekme gerilmelerinin arttığı ve buna bağlı olarak eğilmeye karşı mukavemet kazandığı düşünülmektedir.

D. Kuruma Büzülmesi

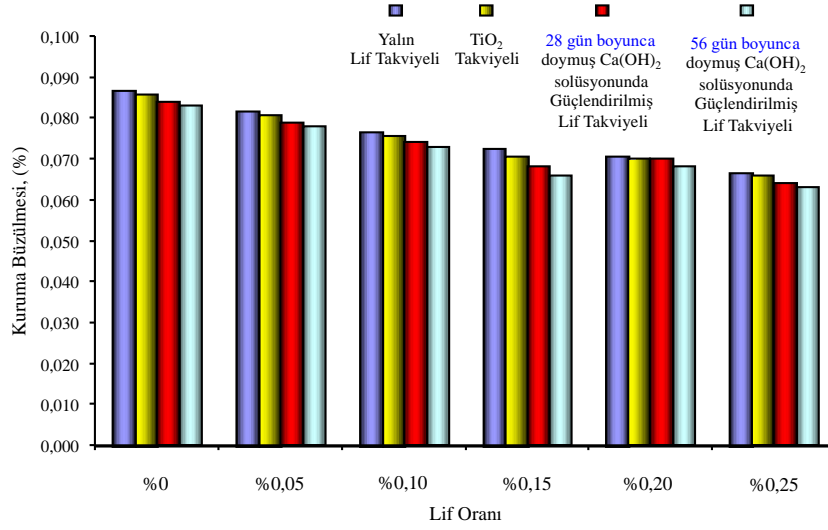
Yalın bazalt lifi ve içeriğinin BLTÇH test numunelerinin kuruma rötre değerleri üzerindeki etkisinin sonuçları ve zamana bağlı kuruma büzülmesi analiz bulguları Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu analizde her bir değer en az üç ölçüm değerinin ortalaması olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, farklı yaşlarda özellikle erken yaşlarda, yalın bazalt lifli numunelerin kontrol karışıma göre daha düşük büzülme sergilediğini göstermektedir. Bazalt lifinin yer almadığı BLTÇH test örneğinde ilk günlerde kuruma büzülme artışı hızlı olup, ilerleyen zamanlarda büzülme hızı düşmektedir. Bu olgunun bazalt lifinin kullanıldığı tüm BLTÇH karışımlarında daha belirgin bir eğilim olduğu görülmektedir. Kuruma büzülmesi testleri tüm test numuneleri için 72 gün süreyle yapılmıştır. 14. günden sonra kuruma büzülme artış hızlarında belirgin bir yavaşlamanın olduğu görülmekle birlikte, 28'inci günden sonra ihmal edilebilir düzeyde düşük bir hızla artışın seyrettiği belirlenmiştir. Kontrol harcı BL0 örneğinin 72 gün sonra kuruma büzülmesi ortalama %0.094 iken yalın bazalt lif karışımların kuruma büzülmesi oranı %0.069-%0.085 aralığındadır. 1 gün ve 3 gün kürlenmiş BL3 nolu harç karışımının (%0.15 bazalt lif) kuruma büzülmesi, kontrol karışım harcından sırasıyla %66.7 ve %37.7 daha düşüktür. Benzer bir eğilim, daha yüksek değerlerde BL5 nolu harç karışımı (%0.25 bazalt lif) için görülmüştür. BL5 harcının kuruma büzülmesi, kontrol karışım harcından 1 gün ve 3 gün için sırasıyla %70.4 ve %47.2 daha düşüktür. Karışımlarda lif içeriği arttıkça, karışımın sergilediği kuruma büzülmesinin değeri düşmektedir. Kür yaşlarının artmasıyla bazalt lifinin karışımın büzülme davranışları üzerindeki etkisi azalmıştır.

BLTÇH test numunelerinin kuruma rötreleri üzerindeki etkisinin sonuçları ve lif oranına bağlı, 1, 3, 7, 14, 28 ve 72 gün boyunca ölçülen harç numunelerinin kuruma büzülmesi değerleri Şekil 12'de verilmiştir. Alkali direnci kuvvetlendirilmesine bakılmaksızın tüm BLTÇH test numunelerinde bazalt lif oranı arttıkça kuruma büzülmesi azalmıştır. Bir yandan, kuruma büzülmesi, erken yaşlarda daha hızlı artsa da daha sonraki yaşlarda kuruma büzülmesinin artış hızı yavaşlamakta ve tüm numuneler için kürlenme süresi ile artmaktadır. Öte yandan, bazalt lifinin kontrol harcına kıyasla harcın kuruma büzülmesini etkili bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, harcın kuruma büzülme değerinin azalması, lif içeriğindeki artışla daha da belirginleşmiştir. Benzer sonuçlar Jiang ve ark. [26] bazalt liflerinin tamir harçlarında kullanımı ile ilgili yaptıkları çalışmada da tespit edilmiştir.



Şekil 12. Yalın BLTÇH test numunelerinin zamana bağlı kuruma büzülme oranı değişimi.

28 günlük yaş sonrası tüm BLTÇH test numunelerinin kuruma rötreleri üzerindeki etkisinin sonuçları ve lif oranına bağlı kuruma büzülmesi analiz bulguları Şekil 13'te verilmiştir. Alkali direnci kuvvetlendirilmesine bakılmaksızın tüm BLTÇH test numunelerinde bazalt lif oranı arttıkça kuruma büzülmesi azalmıştır.



Şekil 13. BLTÇH test numunelerinin lif oranına bağlı kuruma büzülme oranı değişimi (28 gün).

Yalın bazalt lif takviyeli numunelerde kontrol harcına göre kuruma büzülmesi %5.75 - %23 aralığında azalmıştır. TiO₂ katkılı harç numunelerinde ise artan lif oranı bağlamında kontrol harcına göre kuruma büzülmesi %5.81 - %23.3 aralığında azalmıştır. 28 gün ve 56 gün boyunca doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinin kuruma büzülmesindeki değişimleri sırasıyla %6 - %23.8 ve %6 - %24.1 aralığındadır. Bu bulgulara göre doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekleme süresinin bazalt lifin çimento matrisinde kuruma rötreleri üzerindeki etkisinin düşük olduğunu göstermiştir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, işlem görmemiş yalın bazalt liflerinin ve Ca(OH)₂ ile işlem görmüş bazalt liflerinin çimento harcının fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, TiO₂ ilavesinin lif takviyeli çimento harcının özelliklerine etkisi de gözlemlenmiştir. Çalışma bulgularına göre;

1. BL0 harcına göre yalın BLTÇH test numunelerinin yayılma değerlerindeki değişim artan lif oranı bağlamında sırasıyla %8.8, %15.3, %17.1, %18.5 ve %20.8 oranlarında düşmektedir. Benzer olgu harçların sertleşmiş birim hacim kütlelerinde de lif kullanımına bağlı olarak azalma şeklinde tespit edilmiştir.
2. İşlem görmemiş yalın bazalt lifi takviyeli çimento harcı test numunelerinin basınç dayanımı, 28 günlük yaşa ulaştığında ise çimento harcı örneklerinden ağırlıkça %0.05 ve %0.10'luk bazalt lif takviyesinde basınç dayanımlarında %3 ve %6'lık birer artış olmuştur. Ancak, ağırlıkça lif kullanım oranı >%0.15'in üzerine çıktığında ise sırasıyla %4, %8 ve %12'lik dayanım düşüşleri olmuştur.
3. Harç karışımına TiO₂ ilave edilmesiyle birlikte basınç dayanım değerlerinde kontrol harcına kıyasla bir iyileşme gözlenmiş olup, özellikle ağırlıkça %0.15 bazalt lif kullanım oranlı karışıma kadar basınç dayanım değerleri sırasıyla (BL6 – BL8) 1.05, 1.09 ve 1.02 oranlarında iyileşme göstermiştir.
4. Doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekletilmiş bazalt liflerinin ise çimento matrisinde daha etkin bir rol aldığı tecrübe edinilmiştir. 28 gün boyunca etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinden ağırlıkça %0.25 bazalt lif kullanım oranlı karışıma kadar dayanım oranı artmıştır.
5. 56 gün boyunca etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinin basınç dayanım oranı en yüksek dayanım değerleri olarak tespit edilmiştir. Bazalt lifinin doymuş Ca(OH)₂ solüsyonlarında bekletilme süresi arttıkça, lifin bünyesine daha yüksek miktarda çözelti emilimi sağlanmaktadır.
6. Eğilme dayanımlarında ise, çalışma kapsamında test edilen bütün lif türlerinin harç içerisindeki miktarının artması ile harcın eğilme dayanımının iyileştiği tespit edilmiştir. Basınç dayanım değerlerine benzer şekilde, 56 gün etkileşimde bulunan liflerin kullanıldığı karışımların eğilme dayanımları en yüksek değerler olarak gözlemlenmiştir.
7. Yalın bazalt lif takviyeli numunelerde kontrol harcına göre kuruma büzülmesi %5.75 - %23 aralığında azalmıştır. TiO₂ katkılı harç numunelerinde ise artan lif oranı bağlamında kontrol harcına göre kuruma

büzülmesi %5.81 - %23.3 aralığında azalmıştır. 28 gün ve 56 gün boyunca doymuş Ca(OH)_2 solüsyonlarında etkileşimde kalmış BLTÇH test numunelerinin kuruma büzülmesindeki değişimleri sırasıyla %6 - %23.8 ve %6 - %24.1 aralığındadır.

Çalışma kapsamında bazalt liflerinin Ca(OH)_2 ile belirli sürelerde etkileşimde tutularak yüzeylerinin modifikasyonunun sağlanması ile lif takviyeli çimento harçlarının performanslarını iyileştirebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, bazalt liflerinin yüzeylerini TiO_2 ile kaplamak yerine harç karışımlarına serbest şekilde TiO_2 eklenmesinin de lif takviyeli harcın performansını bir miktar iyileştirebildiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Lee, J. J., Song, J., & Kim, H. (2014). Chemical Stability of Basalt Fiber in Alkaline Solution. *Fibers and Polymers*, 15(11), 2329-2334.
- [2] Ralegaonkar, R., Gavali, H., Aswath, P., & Abolmaali, S. (2018). Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review. *Construction and Building Materials*, 164, 589-602.
- [3] Gajanan, D. (2007). Basalt - The Technical Fibre. *Man-made Textiles in India*, 50(7), 258-261.
- [4] Lipatov, Y.V., Gutnikov, S.I., Manylov, M.S., Zhukovskaya, E.S. & Lazoryak B.I. (2015). High alkali-resistant basalt fiber forrein forcing concrete. *Materials and Design*, 73, 60–66.
- [5] Pakharenko, V. V., Yanchar, I., Pakharenko, V.A. & Efanova, V. V. (2008). Polymer composite materials with fibrous and dis-purse basaltfillers. *Fibre Chemistry*, 40(3), 246-252.
- [6] Liu, Q., Shaw, M. T. & Parnas, R. S. (2006). Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation. *Polymer Composites*, 27(1), 40-48
- [7] Jiang, H., Valdez, J. A., Zhu, Y. T., Beyerlein, I. J. & Lowe, T. C. (2000). Strength and Toughness of Bone-Shaped Steel Wire Reinforced Cement. *Composite Science and Technology*, 60, 1753.
- [8] Guo, Z., Wan, C., Xu, M. & Chen, J. (2018). Review of Basalt Fiber-Reinforced Concrete in China: Alkali Resistance of Fibers and Static Mechanical Properties of Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 9198656.
- [9] Huang, K. J. & Deng, M. (2010). Stability of basalt fibers in alkaline solution and its effect on the mechanical property of concrete. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 27(1), 150–154.
- [10] Wydra, M., Dolny, P., Sadowski, G. & Fangrat, J. (2021). Flexural Behaviour of Cementitious Mortars with the Addition of Basalt Fibres. *Materials*, 14(6), 1334.
- [11] Borhan T. M. & Bailey, C. G. (2014). Modelling basalt fibre reinforced glass concrete slabs at ambient and elevated temperatures. *Materials and Structures*, 47(6), 999–1009.
- [12] Wang, L., Chen, Y. & Li, Z. W. (2000). Properties of continuous basalt fiber and composites. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 6(6), 22–24.
- [13] Li, R. Bi, Z., Wang, Y. & Liu, H. Y. (2008). Experimental study on mechanical properties of short basalt fiber self-compacting concrete. *China Concrete and Cement Products*, 2, 48–50.
- [14] Rybin, V. A., Utkin, A. V., & Baklanova, N. I. (2016). Corrosion of uncoated and oxide-coated basalt fibre in different alkaline media. *Corrosion Science*, 102, 503-509.
- [15] TS EN 1015-11, (2020), Kagirharcı - Deneymetotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, TSE, Ankara, s15.
- [16] ASTM C596-09, Standard Test Method For Drying Shrinkage Of MortarContaining Hydraulic Cement, ASTM International
- [17] TS EN 1015-3 Kasım 2000 KagirHarcı- DeneyMetotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayımla Tablası İle) Ankara, TSE.
- [18] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International
- [19] Guo, Y. & Yokota, H. (2018). Performance evaluation of basalt fiber reinforced mortar under freeze-thaw and chloride-rich environments. *Journal of Asian Concrete Federation*, 4(1), 29-34.
- [20] Jiang, C., Fan, K., Wu, F. & Chen, D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, 187-193.
- [21] Jiang, C.H., McCarthy, T.J., Chen, D., & Dong, Q.Q. (2010). Influence of Basalt Fiber on Performance of Cement Mortar. *Key Engineering Material*, 426, 93-96.
- [22] Vyacheslav, S., Tamara, R., Aleksandr, G., & Rozalina, G. (2016). Effective light-weight masonry mortars with dispersed reinforcement. *Procedia Engineering*, 153, 630-637.
- [23] Lipatov, Y. V., Gutnikov, S. I., Manylov, M. S., & Lazoryak, B. I. (2012). Effect of ZrO_2 on the alkali resistance and mechanical properties of basalt fibers. *Inorganic materials*, 48(7), 751-756.
- [24] GB/T 23265-2009, Chopped Basalt Fiber for Cement, Cement Mortar and Concrete, Standards Press of China, Beijing, China, 2009.
- [25] JCT 572-94, Alkali-Resistant Glass Fiber Twistless Roving, Standards Press of China, Beijing, China, 1978.
- [26] Jiang, C., Huang, S., Zhu, Y., Lin, Y., & Chen, D. (2016). Effect of polypropylene and basalt fiber on the behavior of mortars for repair applications. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 5927609.



Araştırma Makalesi - Research Article

Mürdümük (*Lathyrus sativus* L.) Genotiplerinin Yem Kalitesi ve Besleme Değeri

Feed quality and nutritional value of grass pea (*Lathyrus sativus* L.) genotypes

İlknur Yıldırım¹, Erdem Gülümser^{2*}, Hanife Mut³, Uğur Başaran⁴, Medine Çopur Doğrusöz⁵

Geliş / Received: 03/06/2022

Revize / Revised: 19/01/2023

Kabul / Accepted: 23/01/2023

ÖZ

Baklagiller familyasında yer alan mürdümük (*Lathyrus sativus* L.) hayvan besleme açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Bitki kuraklığa toleranslı olup, çok farklı topraklarda rahatlıkla gelişme gösterebilmektedir. Bu araştırma, Bilecik ekolojik koşullarında 4 adet tescilli çeşit (Gap Mavisi, Eren, İptaş ve Karadağ) ve 9 adet Türkiye orjinli yerel populasyon (1603, 2006, 2401, 4301, 4403, 5001, 6408, 6410 ve S3) olmak üzere toplamda 13 adet mürdümük (*Lathyrus sativus* L.) genotipinin bazı kalite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür. Çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Tarımsal Araştırma ve Uygulama arazisinde 2019 yılında ve Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre 3 tekerrürlü yürütülmüştür. Hasat edilen bitkilerin tohumlarında, ham protein oranı, ODAP (N-oxalyl-L-alpha,beta-diaminopropionic acid), toplam fenolik, toplam flavonoid, radikal kovucu aktivite (DPPH) ve kondanse tanen içerikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, yerel populasyonların çeşitler kadar hayvan besleme ve sağlığı açısından iyi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Fitoterapi, Ham Protein, Hayvan Besleme, Hayvan Sağlığı, Mürdümük

ABSTRACT

Grass pea (*Lathyrus sativus* L.), which is in the legume family, has a very important place in terms of animal nutrition. It is highly drought tolerant and can grow easily in many different soils. This research was carried out to determine some quality traits of 4 cultivars (Gap Mavisi, Eren, İptaş and Karadağ,) and 9 local populations (1603, 2006, 2401, 4301, 4403, 5001, 6408, 6410, and S3) originating from Turkey total of 13 grass pea (*Lathyrus sativus* L.) genotypes in Bilecik ecological conditions. The experiment was conducted during the 2019 vegetation periods at the Bilecik Şeyh Edebali University, Agricultural Research, and Application Land, and was arranged in a randomized complete block design with three replications. Crude protein ratio, ODAP (N-oxalyl-L-alpha, beta-diaminopropionic acid), total phenolic, total flavonoid, radical repellent activity (DPPH), and condensed tannin

¹İletişim: yildirim.ilknur.355@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2284-6205>)

Tarla Bitkileri Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilecik, 11230, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: 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, 11230, Türkiye

³İletişim: 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, 11230, Türkiye

⁴İletişim: ugur.basaran@yobu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6644-5892>)

Tarla Bitkileri Bölümü, Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Yozgat, 66100, Türkiye

⁵İletişim: medine.copur@yobu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-9159-1699>)

Tarla Bitkileri Bölümü, Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Yozgat, 66100, Türkiye

contents were determined in the seeds of harvested plants. As a result, it has been determined that the local populations are as good as the varieties in terms of animal nutrition and health.

Keywords- Phytotherapy, Crude Protein, Animal Nutrition, Animal Health, Grass Pea

I. GİRİŞ

Baklagiller (Fabaceae) familyasında yer alan mürdümük (*Lathyrus*) bitkisinin tek veya çok yıllık olmak üzere 160 farklı türü vardır [1]. Mürdümük bitkisinin Türkiye florasında 58 türü (18'i endemik) mevcuttur. Bitki en fazla Güney Doğu Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yayılış göstermektedir [2]. Bitkinin ekonomik olarak en fazla bilinen türler *L. sativus*, *L. cicera* ve *L. ochrus*'dur. Bu türler arasında hem insan hem de hayvan beslenmesinde kullanılan türü ise *L. sativus*'dur. Bu nedenle dünyada tarımı en yaygın olan mürdümük türü *L. sativus*'dur. Daha çok hayvan beslemede yaygın olarak kullanılan tür, tek yıllık olup, genellikle tane üretimi amacıyla yetiştirilmektedir.

Lsativus'un tarımsal yönden birçok üstünlüğü bulunmakla beraber, içerdiği β -N-oxalyl-L- α , β -diaminopropionic acid (ODAP) ile hayvanların bacaklarında geriye dönüşümsüz felce neden olabilmektedir. [3,4]. Lathyrism olarak adlandırılan hastalık insanlarda ve hayvanlarda görülmektedir. Bitki eğer 3-4 ay gibi uzun sürede ve yoğun tüketilirse etkisi ortaya çıkmaktadır [5].

Yem bitkilerde bulunan sekonder metabolitler (fenolik, flavonoid, tanen, vb.) hayvan besleme ve sağlığı açısından son dönemlerde daha da popüler hale gelmiştir. Bu maddeler antioksidan, antitümöral, antiviral ve antibiyotik aktivitelere sahip oldukları bilinmektedir [6]. Özellikle flavonoidler ve fenolik bileşiklerin işkembeli hayvanların sağlığını ve verimliliğini iyileştirdiği yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur [7-9]. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda söz konusu bileşikler içeren bitkiler ile beslenen hayvanların daha sağlıklı, verimlerinin yüksek ve kalitelerinde ise artış olduğu gözlemlenmiştir [10,11].

Tarımsal faaliyetler sırasında kullanılan kimyasallar ile tarım makinaları ve anız yakma faaliyetleri önemli ölçüde sera gazı salınımına neden olmaktadır. Dünya genelinde antropojenik CH₄ salınımının yaklaşık %21-25'i hayvan sindirim sisteminde üretilmektedir [12]. Üretim sistemlerinde açığa çıkan metan gazı ise hayvansal üretim kaybı anlamına gelmektedir. Nitekim açığa çıkan metan üretimi (et, süt vb.) dönüşmeyen enerji anlamına gelmektedir. Bu durum hem hayvanlarda verim ve kalite düşüklüğü hem de küresel ısınmanın artması anlamına gelmektedir. Hem hayvanların verim potansiyelini arttırmak, hem de amonyak ve azot oksit salınımını düşürerek karbon salınımını azaltmak için ruminantların rasyonlarına baklagillerin katılması önem teşkil etmektedir [13]. Nitekim baklagiller yüksek miktarda fenolik, flavonoid ve kondanse tanen içerirken, söz konusu bileşikler de ruminatlarda metanı absorbe ederek salınımını azaltabilmektedirler.

Bu çalışmada Bilecik ekolojik koşullarında denemeye alınan 13 adet mürdümük genotipinin yem kalitesinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Çalışmada 4 adet tescilli çeşit (Gap Mavisı, Eren, İptaş ve Karadağ) ve 9 adet Türkiye (Bursa, Denizli, Kütahya, Malatya, Nevşehir ve Uşak) orjinli yerel populasyon (1603, 2006, 2401, 4301, 4403, 5001, 6408, 6410 ve S3) olmak üzere toplamda 13 adet mürdümük (*Lathyrus sativus* L.) genotipi kullanılmıştır. Çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Tarımsal Araştırma ve Uygulama arazisinde yürütülmüş ve bitkiler kışlık olarak 2019 yılında ekilmiştir.

Tablo 1. Bilecik İli Uzun Yıllar ile Deneme Yılına Ait İklim Verileri

Aylar	Sıcaklık (°C)		Yağış (mm)		Nispi nem (%)	
	Uzun yıllar	2019-2020	Uzun yıllar	2019-2020	Uzun yıllar	2019-2020
Kasım	9.0	12.7	37.2	27.6	71.1	63.0
Aralık	4.5	5.6	55.9	78.4	76.0	78.0
Ocak	2.4	2.4	50.1	45.4	76.5	74.0
Şubat	3.7	5.2	42.0	65.6	73.2	72.1
Mart	6.4	8.6	47.3	34.1	69.3	68.8
Nisan	11.5	10.8	41.8	36.0	64.2	61.0
Mayıs	16.1	16.7	47.7	55.2	64.5	62.0
Haziran	19.9	19.8	39.3	139.1	62.0	59.7
Temmuz	21.7	22.9	30.9	1.2	61.0	63.0
Ortalama	10.6	11.6			68.6	66.8
Toplam			392.2	482.6		

Bilecik Meteoroloji Müdürlüğü

Bilecik ilinin uzun yıllar ve 2019-2020 vejetasyon dönemine (Kasım-Temmuz) ait sıcaklık, yağış ve nispi nem değerleri Tablo 1’de verilmiştir. İlin uzun yıllar ve deneme yılı sıcaklık ortalaması sırasıyla 10.6 °C ve 11.6 °C olmuştur. Uzun yıllar yağış toplam 392.2 mm, 2019-2020 yılında ise 482.6 mm olarak belirlenmiştir. Deneme alanının toprağının pH’sı hafif alkali (7.70) olup, kireç içeriği orta (%7.85) ve tuz içeriği ise (%0.039) azdır. Fosfor içeriği (25.72 kg/da) ve potasyum içeriği (160.50 kg/da) fazla olup, organik madde miktarı ise (%1.25) orta seviye olarak tespit edilmiştir [14].

Çalışma sıra arası 30 cm, sıra uzunluğu 4 m ve 6 sıra olacak şekilde ve elle kurulmuştur. Parsel alanı 4.8 m² olan çeşitlerin tohumluk miktarı ise 60 tohum/m² olacak şekilde hesaplanmıştır. Çalışma Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre 3 tekerrürlü olarak kurulmuştur. Ekim işlemi 20.11.2019 tarihinde yapılmıştır. Ekimle birlikte dekara 8 kg P₂O₅ gelecek şekilde DAP gübresi verilmiştir. Bitkilerin hasadı, tohum hasat olgunluğuna (alt baklaların olgunlaşmaya başladığı dönem geldiği zaman) geldiği dönemde (10.07.2020) gerçekleştirilmiştir. Hasat yapılan bitkilerin harmanlama işleminden sonra tohumları ayrılmış ve analize hazır hale getirilmiştir.

ODAP İçeriği: ODAP analizi Rao[15] tarafından bildirilen OPT (o-phthalaldehide) metoduna göre yapılmıştır. OPT; O-fitalaldehit reaktifi, borat tamponu ve mercaptoetanol ile karıştırılarak hazırlanmış ve standart olarak diaminopropionik asit (DAP) kullanılmıştır. Toz haline getirilen tohum (2 g) örnekleri deney tüpüne konularak üzerine 2 ml saf su eklenmiştir. Tüpler kaynar suda tutularak oda sıcaklığına soğutulmuş ve santrifüjlenmiştir. Tüpten alınan berrak çözeltiliye 0.2 ml 3 N KOH eklenerek 30 dakika kaynar suda bekletilmiştir. Hidrolizden sonra, tüpe 0.7 ml su ve 2 ml OPT ilave edilmiş ve spektrofotometrede cihazında 25 nm’de okuma gerçekleştirilmiştir.

Ham Protein İçeriği: Laboratuvarda el değirmeninde öğütülen tohumlarının azot tayinleri Kjeldahl yöntemi ile belirlenmiştir. Belirlenen bu azot miktarları ise 6.25 katsayısı ile çarpılıp ham protein oranları hesaplanmıştır.

Toplam Fenolik İçeriği: Mürdümük tohumlarının toplam fenolik madde içeriklerinin belirlenmesinde Singleton ve Rossi [16]’nin metodu kullanılmıştır. Kısmi olarak modifikasyona uğratılan metoda göre, sıvı olarak ekstrakt edilen 0.2 ml örnek üzerine 1 ml seyreltilmiş (1:10) Folin Ciocalteu ayırıcı ile 1.8 ml saf su ile eklenmiştir. Daha sonra örneklerin üzerine %2’lik sodyum karbonattan (Na₂CO₃) 2 ml ilave edilmiş ve tüplerin ağızları sıkıca kapatılmıştır. Tüpler iyice karıştırıldıktan sonra 2 saat karanlık ortamda bekletilmiştir. Örneklerin okunma işlemi spektrofotometre cihazında ve 734 nm’de yapılmıştır.

Toplam Flavonoid İçeriği: Mürdümük tohumlarının toplam flavonoid içerikleri Arvouet-Grand ve ark. [17]’nin metoduna göre belirlenmiştir. Buna göre 200 mg/L quercetin stok çözeltisi konsantrasyonu hazırlanarak bu konsantrasyondan seyreltilerek beş farklı konsantrasyon elde edilmiştir. Öğütülen ve ekstark haline getirilen örneklerden 1 ml alınmış ve üzerine %2’lik AlCl₃ ilave edilerek 10 dakika oda koşullarında bekletilmiştir. Daha sonra numunelere 415 nm absorban değerinde spektrofotometre ile okunmuştur.

Radikal Kovucu Aktivitelerin (DPPH) İçeriği: Mürdümük tohumlarının DPPH içerikleri Faller ve Fialho [18]’nin bildirdiği metota göre belirlenmiştir. Öğütülen ve ekstark haline getirilen 0.1 ml örnek üzerine 3.9 ml DPPH (Sigma, ABD) solüsyonu (0.1 mM ve %80’lik metanolde hazırlanmış) eklenmiştir. Ağızı alüminyum folyo ile kapatılan örnekler 30 dk süreyle karanlık odada bekletilmiştir. Daha sonra örnekler 517 nm absorban değerinde spektrofotometrede okunmuştur. Örneklerin DPPH içerikleri belirlenmesinde ise aşağıda verilen formül kullanılmıştır.

$$\% \text{ Inhibisyon} = \frac{[(\text{Abskontrol} - \text{Absekstrakt}) / \text{Abskontrol}]}{1} \quad (1)$$

Ekstrakte Edilebilir Kondanse Tanen İçeriği: Mürdümük tohumlarında kondanse tanen içeriği Bate-Smith [19]’in yöntemine göre yapılmıştır. Öğütülen mürdümük tohumlarında 0.01 gr örnek tartılmış ve üzerine 6 ml tanen çözeltisi (50 µl Fe FeCl₃, 250 µl tanen ekstraktı ve 1.5 ml Bütanol-HCl) ilave edilmiştir. Vortex yardımıyla iyice karıştırılan örnekler daha sonra 100 °C de 1 saat soğutulmaya bırakılmıştır. Örneklerde okuma işlemi spektrofotometre yardımıyla 550 nm’de gerçekleştirilmiştir. Kondanse tanenin belirlenmesinde aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\text{Kondanse tanen: Absorbans (550 nm x 156,5 x seyreltme faktörü) / Kuru ağırlık (\%)} \quad (2)$$

Verilerin değerlendirilmesi: Çalışma sonucundaki bulguların istatistiksel analizleri Tesadüf Blokları Deneme Desenine göre ve SPSS 22.0 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ortalamaları arasındaki farklılıkların karşılaştırılmasında ise Duncan testi kullanılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Farklı mürdümük genotipleri arasında ODAP, toplam fenolik, DPPH ve kondanse tanen içeriği bakımından %1, toplam flavonoid içeriği bakımından %5 önemlilik seviyesinde farklılık olmuştur. Ham protein oranının genotipler üzerinde etkisi ise istatistiksel olarak önemsiz olmuştur (Tablo 2).

Mürdümük genotiplerinin ham protein oranı %26.03 ile %28.00 arasında değişmiştir. Gençkan [20]. (1992) mürdümük bitkisinin yüksek protein içerdiğini ve bu nedenle büyükbaş ve küçükbaş hayvancılık ile kanatlı hayvan yetiştiriciliğinde önemli bir yeri olduğunu bildirmiştir. Türkiye'nin farklı bölgelerinden toplanan çeşitli Lathyrus türlerinin ham protein sonucunda protein içeriği %24.07-30.90 arasında olmuştur [21].

Hayvan ve insan beslenmesinde büyük öneme sahip olan mürdümük bitkisi tarımını sınırlandıran en önemli faktörlerin başında ODAP içeriği gelmektedir. ODAP serbest bir amino asit olup, sinir sistemi üzerine direk olumsuz etkisi bulunduğu için istenmeyen bir özelliktir. Bu nedenle Düşük ODAP içerikli ya da ODAP bulunmayan mürdümük çeşitlerinin geliştirilmesi, mürdümük tarımının yaygınlaştırılmasında büyük avantaj sağlamaktadır. Çalışmada en düşük ODAP içeriği İptaş (1.28 mg/g) ve Eren (1.39 mg/g) çeşitlerinde belirlenirken, yerel popülasyonlarının ODAP içeriği ise genel olarak çeşitlerden yüksek olmuştur. Ancak Jiao vd. (2006) yapmış oldukları çalışmada uygun azot ve fosforlu gübreleme ile mürdümük bitkisinin ODAP içeriğinin azaltılabileceği bildirmişlerdir. Başaran [22] Türkiye'nin farklı bölgelerinden topladığı mürdümük popülasyonlarında ODAP oranının 1.40-3.05 mg/g arasında değiştiğini bildirmiştir. Mevcut çalışmadan elde edilen değerler söz konusu araştırmacının bulguları arasında yer almıştır.

En yüksek toplam fenolik içeriği 0.868 mg GA/g ile 6408 yerel popülasyonunda, en düşük ise 5001 (0.286 mg GA/g) yerel popülasyonu ile Gap Mavisi (0.341 mg GA/g) ve Eren (0.327 mg GA/g) çeşitlerinde tespit edilmiştir (Tablo 2). Mammadov [23] fenolik bileşiklerin bitkilerin hayatlarını devam ettirmelerini sağlayan enerji kaynağı olduğunu bildirmiştir. Araştırmacı aynı çalışmada bitkilerin stres koşullarında fenolik bileşiklerini sentezleyerek gelişimlerine devam ettirdiğini belirtmiştir. Fenolik bileşikler içeren yem bitkileri fitoterapik özellik göstermektedirler. Bu sayede hayvanlar daha sağlıklı olurken, hayvansal ürünlerin verim ve kalitesi de artmaktadır [24]. O'Connell ve Fox [25] ise fenolik bileşik içeren yemlerin süt ve süt ürünlerinin tat ve aromasına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

En yüksek toplam flavonoid içeriği 0.667 mg QE/g ile 4403 yerel popülasyonu ve 0.484 mg QE/g ile Gap Mavisi çeşidinde tespit edilmiştir (Tablo 2). Flavonoidler bitkilerin çevresel kaynaklı stres koşullarına karşı dayanıklılık mekanizmasını güçlendirirken, hücre büyümesini düzenlemek ve tozlaşmaya yardımcı olmak gibi farklı rollere de sahiptir [26-28]. Ayrıca flavonoidler, antioksidatif ve antimikrobiyal özellik gösterdiğinden dolayı hayvan sağlığı bakımından önem teşkil etmektedir ve hayvansal ürünlerin kalitesini de artırmaktadır [29,30].

Tablo 2. Mürdümük genotiplerine ait bazı kalite özellikleri

Genotip	HPO (%)	ODAP (mg/g)**	TF (mg GA/g)**	TFL (mg QE/g)*	DPPH (%)**	KT (%)**
1603	27.13	2.07 cd	0.597 de	0.106 b	3.637 d	0.733 b
2006	28.00	2.22 bcd	0.638 cd	0.133 b	3.532 d	0.383 de
2401	27.83	2.39 abc	0.570 e	0.073 b	5.147 b	0.413 d
4301	27.48	2.76 abc	0.408 f	0.080 b	3.732 d	0.173 g
4403	27.56	3.29 a	0.611 de	0.667 a	5.061 b	0.737 b
5001	27.04	2.64 abc	0.286 g	0.104 b	5.350 b	0.367 e
6408	27.39	2.41 abc	0.868 a	0.137 b	4.517 c	0.743 b
6410	27.78	2.68 abc	0.611 de	0.075 b	3.507 d	0.747 b
S3	26.73	3.06 ab	0.678 bc	0.076 b	6.567 a	0.510 c
Gap Mavisi	27.50	2.95 abc	0.341 g	0.484 a	5.314 b	0.510 c
Karadağ	27.45	2.06 cd	0.611 de	0.148 b	4.317 c	0.247 f
İptaş	27.43	1.28 d	0.732 b	0.144 b	6.369 a	0.730 b
Eren	27.55	1.39 d	0.327 g	0.129 b	3.834 d	0.910 a
Ortalama	27.45	2.40	0.560	0.181	4.683	0.554

*(p<0.05); **(p<0.01): HPO: Ham protein oranı; TF: Toplam fenolik; TFL: Toplam flavonoid; KT: Kondanse tanen.

En yüksek radikal kovucu aktivite değeri %6.567 ile S3 yerel popülasyonu ile %6.369 ile İptaş çeşidinde belirlenmiştir (Tablo 2). Bitkilerin antioksidan özelliklerinin değerlendirilmesinde en önemli yollardan birisi radikal kovucu aktivitelerin (DPPH) belirlenmesidir. Yüksek DPPH bitkilerde yüksek antioksidan anlamına gelir. Antioksidanlar gerek insan gerek hayvan hastalıklarının önlenmesinde önem teşkil etmektedir. Son dönemlerde rumen sağlığı üzerine yapılan çalışmalarda, bitkilerin DPPH içeriklerinin belirlenmesi popüler konular arasında

yer almıştır. Lathyrus türleri üzerinde yapılan çalışmalarda bitkinin DPPH içeriği %0.0035-44.16 arasında olmuştur [31-33]. Farklılıklar kullanılan türler, lokasyonlar, kültürel işlemler ve bitkisel aksamalardan kaynaklanmıştır.

Mürdümük genotiplerinde kondanse tanen içeriği en yüksek 0.910 (Eren çeşidi) mg/g, en düşük ise 0.173 (4301 yerel popülasyonu) mg/g olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Kondanse tanenler ruminantlardan açığa çıkan ve küresel ısınmaya neden olan metan gazı salınımını azaltılması için önem teşkil etmektedir. Bu nedenle özellikle de baklagiller kondanse tanen bakımından zengin olup, rasyonlarda yer alması hayvanların verim ve kalitesini artırırken, amonyak ve azot oksit salınımını düşürerek karbon tutumunu artırmaktadır [13]. Barry [34] ile Kumar ve Singh [35] bitkilerde düşük tanen seviyesinin (%2-3 gibi) rumendeki protein bozulmasını azalttığını, yüksek miktardaki tanenin ise protein sindirimi ile birlikte mikrobiyal ve enzim faaliyetlerini olumsuz şekilde etkilediğini bildirmişlerdir. Çalışma tüm genotiplerin kondanse tanen içeriği %2-3'den düşük olmuştur.

IV. SONUÇLAR

Son yıllarda yem bitkilerinde fitoterapi konusu cezbedici hale gelmiştir. Bu durum üreticilerin hayvan sağlığı ve beslenmesi üzerinde daha bilinçli hale geldiğinin göstermektedir. Bitkilerin fitoterapik özelliği içermiş oldukları fenolik ve flavonoid gibi bileşikler ile ilişkili olup, bu bileşikler ise hayvan sağlığı yönünden son derece önemlidir. Diğer taraftan artan dünya nüfusu beslenme sorununu, dolayısıyla da küresel ısınmayı beraberinde getirmiştir. Küresel ısınma üzerinde tarımsal faaliyetlerin etkisinin fazla olduğu bilinen bir gerçek olup, tarımsal faaliyetler arasında en fazla pay ise ruminantlara aittir. Hem hayvansal beslenme ve hayvan sağlığı hem de küresel ısınma payını azaltmak için ise baklagil yem bitkileri önemli bir yere sahiptir. Bilecik ekolojik koşullarında farklı mürdümük genotiplerinin yem kalitesi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yürütülen çalışma sonucunda kullanılan popülasyonlar hayvan besleme ve sağlığı açısından ümit var olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmadan elde edilen sonuçlar söz konusu popülasyonlar ile ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya maddi destek sağlayan, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederiz. (2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Başvuru numarası: 1919B012112040).

KAYNAKLAR

- [1] Plitmann, U., Gabay, R., & Cohen, O. (1995). Innovations in the tribe Viciae (Fabaceae) from Israel. *Israel Journal of Plant Sciences*, 43, 249–258.
- [2] Davis P.H. (1970). Flora of Turkey and East Aegean Islands. Edinburgh, ss. 328-369.
- [3] Rao S.L.N., Adiga, P.R., & Sarma, P.S. (1964). The isolation and characterization of β n-oxalyl-1- α , β -diaminopropionic acid: a neurotoxin from the seeds of *Lathyrus sativus*. *Biochemistry*, 3(3), 432-436.
- [4] Hanbury C. D., White C. L., Mullan B.P. & Siddique K. H. M. (2000). Are view of the potential of *Lathyrus sativus* L. and *Lathyrus Cicera* L. grain for use as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 10546, 1–27.
- [5] Mehta S.L., Ali, K., & Barna, K.S. (1994). Somaclonal variation in a food legume – *Lathyrus sativus*. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 3, 73–77.
- [6] Stewart, A.J., Bozonnet, S., Mullen, W., Jenkins, G.I., Lean, M.E.J., & Crozier, A. (2000). Occurrence of flavonols in tomatoes and tomato-based products. *Journal of Agricultural and Food*, 48(7), 2663–2669.
- [7] Rochfort, S., Parker, A.J., & Dunshea, F.R. (2008). Plant bioactives for ruminant health and productivity. *Phytochemistry*, 69(2), 299–322.
- [8] Patra, A.K., Kamra, D.N., & Agarwal, N. (2006). Effect of plant extracts on in vitro methanogenesis, enzyme activities and fermentation of feed in rumen liquor of buffalo. *Animal Feed Science and Technology*, 128 (3-4), 276–291.
- [9] Lee, S.H.Y., Humphries, D.J., Cockman, D.A., Givens, D.I., & Spencer, J.P.E. (2017). Accumulation of citrus flavanones in bovine milk following citrus pulp incorporation into the diet of dairy cows. *EC Nutrition*, 7(4), 143-154.
- [10] Dohi, H., Yamada, A., & Fukukawa, T. (1997). Intake stimulants in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) fed to sheep. *Journal of Dairy Science*, 80, 2083–2086.
- [11] Robbins, R.J. (2003). Phenolic acids in foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 2866–2887.
- [12] Lascano, C.E., & Cárdenas, E. (2010). Alternatives for methane emission mitigation in livestock systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 175-182.
- [13] Undi, M., Wittenberg, K., McGeough, E.J., & Ominski, K.H. (2016). Impact of forage legumes on greenhouse gas output and carbon footprint of meat and milk. *The journal of the International Legume Society*, 12, 26-28.

- [14] Kacar, B., & Kovancı I. (1982). Bitki, Toprak ve Gübrelerde Kimyasal Fosfor Analizleri ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi. Ege Üniv. Ziraat Fakültesi Yayınları, No:354
- [15] Rao, S.L.N., & Sensitive, A. (1978). Specific colorimetric method for determination of α , 19 β -diaminopropionic acid and Lathyrus sativus neurotoxin. *Analytical Biochemistry*, 86, 386-395.
- [16] Singleton, V.L., & Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdicphosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144-158.
- [17] Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P. (1994). Standardisation d'un extrait de propolis et identification des principaux constituants. *Journal de pharmacie de Belgique*, 49, 462-468.
- [18] Faller, A., & Fialho, E. (2009). The antioxidant capacity and polyphenol content of organic and conventional retail vegetables after domestic cooking. *Food Research International*, 42, 210-215.
- [19] Bate-Smith, E.C. (1975). Phytochemistry of proanthocyanidins. *Phytochemistry*, 14, 1107-1113.
- [20] Gençkan, M.S. (1992). Yem Bitkileri Tarımı. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Bornova-İzmir, ss. 249-254.
- [21] Başaran, U., Onal, Asci, O., Mut, H., Acar, Z., & Ayan, İ. (2011). Some quality traits and neurotoxin β -n-oxalyl-l- α , β -diaminopropionic acid (B-ODAP) contents of Lathyrus sp. cultivated in Turkey. *African Journal of Biotechnology*, 10(20), 4072-4080.
- [22] Başaran, U. (2010). *Türkiye'nin farklı yörelerinde yetiştirilen mürdümük (Lathyrus sativus L.) populasyonlarının tarımsal özellikleri protein içerikleri ve ODAP düzeylerinin belirlenmesi*. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun.
- [23] Mammadov, R. (2014). Tohumlu Bitkilerde Sekonder Metabolitler. *Nobel Akademik Yayıncılık ve Eğitim Danışmanlık Ticaret Limited Şirketi Yayınları*, Ankara, Yayın No: 20779,
- [24] Kuhnen, S., Moacyr, J.R., Mayer, J.K., Navarro, B.B., Trevisan, R., Honorato, L.A., Maraschin, M., & Pinheiro Machado Filho, L.C. (2014). Phenolic content and ferric reducing-antioxidant power of cow's milk produced in different pasture-based production systems in southern Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 3110-3117.
- [25] O'Connell, J.E., & Fox, P.F. (2021). Significance and application of phenolic compounds in the production and quality of milk and dairy products: a review. *International Dairy Journal*, 11, 103-120.
- [26] Kumar, S., & Pandey, A.K. (2013) Chemistry and biological activities of flavonoids: an overview. *Scientific World Journal*, 16. doi.org/10.1155/2013/162750.
- [27] Xiao, J., Kai, G., Yamamoto, K., & Chen, X. (2013) Advance in dietary polyphenols as α -glucosidases inhibitors: a review on structure-activity relationship aspect. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(8), 818-836.
- [28] Zhan, J., Liu, M., Su, X., Zhan, K., Zhang, C., & Zhao, G. (2017). Effects of alfalfa flavonoids on the production performance, immune system, and ruminal fermentation of dairy cows. *Archive of Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(10), 1416-1424.
- [29] Ahmadipour, B., Hassanpour, H., Asadi, E., Khajali, F., Rafiei, F., & Khajali, F. (2015) *Kelussia odoratissima* Mozzaf- A promising medicinal herb to prevent pulmonary hypertension in broiler chickens reared at high altitude. *Journal of Ethnopharmacology*, 159, 49-54.
- [30] Ahmadipour, B., Kalantar, M., Hosseini, S.M., Yang, L.G., Kalantar, M.H., Raza, S.H.A., & Schreus, N.M. (2017) Hawthorn (*Crataegus oxyacantha*) Extract in the Drinking Water of Broilers on Growth and Incidence of Pulmonary Hypertension Syndrome (PHS). *Brazilian Journal of Poultry Science*, 19(4), 639-644.
- [31] Heydari, H., Saltan, G., Bahadır Açıkar, Ö., Yılmaz, S., Çoban, T., & Tekin, M. (2015). *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 12(3), 369-376.
- [32] Yazici, S.O., Ozmen, I., Yildirim, B., Genc, H., Ozeloglu, B., Gülsün, M., Elmas, H., & Ozcaka, S. (2020). Biochemical composition of Lathyrus L. seeds: antioxidant activities, phenolic profiles, β -odap and protein contents. *Legume Research*, (43):723-727.
- [33] Eyiş, E., & Karadeniz Pekköz, A. (2021). Radical scavenging activity of some lathyrus taxa distributed in Burdur-Isparta Regio. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 121-126.
- [34] Barry, T.N. (1987). Secondary compounds of forages. *Nutrition of Herbivores* Academic Press, Sydney, s. 91-120.
- [35] Kumar, R., & Singh, M. (1984). Tannins: Their adverse role in ruminant nutrition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 32, 447- 453.



Araştırma Makalesi -Research Article

Kütüphane Bireysel Çalışma Odaları İçin Bir Tasarım Önerisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Örneği

A Design Proposal for Library Individual Study Rooms: the Case of Kütahya Dumlupınar University

Merve Buldaç^{1*}, Turgut Kalay²

Geliş / Received: 12/06/2022

Revize / Revised: 27/01/2023

Kabul / Accepted: 07/03/2023

ÖZ

Yaşama ilgili her türlü eylem için mekân/iç mekân olgusundan bahsetmek mümkündür. Barınma gereksinimiyle ortaya çıkan iç mekân deneyimi, zamanla değişen bireysel ve toplumsal istekler, gereksinimler ve beğeniler doğrultusunda şekil değiştirmeye başlamış, insanların her türlü eylemlerini gerçekleştirebildikleri ve zaman geçirdikleri her alanda iç mekân deneyimi gerçekleşmeye başlamıştır. Bunlardan biri de kütüphane mekânları olmuştur. Farklı türlere sahip olan kütüphane mekânlarından çalışma kapsamında da incelenen üniversite kütüphanelerinin, kullanıcıların uzun süreli gereksinimlerine cevap verebilecek nitelikte mekânlar olmaları en birincil tasarım hedefleri arasında yer almaktadır. Kütüphaneler, güvenli ve sessiz mekânlar olmasının yanında, bilgiye ulaşma noktasında rahat ve kolay olanaklar sunmaktadır. Kütüphane mekânının önemli bölümlerinden biri olan bireysel çalışma odaları, kullanıcılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedirler. Fiziksel ve ruhsal anlamda kişiye daha rahat çalışma ve motivasyon ortamı sunabilmesi için, tasarım ölçütleri göz önünde bulundurularak doğru bir kurguyla çözümleri önem taşımaktadır. Bu görüşten yola çıkarak çalışmanın örneklem alanını oluşturan Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Şehit Astsubay Ömer Halisdemir Kütüphanesi bireysel çalışma odalarının, kullanıcı üzerinde yarattığı fiziksel ve ruhsal etkilerinin irdelenmesi planlanmaktadır. Araştırmada, katılımcı/gönüllü olan kullanıcılarla birlikte stapel ölçeğine uygun olarak hazırlanmış bir anket çalışması ve yerinde gözlemlerle fiziksel ve ruhsal etkilerin ölçülmesi ve elde edilen bulgular neticesinde tasarım önerisi geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Öğrencilerin ve akademik personelin çalışmasına imkân tanıyan bireysel çalışma odalarının; iç mekânı oluşturan bileşen ve yapılar üzerinden fiziksel etki değerleri ve kullanıcı üzerinde oluşan algı ve hisler üzerinden ölçülen ruhsal etki değerleri neticesinde olumlu ve olumsuz yönleri ortaya konularak, mevcut düzenin iyileştirilmesi gerekçesiyle bu çalışma yapılmak istenmektedir.

Anahtar Kelimeler- İç Mimarlık, Üniversite Kütüphaneleri, Bireysel Çalışma Odası, Stapel Ölçeği, Tasarım Önerisi

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: merve.buldac@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8390-0175>)

İç Mimarlık Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Evliya Çelebi Yerleşkesi, Kütahya, Türkiye

²İletişim: turgut.kalay@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8532-1203>)

İç Mimarlık Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Evliya Çelebi Yerleşkesi, Kütahya, Türkiye

ABSTRACT

It is possible to talk about the concept of space/indoor space for all kinds of actions related to life. One of them was the library spaces. Individual study rooms, which are one of the important parts of the library space, are frequently preferred by users. In order to provide a more comfortable working and motivational environment for the person in the physical and spiritual sense, it is important that they are solved with the right setup, taking into account the design criteria. Based on this view, it is planned to examine the physical and mental effects of the individual study rooms of the Kütahya Dumlupınar University Şehit Astsubay Ömer Halisdemir Library, which constitutes the sample area of the study. In the research, it is aimed to measure the physical and mental effects with on-site observation and a questionnaire prepared in accordance with the staple scale, together with the participant/voluntary users, and to develop a design proposal as a result of the findings. Individual study rooms that allow students and academic staff to work; This study is desired to be carried out on the grounds of improving the existing order by revealing the positive and negative aspects as a result of the physical impact values on the components and structures that make up the interior, and the psychological impact values measured on the perception and feelings on the user.

Keywords- Interior Design, University Libraries, Individual Study Room, Stapel Scale, Design Proposal

I. GİRİŞ

Tasarım disiplinlerinde, özellikle mimarlık/içmimarlık gibi disiplinlerde bireylerin gereksinim, istek ve beğenileri doğrultusunda mekânlar tasarlamak en birincil hedeftir. Tarihsel süreçte önceleri temel hedef barınma gereksinimini karşılamak iken, zamanla değişen toplumsal yapı ve bunun paralelinde artan farklı talepler ve arzular ile mekânlar şekil değiştirmeye ve farklı işlevleri de içinde barındırmaya başlamıştır. Dolayısıyla bireysel ya da toplumsal, içinde birtakım eylemlerin gerçekleştiği mekânlar üretilmiş, üretilmeye de devam etmektedir.

Çalışma kapsamında da incelenmesi amaçlanan ve toplumsal bir gereksinime yanıt veren üniversite kütüphane yapıları da kendi içinde birçok eylemi ve işlevi barındıran mekânlar arasında yer almaktadır. Bu mekânlarda önemli olan; doğru çözülmüş bir mekânsal organizasyonla bu mekânların kullanıcıya sunulmasıdır. Çalışmanın örneklemini oluşturan Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Şehit Astsubay Ömer Halisdemir Kütüphanesi bireysel çalışma odaları için de mekânsal organizasyonun, (içinde barındırdığı fiziksel ve estetik öğeler göz önünde bulundurularak) konuya ilişkin literatür taraması, yerinde gözlemlerle değerlendirme/analiz yapılması ve mevcut düzen üzerinden oda kullanıcılarıyla gönüllü katılımcı esasına dayanan bir anket çalışması ile elde edilen veriler kapsamında değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Anket çalışmasında nitel araştırma tekniği kullanılacak ve elde edilen tüm verilerin bütüncül ve gerçekçi bir biçimde sunulması sağlanacaktır. Proje sürecinde belirlenen tüm sorunlar ve getirilecek çözüm önerisi/leri sonucunda içmimarlık disiplini açısından ilgili konu hakkındaki literatürün zenginleştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

A. Mekân/İç Mekân Kavramları

Mekân kavramına ilişkin geçmişten bugüne farklı tanımlar getirildiği görülmektedir. İngilizce karşılığı “space” olan mekân kavramı için Türk Dil Kurumu; “yer, bulunan yer, ev, yurt” şeklinde bir tanım getirmiştir [1]. Aristoteles anlayışında mekân kavramı, ortak ve özel yer olarak ikiye ayrılmaktadır. Ortak yer (toposkoinos); bütün nesnelere bir arada bulunma hali iken; özel yer (idiostopos); tek bir nesnenin orada bulunma hali olarak tanımlanmaktadır [2]. Platon ise, mekânın her şeyi bir kap gibi içine aldığı belirtmektedir [3]. Lefebvre’ye göre ise “Mekânın orijin noktası bedendir. Böylelikle algılanır, yaşanılır ve üretilir” [4]. Mekân, biçimsellik kadar insan yaşamına ilişkin birtakım özellikleri de içinde barındırması gerekmektedir [5]. Dolayısıyla insan eylemlerinin gerçekleştiği, sahiplenme duygusu yaratan, somut ya da soyut olarak insanı çevreleyen, yatay ve düşey elemanları olan üç boyutta algılanabilir düzenlemelerdir tanımı getirilmiştir [6] (Tablo 1).

Tablo 1. Somut-Soyut Algılama Biçimleri (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Somut Algılama	Soyut Algılama
Yapısal düzenin ve kurgunun duyu organları ile algılanması	Siyasi Kültürel Ekonomik Toplumsal Anlamsal

Mekânın meydana gelmesinde çeşitli bileşen ve öğeler önemli rol oynamaktadır. Mekânın örgütlenmesine yardımcı olan bu öğeler; belirleyici, yönlendirici, sınırlayıcı, odaklayıcı, anlam taşıyıcı, ayırıcı ve süreklilik

sağlayıcı, birleştirici gibi çeşitli roller üstlenmektedir [7]. Kişinin mekânı algılamasına yardımcı olmaları açısından önemli bileşenler olarak kabul edilmektedirler. Ayrıca bu bileşenler, iç mekân denen olguyu algılamak noktasında da önemli belirleyiciler olarak gösterilebilir.

İnsanoğlunun var oluşu ile iç mekân denen olgu da var olmuştur. Doğası gereği dışardan gelebilecek tüm risk ve olumsuz etkilere karşı kendisini ait/güvende ve rahat hissedebildiği, sınırları tanımlı bir alanın parçası olma eğiliminde olmuş, olmaya da devam etmektedir. Değişen ve gelişen zamanla birlikte bireylerin istek ve talepleri de değişiklik göstermiş ve bu doğrultuda barınma/korunma ile sınırları belirlenmiş iç mekânlar çok farklı işlevler üstlenen çeşitli hacimlere dönüşmeye başlamıştır.

Mekâna hareket ve zaman boyutunu, bireyin ilişki ve eylemliliği kazandırmaktadır. Geçirilen zaman/hareket yoğunluğuna göre mekânın tasarımı da farklılık göstermeye başlamaktadır. İlgili hacim içinde zaman geçiren ya da yer alan birey, oraya ait dolaşım, ışık, renk, koku, ısı vb. fiziksel her türlü örgütlenme ile de iletişim halindedir [8]. Biçim, işlev, konfor, estetik, güvenlik, görevsellik ve boyutsal özellikler kendi içinde iyi organize olmuş ve uyum gösteriyor ise mekânın başarısından söz etmek mümkündür [9]. Bir iç mekânın oluşabilmesi ve bir takım fiziksel örgütlenmelerden bahsedilebilmesi için iç mekânı oluşturacak olan kabuğun yedi temel bileşenden meydana gelmesi gerekmektedir. Bu temel bileşenler; döşeme, kolon, giriş, duvar, pencere, kapı ve merdiven olarak isimlendirilmekte ve iç mekânı oluşturdukları kadar mekânın dışarıyla olan ilişkisini de net bir şekilde tanımlamaktadırlar. Bu bileşenlerin yanı sıra bir iç mekânın oluşması ve kullanıcı tarafından algılanabilmesi için; renk, malzeme, ışık, doku/tekstil, donatı ve aksesuar gibi estetik öğeler de bulunmaktadır. Hem fiziksel hem de estetik öğelerin bir araya gelerek tasarlandığı mekânlar iç mekân tanımını da güçlendirmektedir. Burada önemli olan iç tanımına sahip alanların kullanıcı ile kurduğu ilişkidir. Çift taraflı kurulan bu ilişkide, çevre ve nesnelere kurulan ilişkiden de bahsedilmeye başlanmaktadır. Her mekânın farklı niteliklere, hizmete, kullanıcılara vb. cevap vermesinden dolayı iç mekân tasarımları da farklı şekillenmektedir. Çalışma kapsamında incelenen kütüphane mekânları da kullanıcı-mekân etkileşiminde önemli örnekler arasında yer almaktadır.

B. Üniversite Kütüphaneleri ve İç Mekân Tasarım Yaklaşımları

İlk bilgi kayıt ortamlarının oluşturulması ve bunları saklama-arşivleme isteği, kütüphane oluşturma konusunda bir gereksinim duyulmasına kaynak olmuştur. Üretilen veri materyallerini çoğaltma, biriktirme, bir araya getirme, geleceğe aktarma ve kullanma açısından mekânların gelişiminde bu gereksinim oldukça önemli rol oynamıştır [10]. Tüm kütüphane mekânlarına genel olarak bakıldığı zaman; teknik ve kullanıcı hizmetleri ve yönetsel olarak tanımlanan işlevlerin toplumsal ölçekte bakıldığı zaman dört temel etkinliğe yönelik olduğu görülmektedir. Bunlar eğitim, kültür, bilgi ve boş zamanı değerlendirme etkinlikleri olarak tanımlanabilir [11]. Eğitim işlevi, kişi ya da toplumların kendilerini geliştirebilmek için gereksinim duyulan kaynaklara erişimin sağlanması, dolayısıyla eğitime katkıda bulunması anlamına gelmektedir. Bilgi etkinliği bağlamında ise hem eğitimin hem de kültürün ham maddesi olduğu göz önünde bulundurulmalıdır [12]. Kütüphanecilik bilimi kuramcılarında Jesse Shera; insanların temel/geleneksel gereksinimlerine -hava, su, yiyecek ve barınak- bir beşincisi olarak bilgiyi eklediğini ifade etmektedir [13]. Kütüphane kendi ortamlarında okuma olanağı bulamayan, bilgiye erişim sağlayamayan kişiler için özellikle önem taşımaktadır [14]. Kütüphane binalarında kültürel faaliyetlerin de yürütülmesi düşünülmeli [11]. Kişinin özgür iradesiyle orada bulunma halini ise boş zaman değerlendirme etkinliği olarak değerlendirmek mümkündür [13]. Gelişen zaman ve teknolojiyle ise kütüphaneler, geleneksel ve dijital hizmetlerin harmanlanarak kullanıcılara sunulduğu melez bir ortam sağlayan kalıcı, fiziksel mekânlara dönüşmüş, dönüşmeye de devam etmektedir [15]. Temel kütüphane türleri içinde yer alan ve çalışma kapsamında da incelenen üniversite kütüphaneleri için de durum benzerlik göstermektedir.

Bilgi ve düşüncelerin korunması, eğitim ve öğretim, araştırma, basım-yayım, bilginin yorumlanması ve yayılması gibi etkinlikler üniversite kuruluşlarının yükümlülüğündedir [16]. Baysal'ın da ifade ettiği gibi; üniversite kütüphanesi, üniversite içinde ve yakın çevrede bilimsel araştırma çalışmalarını desteklemek, yayınlarla zenginleşmek ve bilime ait güncel tüm konulara erişmekle yükümlü kitaplıklardır [17]. Çakın ise şöyle ifade etmektedir; üniversite ile kütüphane arasındaki ilişkinin özünde, bilgiye ve dolayısıyla bilgi kaynaklarına olan bağımlılık ile bilginin sağlandığı, düzenlendiği ve kullanıma sunulduğu yer bulunmaktadır [18]. Tam doğan ise; "üniversite öğretiminin en önemli destek birimleri, üniversitelerin bilgi üretimi sürecinde esas aldığı ve temel dayanağı niteliğindeki bilgi erişim sistemleri "bilgi ve bilimin ilerlemesi" ilkesinin yaşatıldığı üniversite kütüphaneleridir" şeklinde belirtmektedir [19].

Türkiye özelinde üniversite kütüphanelerine bakıldığı zaman ilgili kampüs içinde bağımsız bir yapı olarak var olan kapsamlı mekânlar oldukları gözlemlenmektedir. Yurt dışı örnekleri ile karşılaştırıldığı zaman bazı tasarım ölçütleri bakımından yetersiz kaldığı söylenebilir. İyi çözümlenmiş çağdaş kütüphane mekânları, sunduğu fiziksel imkânları ile cazip odak noktaları oluşturmaktadırlar [20]. 1997 yılında Evrensel Tasarım Merkezi (The Centre for Universal Design), evrensel tasarım kavramını daha anlaşılır kılmak ve bir rehber niteliği taşımasını

sağlamak için “eşitlikçi kullanım ilkesi, esneklik ilkesi, basit kullanım ilkesi, algılanabilir bilgi ilkesi, hataya tolerans ilkesi, düşük çaba ilkesi ve uygun boyut mekân ilkesi” olmak üzere yedi farklı ilke belirlemiştir [21]. Bu ilkeler her tasarım için uygulanabilir olduğu kadar üniversite kütüphane mekânları için de göz önünde bulundurulması gereken ilkeler olarak düşünülebilir ve tasarımcılar yol gösterici olarak kullanabilirler. İlkeleri doğru kullanmak kadar kullanıcı gruplarını da göz önünde bulundurmamak önem taşımaktadır. Böylece yapısal karmaşıklığa sahip bu mekânlar doğru gözlemler/sorgulamalar ve çözümlenmelerde evrensel tasarım yaklaşımını yakalamış olacaktır [22, 23].

Üniversite kütüphaneleri, kullanıcıların uzun süreli gereksinimlerine cevap verebilecek nitelikte yapılardır. Kullanıcı profilini genel olarak öğrenci ve akademik personelin oluşturduğu düşünüldüğü zaman, günün yirmi dört saati açık kalmak zorunda olabilirler. Kütüphane binaları ve iç mekân organizasyonları her şeyden önce kullanıcıyı tatmin edici özelliklere sahip olmalıdır [24]. Bina dış cephesi itibarıyla potansiyel kullanıcıların dikkatini çekecek şekilde davetkâr olması gerekmektedir [25]. İç mekâna ilişkin doğru tasarım ölçütleri daha detaylı hale gelmeye başlamaktadır. Kullanıcı antropometrik özellikler göz önünde bulundurularak bina içinde yer alan her bir mekân tasarlanmalıdır. Bu mekânlar, yalnızca bir çalışma/öğrenme ortamı değil, bireylerin toplandığı ve iletişim kurabildikleri mekânlar olarak kendisini göstermektedir [26]. Dolayısıyla bina kullanım amacına uygun olarak tasarlanıp, üretilirken, binayı kullanacak olan kişilerin yaşamı için gerekli olan fiziksel ve sosyal ortamı da sağlaması gerekmektedir [27].

Yapı biyolojisi açısından kütüphane binası fiziksel iç çevre özelliklerini; boyutsal ve biçimsel özellikler, atmosferik özellikler, görsel özellikler, işitsel özellikler ve dokunma ile ilgili özellikler altında toplamak mümkündür [10]. Boyutsal ve biçimsel özellikler ölçü, biçim ve oran-orantı olarak ifade edilebilir [28]. Kandışer ise; kütüphanelerin tasarımını etkileyen başlıca ölçütlerin bina formu, kat sayısı, kat yüksekliği, kitap raflarının yerleşme düzeni, doğal aydınlatma, ısıtma ve havalandırma sistemleri olduğunu belirtmektedir [29]. Ayrıca belirli amaç ve öncelikler, kitap depolama yöntemleri, okuyucu-kitap ilişkisi, esneklik gereksinimi ve büyümeye olanak tanıma gibi önemli parametreler de bulunmaktadır [30]. Küçükcan ise tasarım sürecinde;

- (i) Kütüphane kimler tarafından, hangi amaç için kullanılacak?
- (ii) Kullanıcıların özellikleri nelerdir?

gibi soruların rol oynadığını ifade etmektedir [31]. Burada kullanıcıdan kastedilen, yalnızca kütüphane içerisindeki eğitim ve öğretim materyallerini kullananlar değil, o mekânı sürekli ya da geçici olarak kullanan herkesi kapsadığıdır. Kütüphaneci de buna dâhildir. Ayrıca Küçükcan tasarımcının, kullanıcı tiplerini, özelliklerini (yaş aralığı, engel durumu vb.) ve bu mekândan beklentilerini araştırdığı yönünde bir role sahip olduğu şeklinde devam etmektedir [31]. İngiltere’de kütüphane binaları konusunda deneyimli bir mimar olan Harry Faulkner-Brown’un başarılı bir kütüphane tasarlayabilmek için önerdiği on ölçüt (Tablo 2);

Tablo 2. Başarılı Bir Kütüphane İçin Belirlenmiş On Ölçüt (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Esnek
Sıkıştırılabilir
Erişilebilir
Genişletilebilir
Değişken
Düzenlenebilir
Konforlu
Güvenli,
Tasarımlı

olarak sıralanmaktadır. Edwards ve Fisher’de bu listeye *sürdürülebilirlik ve ruhu canlandırma, enerji verme* ölçütlerini eklemiştir [32].

Çalışma kapsamında da incelenmesi hedeflenen ve önemli bölümlerden biri olan bireysel çalışma odaları, kullanıcılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu odalar yarı açık olabileceği gibi tümüyle kapalı ve ses geçirmez malzemelerin kullanıldığı mekânlar da olabilmektedir. Bu mekânlar tek kişilik olabileceği gibi gruplar için de tasarlanabilmektedir [25]. Bruxvoort [33] ise bireysel çalışma odalarına yönelik şöyle bir tavır sergilemektedir;

“Öğrencilerin yeterince stresli olduklarını düşünmek gerekirse, etkileşim ve hizmet süreçlerinde olası en az düzeyde kurallı ve rahat bir ortamın sağlanması esas olmalıdır. Üniversite kütüphanelerinde artık en

çok kullanılan odalar, öğrencilerin bireysel ya da arkadaş grupları ile çalıştığı ya da bir grup projesi için ortak çalışma yaptığı alanlardır”

şeklinde devam etmektedir. Çalışma kapsamında literatür kapsamında elde edilen ve incelenen veriler ışığında; kütüphane/üniversite kütüphane mekânlarının genel olarak tasvir niteliğinde oldukları, kütüphane iç mekânında yer alan bireysel çalışma odalarına dair teknik çizimler, görseller, mekânsal işlev ve estetik hakkında detaylı bilgilerin yer almadığı gözlemlenmiştir.

II. TASARIM YÖNTEMİ

Bu araştırmada, kaynak tarama, yerinde gözlem, bireysel çalışma odası kullanıcılarıyla Stapel ölçeğinde hazırlanmış anket çalışması olmak üzere kendi içinde üç gruba ayrılan nitel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen tüm kavramlar için alana ilişkin makalelere, kitaplara ve internet üzerinden web sitelerine ulaşılmış ve önemli olduğu düşünülen kaynaklar yorumlanmıştır. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Şehit Astsubay Ömer Halisdemir Kütüphanesi üçüncü katında camekân olarak ayrılmış bireysel çalışma odalarına izleyici olarak ziyaretler gerçekleştirilerek odaların hem fiziksel hem de ruhsal değerler açısından mekânsal düzenlemesine ve oda kullanıcılarına ilişkin gözlemlerde bulunulmuştur. Gözlemler neticesinde elde edilen veriler not alınmıştır.

Bireysel çalışma odası kullanıcılarıyla yapılan anket çalışması daha önce Havacılık ve Uzay Psikolojisi Derneği (HUPDER) tarafından düzenlenen araştırmadan uyarlanarak, “bireysel çalışma odası-kullanıcı ilişkisini” bazı değişkenler (demografik bilgiler, ruhsal etki, fiziksel etki ve olumlu-olumsuz yönler) üzerinden değerlendirmek üzere anket kullanılmıştır [34]. Ölçme aracı; demografik bilgiler (yaş, cinsiyet, öğrenim durumu, fakülte, kütüphaneye gitme sebebi, sıklığı, kütüphanede geçirilen süre); hiç-biraz-çok-tamamıyla cevaplarının seçildiği ruhsal etki ölçeği (kullanıcının rahat, güvende, memnun hissetmesi; odaklanma, rahatlama; odayı verimli kullanabilme, mahremiyet), evet-hayır cevaplarının verildiği fiziksel etki ölçeği (konum, sayı, işlevsellik, ferah, yeterli aydınlatma, ısı düzeyi, ses yalıtımı, havalandırma, teknolojik imkânlar, büyüklük, donatıların ergonomisi, renk, gereksinimleri karşılama); açık uçlu olarak da çalışma odalarının olumlu ve olumsuz yönleri olmak üzere beş bölümden oluşmakta ve bireysel çalışma odası kullanıcılarının görüşleri incelenerek yorumlanmıştır.

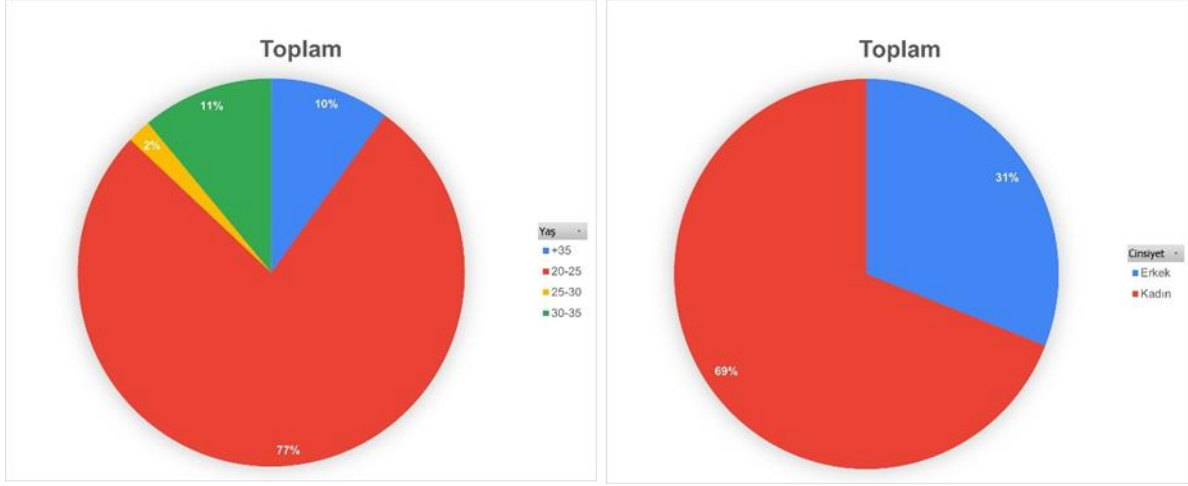
Çalışma kapsamında ele alınan bireysel çalışma odaları, ilgili kütüphanenin diğer çalışma alanlarına göre her kullanıcı grubuna açık olmaması sebebiyle en az kullanılan mekânlar arasında yer almaktadır. Gönüllü katılımcılar için ulaşılması kolay, elde mevcut ya da araştırmaya katılmak isteyen (gönüllü) bireyler üzerinde yapılan örnekleme olması sebebiyle “kolaylıkla bulunabileni örnekleme (convenience sampling) yöntemi” kullanılarak ulaşılabilen her kullanıcıya uygulanmıştır [35]. Dolayısıyla ulaşılan yüz (100) kişi ile anket çalışması gerçekleşmiş, anket sorularının sonuçlarının veri analizleri ise IBM Statistical Package for Social Sciences–version 24 isimli istatistik programında gerçekleştirilmiştir. Ankette kayıp değer (missing value) taşıyan herhangi bir cevaba rastlanmamıştır.

A. Veri Toplama Araçlarıyla Ortaya Çıkan Analiz Sonuçları

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Şehit Astsubay Ömer Halisdemir Kütüphanesi bireysel çalışma odaları için geliştirilecek tasarım önerisi için gönüllü katılım esasına dayanan anket çalışması sonucunda ulaşılan ölçütler sırasıyla aşağıda yer almaktadır;

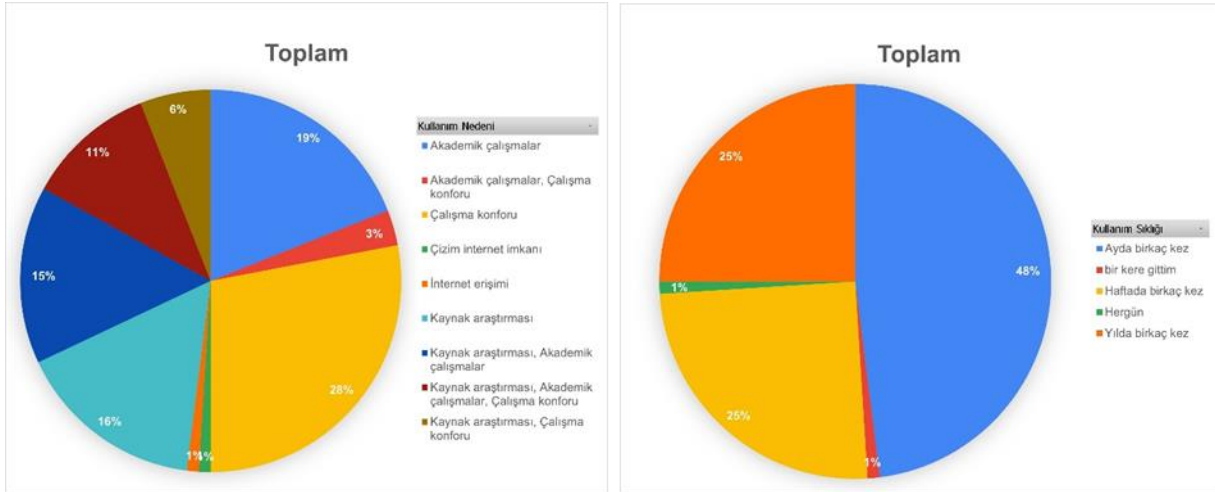
Birinci bölümde yer alan demografik bilgiler başlığı altında yöneltilen “Bulunulan birim” ve “Eğitmen-öğrenci” sorularında birçok farklı fakülteden akademik personel, sanatta yeterlik/doktora öğrencilerinin katılımı anket çalışmasında çoğunluğu sağlamıştır.

“Yaş” sorusunda en yüksek kullanıcı grubunu 20-25 yaş aralığı oluştururken; en az yaş aralığını ise sarı renk koduyla tanımlanmış 25-30 yaş grubu oluşturmaktadır. “Cinsiyet” sorusunda katılımcıların %69’unu kadın kullanıcıların; kalan %31’lik dilimi ise erkek kullanıcıların oluşturduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 1).



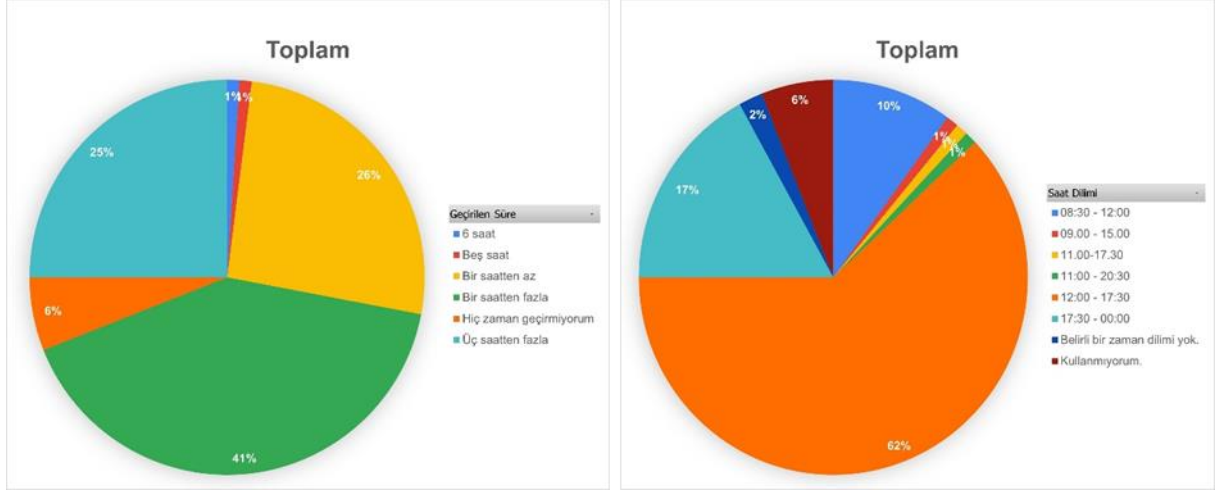
Şekil 1. Yaş (sol) ve Cinsiyet (sağ) Yüzdeleri

“Kütüphaneye gitme nedeniniz?” çoklu seçmeli sorusuna verilen yanıtlarda birbirine yakın yüzdeler tespit edilmiş olup %28’lik en yüksek yüzdeyi çalışma konforu seçeneği almıştır. Onu takip eden diğer yakın yanıtlar ise genel olarak akademik çalışmalar yapmak, kaynak araştırması olmuştur. İnternet erişiminin ise %1’lik dilimle kütüphaneye gitme sebebi olarak etkin rol oynamadığı görülmüştür. “Kütüphaneyi kullanım sıklığınız nedir?” sorusunda ayda birkaç kez seçeneği, %48’lik dilimle en yüksek yanıtı almıştır. Yılda bir kez ve haftada bir kez yanıtları ise %25’lik dilimle eşit dağılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Kütüphaneye gitme nedeni (sol) ve Kullanım Sıklığı (sağ) Yüzdeleri

“Kütüphaneye her gelişinizde bireysel çalışma odalarında yaklaşık ne kadar zaman geçiriyorsunuz?” sorusuna gelen yanıtlarda, kullanıcıların %41’i bir saatten fazla zaman geçirdiklerini, %26’lık kısım ise bir saatten az zaman geçirdiklerini belirtmişlerdir. Kalan %33’lük kısım ise diğer seçenekler arasında dağılım göstermişlerdir. “Bireysel çalışma odalarını genellikle hangi saatler arasında kullanıyorsunuz?” sorusuna gelen yanıtlarda kullanıcılar en çok 12:00-17:30 saatleri arasında bireysel çalışma odalarını kullandıklarını belirtmişlerdir (Şekil 3).



Şekil 3. Kütüphanede geçirilen zaman yüzdeleri

İkinci bölümde yer alan ruhsal etki ölçeğinde, yüz kişiyle gerçekleştirilen anket çalışması sonucunda katılımcılara yöneltilen sorulardan yola çıkarak (Tablo 3);

Tablo 3. Kullanıcı-Mekân İlişkisinde Ruhsal Etki Ölçeği

	Hiç	Biraz	Çok	Tamamiyle	Toplam
Bireysel çalışma odasında kendimi rahat hissediyorum	6	65	22	7	100
Bireysel çalışma odasında kendimi güvende hissediyorum	3	47	38	12	100
Bireysel çalışma odasında halimden memnunum	8	51	32	9	100
Çalışmama daha iyi odaklanıyorum	4	42	39	15	100
Kendimle başbaşa kalmak zihnen beni rahatlatıyor	6	24	45	25	100
Zamanı daha verimli kullanabiliyorum	3	32	51	14	100
Çalışmalarım sırasında mahremiyete ihtiyaç duyuyorum	5	29	33	33	100
Çalışma sırasında daha iyi kararlar verebiliyorum	3	33	47	17	100

Gelen yanıtlar da gösteriyor ki; bireysel çalışma odaları, verimlilik, mahremiyet, bireysel olma, rahatlık ve memnuniyet kavramları üzerinden çoğunluk kullanıcı açısından olumlu etkilere sahiptir.

Üçüncü bölümde yer alan fiziksel etki ölçeğinde ise yüz kişiyle gerçekleştirilen anket çalışması sonucunda katılımcılara yöneltilen sorular doğrultusunda (Tablo 4);

Tablo 4. Mekân-Kullanıcı ilişkisinde fiziksel etki ölçeği

	Evet	Hayır	Toplam
Kütüphane içindeki konumu iyi planlanmış mıdır?	60	40	100
Sayısı yeterli midir?	25	75	100
İşlevsel olduğunu düşünüyor musunuz?	65	35	100
Ferah olduğunu düşünüyor musunuz?	52	48	100
Aydınlatması yeterli midir?	48	52	100
Isı düzeyi uygun mudur?	66	34	100
Ses yalıtımı uygun mudur?	44	56	100
Havalandırması yeterli midir?	52	48	100
Teknolojik imkânları yeterli midir?	52	48	100
İçinde bulunduğunuz çalışma odası yeterli büyüklükte midir?	74	26	100
Oda içindeki çalışma sandalyesi ve çalışma masasını ergonomik/rahat buluyor musunuz?	48	52	100
Çalışma odasında kullanılan renkler sizi rahatsız ediyor mu?	32	68	100
Bireysel çalışma odası gereksinimlerinizi karşılayabilecek olanaklara sahip midir?	42	58	100

Gelen yanıtlar da gösteriyor ki; odaların kat içerisindeki konumu, sayısı, büyüklüğü, işlevselliği, ferahlığı, aydınlatma/ısı/ses/havalandırma düzeyleri, sunulan teknolojik imkânlar/olanaklar, donatı ergonomisi/rengi gibi etkenler geliştirilecek tasarım önerisi için önemli ipuçları sağlamaktadır.

Son iki bölümde yer alan “Bireysel çalışma odalarının olumlu ve olumsuz yönleri nelerdir?” açık uçlu sorulara gelen yanıtlar ise aşağıda yer alan Tablo 5’ de yer almaktadır;

Tablo 5. Bireysel çalışma odalarının sunduğu olumlu-olumsuz yönler

Olumlu yönler	Olumsuz yönler
Teknolojik aletlerin varlığı	Diğer açık alanlardan daha izole bir kurgu gereksinimi
Tek başına çalışabilme ve eşyaları odada kilitleyerek bırakıp çıkabilme imkânı	Yetersiz aydınlatma
Oldukça geniş ve ferah bir yapıya sahip olması	Kullanışsız alan
Bilgisayarların kullanışı ve her odada olması	Yetersiz ses yalıtım
Zamanı verimli kullanabilme	Estetikten yoksun
Sürelili de olsa aidiyet hissini önemi	Soğuk renkler
Oturma elemanlarının rahatlığı	Hijyenik olmaması
Belirli bir alanı kullanabilme özgürlüğü	Yetersiz havalandırma ve ısıtma
Bireysellik	Ergonomik olmaması
Sakin ve sessiz	Camekân olmasından kaynaklı yaşanan dikkat dağınıklığı
Bireysel olmasının, çalışmaya odaklanmada olumlu etki olarak gösterilmesi	Odalar arası şeffaflıktan dolayı odaklanma problemi
Güvenli olması	Kullanılmayan işlevsiz alan tanımları
Küresel salgın şartlarından dolayı tek başına çalışmaya imkân tanınması	
Donatıların yeterli olması	

Tablo üzerinden bir değerlendirme yapmak gerekirse, kişiye özel çalışma alan tanımlarının/varlığının en olumlu yön olduğuna ilişkin bir sonuca varmak mümkündür. Bireyselliğin beraberinde getirdiği zamanı verimli kullanma ve bireysel hareket etme özgürlüğü gibi söylemler de kişiye özel alan tanımını güçlendirmektedir. Olumsuz yönler ise, odaları oluşturan fiziksel ve estetik öge yoksunluğundan kaynaklanmaktadır (Tablo 5). Mekân-kullanıcı ilişkisinde ölçülmesi istenen fiziksel ve ruhsal etki değer sonuçlarına benzer sonuçlar bu son iki bölümde de dikkat çekmiştir. Kullanıcılar için bireysel çalışma fırsatı sunan ancak bütüncül ve doğru kurgulanamamış bu odaların, olumsuz yönlerini olumluya çevirmek ve bireysel çalışma oda tanımını en doğru şekilde yerine getirmek amacıyla yeni bir tasarım önerisi sunulması çalışma açısından önem taşımaktadır.

B. Bireysel Çalışma Odası Tasarım Önerisi İçin İki/Üç Boyutlu Çizimler

Gönüllü katılım esasına dayalı anket çalışmasından elde edilen ve analizi yapılan kullanıcı geri bildirimleri sonucunda bireysel çalışma odalarının mevcut durumları üzerinden belirli adımlar izlenerek bir tasarım önerisi geliştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Mevcut bireysel çalışma odaları (yazar arşivinden, 2021)

Kullanıcılardan elde edilen geri bildirimler ile olası tasarım önerileri geliştirilmiş ve fiziksel ve ruhsal değerleri de göz önünde bulundurularak kullanıcı gereksinim ve istekleri doğrultusunda öneriler içerisinden işlevsel ve kullanım kolaylığı sunan model seçilmiş ve yazar tarafından teknik çizimleri yapılmıştır. İç mekân estetik öğelerinin (malzeme, renk, donatı, havalandırma/ısınma aydınlatma) kararları da tasarım önerisi olarak geliştirilen plana bağlı kalınarak verilmiştir.

Tablo 7. Donatı Kararları

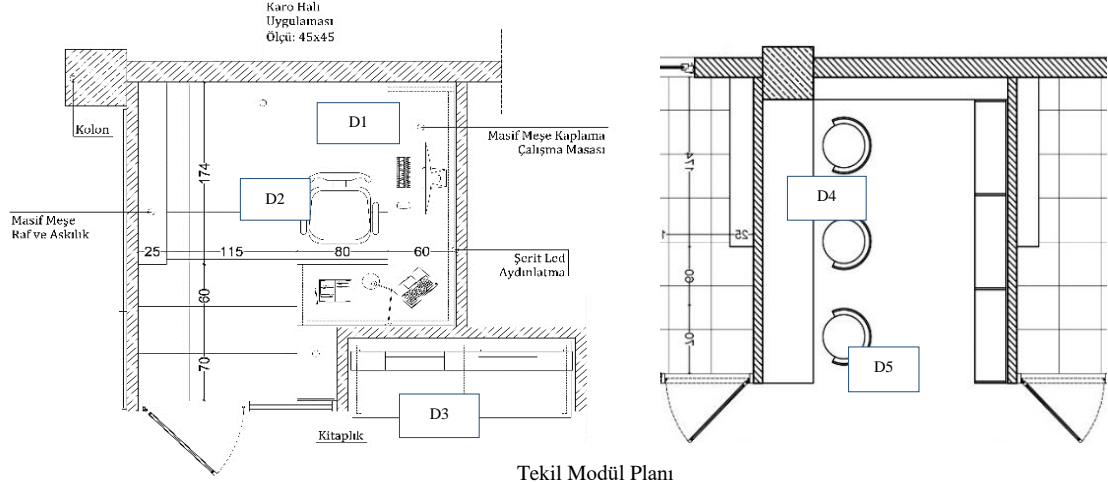
D1: Çalışma masası: Kullanıcının rahat çalışabileceği ve kullanacağı bilgisayarın rahat konumlanabilmesi için özel üretim bir çalışma masası seçimi yapılmıştır.

D2: Oturma elemanı: Ofis tipi çalışma sandalyesi tercih edilmiştir. Oturma yeri ve sırtlık kısmın ergonomik olması düşünülerek sandalye seçimi yapılmıştır.

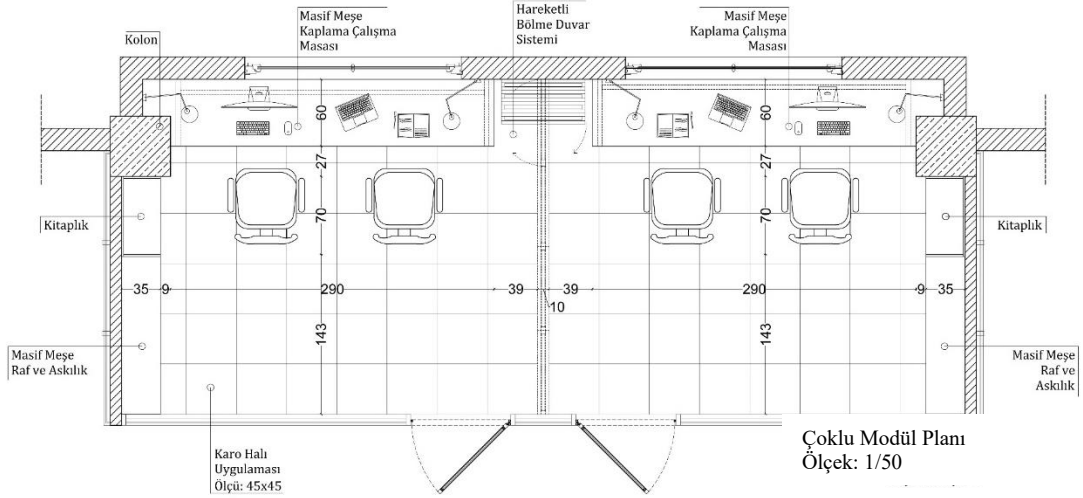
D3: Dinlenme Koltukları: Rahat ve ergonomik olması düşünülerek dinlenme koltuğu seçimi yapılmıştır.

D4. Serbest çalışma yüzeyi: Çalışma odalarında yer alan çalışma masasından farklı olarak derinliği daha az olacak biçimde özel üretim yüzeyler olarak düşünülmüştür.

D5. Oturma elemanı: Ofis tipi çalışmasından farklı olarak yalın ve az yer kaplayan oturma elemanları tercih edilmiştir.



Tekil Modül Planı
Ölçek: 1/50



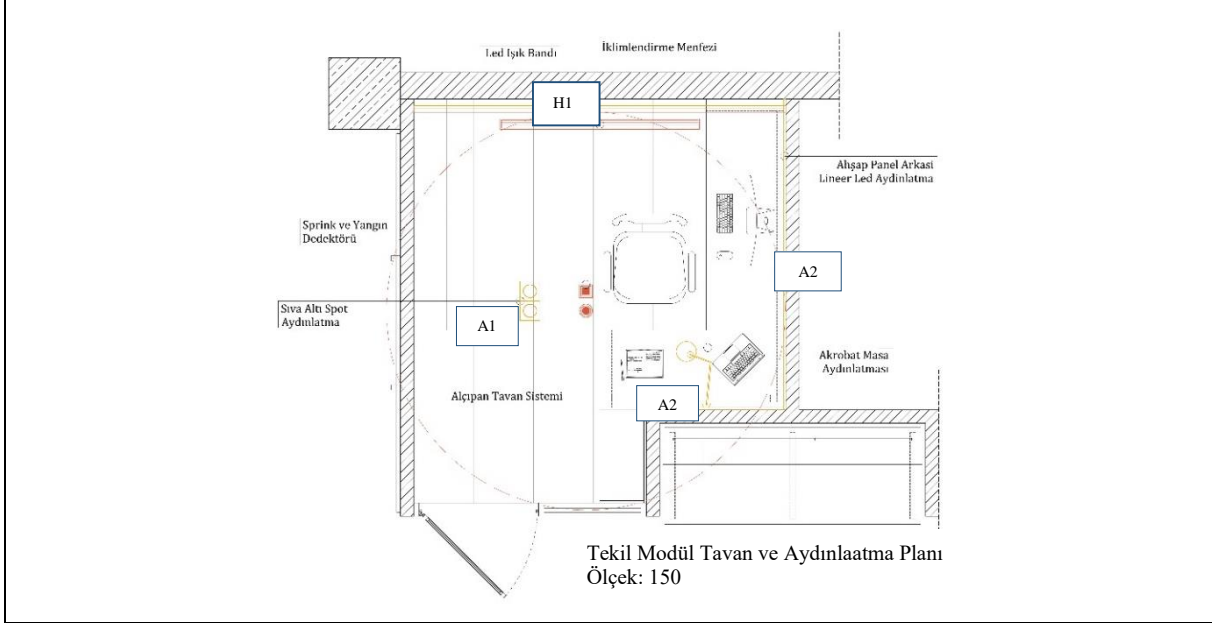
Çoklu Modül Planı
Ölçek: 1/50

Tablo 8. Aydınlatma ve Havalandırma/Isıtma Kararları

A1. Tavan aydınlatması: Genel aydınlatma için sıva altı spot düşünülmüştür.

A2. Duvar aydınlatması: Masa yüzeyinden duvara doğru devam eden ahşap panel arkasında lineer led aydınlatma seçilmiş olup; duvara sabit, ayarlanabilir akrobat aydınlatmanın da kullanıcının çalışma açısına hizmet edebilmesi açısından kullanılması düşünülmüştür. Bazı çalışma odalarına pencereler dâhil olduğu için kullanıcılar gün ışığından da faydalanabilmektedirler.

H1. Her çalışma odası içinde havalandırma menfezleri aracılığı ile havalandırma ve ısıtma sistemi çözülecektir. Buna ek olarak yangın ve duman dedektörlerinin de tavanda yer alması düşünülmüştür.



Tablo 9. Malzeme Kararları

M1. Tavan Malzemesi: Tavan yüksekliğini bir miktar indirmek amacıyla alçıpan asma tavan uygulaması düşünülmüştür.

M2. Duvar Malzemesi: Duvarlarda, duvar boyası uygulaması tercih edilmiştir. Ayrıca çalışma masasının olduğu bir duvar yüzeyinin belirli bir kısmı için dekoratif ahşap panel tasarlanmıştır.

M3. Döşeme Malzemesi: Zeminde döşeme malzemesi olarak anti bakteriyel karo halı düşünülmüştür.

M4. Modül iskelet sistemi: Mevcut parça iskelet sistemi yerine siyah metal profiller ve profillere takılmış-çalışma odalarının içini göstermeyen- film kaplamalı cam malzeme tercih edilmiştir. Ayrıca çoklu çalışma odalarını bölen ve istenildiğinde iki odanın birleşimini sağlayan hareketli akustik bölücü panel sistem kullanılmıştır.

M5. Donatılar: Masa ve Oturma Elemanları: Çalışma odalarında yer alan çalışma masası yüzeylerinde ahşap; oturma elemanı/çalışma sandalyesinde ise metal malzeme iskeletini, oturma ve sırt kısmında sünger üzeri kumaş kaplama oluşturmaktadır. Serbest çalışma alanında çalışma yüzeyleri ve duvarda kullanılan dekoratif panel ahşap olup; oturma elemanları ahşap iskelet üzeri kumaş ve kitaplık metal iskelete takılı ahşap raflar olarak tercih edilmiştir. Çalışma odalarının dışında yer alan oturma elemanlarında/dinlenme koltuklarında ise, rahatlığın da ön planda tutulduğu ahşap iskelet üzeri kumaş kaplama tercih edilmiştir.

Perde: Pencereleri içine alan çalışma odalarında güneş kırıcı stor perde tercih edilmiştir.

Süpürgelik: Çalışma odalarında masa ve duvar yüzeyleriyle uyumlu olması açısından ahşap süpürgelik kullanılması düşünülmüştür.

Tablo 10. Renk Kararları

- R1.** Tavanda alçıpan asma tavan üzeri beyaz boya uygulaması düşünülmüştür.
- R2.** Duvarlarda kullanıcıyı yormayan ekru rengin kullanılması uygun görülmüştür.
- R3.** Döşemelerde kullanılan karo halılarda kahverengi ve sarı tonlarının hâkim olduğu renkler tercih edilmiştir.
- R4.** Modül iskelet sisteminde kullanılan metal profillerin rengi siyah olarak belirlenmiştir.
- R5.** Donatılar: Çalışma masaları meşe ahşap, oturma elemanları ise sarı renk olarak belirlenmiştir. Serbest çalışma alanında yer alan çalışma yüzeyi bireysel çalışma odalarında olduğu gibi meşe rengi ahşap; oturma elemanlarında duvarlarla uyumlu ekru renkler ve kitaplık olarak tasarlanmış rafli donatı elemanı siyah metal iskelete takılı meşe rengi ahşap raflar olarak tercih edilmiştir. Güneş kırıcı stor perde ekru rengi; dinlenme koltukları, açık renk ahşap iskelet üzerine açık mavi rengin hâkim olduğu kumaş kaplama olarak tercih edilmiştir.
- R6.** Süpürgelekler için ise meşe rengi olarak tercih edilmiştir.

Bireysel çalışma odalarının kullanıcı zihninde daha sağlıklı canlanmasını sağlamak adına, iç mekân fiziksel ve estetik öge kararları sonucunda, dijital ortamda modelleme programı (3ds max. Vray) aracılığıyla dördüncü/son adım olan üç boyutlu çizimler yazar tarafından oluşturulmuştur (Şekil 5, 6).



Şekil 5. Bireysel Çalışma Odaları Üç Boyutlu Görselleştirmeleri



Şekil 6. Bireysel Çalışma Odaları Üç Boyutlu Görselleştirmeleri

III.SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünden bugüne insanlar, yaşamlarına devam etmek ve en temel gereksinim olan barınma eylemini gerçekleştirebilmek için çeşitli çözümler üretmiştir. Zamanla geliştirilen çözümler farklı ilişkileri de beraberinde getirmiş ve mekân/iç mekân olgusu kendisini göstermeye başlamıştır. Sadece barınma gereksinimine değil diğer tüm eylemler için mekânlar kurgulanmaya başlanmıştır. Bu durum, işlevsel ve estetik kaygıyı da beraberinde getirmiştir.

İç mekânların oluşmasında kullanıcı önemli rol oynamaktadır. İçmimarlar, tasarımlarını gerçekleştirirken kullanıcı gereksinim, istek ve beğenisini ön planda tutmanın yanında, cinsiyet, kültür, statü, fiziksel/ruhsal durum vb. çok çeşitli özellikleri de dikkatte almaktadır. Dolayısıyla malzeme, donatı, aydınlatma, renk gibi estetik birtakım öğeler kendisini göstermektedir. Tüm bu detaylar da göz önünde bulundurularak kullanıcıya/kişiye özel mekânları tasarlama eylemi gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında da ele alınan ve fiziksel/ruhsal değerler de göz önünde bulundurulduğu zaman, KütaHYa Dumlupınar Üniversitesi Şehit Astsubay Ömer Halisdemir Kütüphanesi Bireysel Çalışma Odalarında geçen eylem itibarıyla mekânsal kurgu ve organizasyonun çok iyi düşünülmesi gerekmektedir. Bunu yapabilmek için ise, kütüphane mekân tanımının iyi anlaşılması, buna bağlı olarak kullanıcıların orada bulunma nedenlerinin iyi analiz edilmesi en doğru tasarımın da ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Çalışma kapsamında hedeflenen tasarım önerisini gerçekleştirebilmek için, literatür taraması, yerinde gözlem sonucu alınan notlar ve gönüllü katılım esasına dayalı hazırlanmış bir anket çalışması tasarım önerisine önemli katkılar sağlamıştır. Bu veriler ile;

- (i) Bireysel çalışma odalarında yer alan bir takım donatı, malzeme, renk vb. gibi öğelerin kararlarının doğru bir şekilde verilmediği/kullanılmadığı ve eyleme yönelik uygun bir şekilde kurgulanmadığı,
- (ii) Çalışma odalarının, tüm kullanıcıların kendilerini mevcut durumdan daha rahat, güvende hissedebilecekleri, odak problemleri yaşamayacakları sessiz bir ortamda zamanı daha verimli kullanabilecekleri, işlevsel ve estetik değeri yüksek modern bir tasarım önerisi haline geldiği sonucuna varılmıştır.

Burada iç mekân tasarımcılarına da önemli görevler düşmektedir. Bir iç mekân tasarımcısı, tasarımını yaparken o mekânın kullanıcı üzerinde olumlu etki bırakmasını en birincil amaçları arasına koyması gerekmektedir.

Geliştirilen tasarım önerisi kullanıcı-mekân ilişkisinde, sistemin işleyiş ölçütlerine göre hem çalışma odalarının mevcuttaki mekânsal organizasyonu değiştirilmiş, hem de odalarda olması gereken tüm donatı, malzeme, aydınlatma, havalandırma/ısıtma, renk kararlarının kullanıcı antropometrisine ve ruhsal durumuna uygun bir şekilde verilmesi sağlanmıştır. Oluşturulan tasarım önerisi ve mevcut düzen arasındaki farklılıkların kullanıcılar tarafından daha bilinçli bir şekilde algılanması beklenmektedir. Özellikle oda kullanıcılarının, yeni mekânsal kurguyu/düzeni hem işlevsel hem de estetik anlamda algılayabilmesini sağlamak için; teknik çizimlerin yanında çalışmada yer alan üç boyutlu çizimlerin de bu durumu desteklemiş olması beklenmektedir.

Tasarım sürecine dâhil edilen ve göz önünde bulundurulan tüm veriler ışığında geliştirilen yeni tasarım önerisinin, bireysel çalışma odalarına farklı bir bakış açısı kazandırması açısından hem literature hem de uygulamaya önemli katkılar ve farkındalık sağlaması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Türk Dil Kurumu, <https://sozluk.gov.tr/> (Erişim tarihi: 05.05.2021).
- [2] Aristoteles (1984). *Physics, The Complete Works of Aristotle*. Jonathan Barnes, (Ed.) Translated by R. P. Hardie and R. K. Gaye, Princeton, N. J., Princeton University.
- [3] Kılıç, E. (2011). *Aristoteles ile Farabi'nin Mekân Anlayışlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Felsefe Anabilim Dalı, İstanbul.
- [4] Lefebvre, H. (2014). *Mekânın Üretimi*. (I. Ergüden, Çev.) İstanbul: Sel Yayıncılık.
- [5] Kuban, D. (2016). *Mimarlık Kavramları: Tarihsel Perspektif İçinde Mimarlığın Kuramsal Sözlüğüne Giriş*. İstanbul: Yapı Endüstri Merkezi Yayınları.
- [6] Çakmaklı, D. (1992). *Bina-Kentsel Çevre İlişkisi*. Bina Bilgisi Ders Notu, İstanbul: Yıldız Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Baskı İşliği.
- [7] Gür, Ş. (1996). *Mekân Örgütlenmesi*. Trabzon: Gür Yayıncılık.
- [8] Kaptan, B. (2001). İç Mekânın Niteliğini Belirleyen Öğelerin Görsellik Kazanmasını Sağlayan Oluşumlar. *Anadolu Sanat*, 11, Eskişehir.
- [9] Özdemir, İ. (1994). *Mimari Mekânın Değerlendirilmesinde Mekân Örgütlenmesi Kavramı: Konutta Yaşama Mekânları*. Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak, Trabzon.

- [10] Balkaş, B. (2005). *Üniversitelerde Kütüphane Binaları Kullanım Verimliliğinin Yapı Biyolojisi Açısından İncelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Hazırlar, M. (2004). *Halk Kütüphanelerinde İç Mimari*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [12] Yılmaz, B. (1996). *Halk Kütüphanesi Kullanımı Sosyo-Ekonomik Bir Çözümleme*. İstanbul: Türk Kütüphaneciler Derneği.
- [13] Atılğan, D. (1991). Eğitim ve Kütüphane. *Türk Kütüphaneciliği*, 5(2), 69-72.
- [14] Suna, Ç. (2006). *İlköğretim öğrencilerinin okuma ilgi ve alışkanlıklarının analitik olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi* (yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [15] Karşlı Tuğlu, U., & Özker, S. (2021). Kütüphaneden öğrenme merkezine: Bilgi çağında dönüşümü kütüphane mekânları üzerinden okumak. *IDA: International Design and Art Journal*, 3(2), 272-283.
- [16] Wilson, L.R. & Tauber, M. (1956). *The University Library; The Organisation, Administration and Functions of Academic Librarians*. New York: Columbia University.
- [17] Çelik, A. & Uçak, N. (1993). Üniversite Kütüphaneleri Üzerine. *Hacettepe Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi*, 10(2), 115-121.
- [18] Çakın, İ. (2000). Üniversitelerimizin bilgiye erişim sorunları ile ulusal akademik ağ ve bilgi merkezi. *Bilgi Dünyası*, 1(1), 26-41.
- [19] Tamdoğan, O. G. (2009). Bilgi üretiminde yazın ürünleri ve kütüphaneler: Atıfların tespiti ve analizi yoluyla araştırma. *Türk Kütüphaneciliği*, 23(2), 254-277.
- [20] Emsen, H.,H., & Örmecioğlu, H., T. (2020). Üniversite Kütüphanelerinin Mekânsal Tasarımının Kullanıcı Üzerindeki Etkisine İlişkin İstatistiksel Bir Çalışma: Akdeniz Üniversitesi Merkez Kütüphanesi Örneği. *Türk Kütüphaneciliği*, 34(2), 187-207.
- [21] Altay Öztürk, M. (2019). *Kamusal mekân olarak sağlık bilimleri üniversitesi Antalya eğitim ve araştırma hastanesi genel mekânlarının evrensel tasarım prensipleri ışığında incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Hojjati, S. A. (2019). *Evrensel tasarım çerçevesinde bir inceleme: Trabzon Kaşüstü Kanuni Eğitim ve Araştırma Hastanesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Trabzon.
- [23] Bekar, İ. (2021). Kütüphane İç Mekânlarının Evrensel Tasarım İlkeleri Bağlamında Değerlendirilmesi: Karadeniz Teknik Üniversitesi Faik Ahmet Barutçu Kütüphanesi. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6(1), 178-194.
- [24] Thompson, G. (1989). *Planing and Design of Library Buildings*. London: Butterworth Architecture.
- [25] State Library of Queensland Guidelines and Standarts for Queensland Public Libraries-Library Buildings, (1997). *State Library of Queensland*, Queensland, <https://www.slq.qld.gov.au/alerts> (Erişim tarihi: 05.05.2021).
- [26] Küçükcan, B. (2021). *Kütüphane Binaları: Bilginin Yönetildiği Mekânları Tasarlamak*. Bilgi Merkezlerinde Yönetim I, Hiper Yayın, İstanbul.
- [27] Balanlı, A. & Küçükcan, B. (1995). Üniversite Kütüphanelerinin Tasarımında Çevresel Etmenler. *21. Yüzyılda Üniversite Kütüphanelerimiz Sempozyumu*, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- [28] Orhan, A. (2001). *Yapıların Boyutsal-Biçimsel Özellikleri ile İnsan Sağlığı İlişkisi* (basılmamış bilim uzmanlığı tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] Kandışer, S. (2003). *Kütüphanelerde Doğal Aydınlatma Sistemi ve Tasarım Kararlarına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] Konya, A. (1986). *Libraries: a design guide*. London: Architectural Press.
- [31] Küçükcan, B. (2007). *Üniversitelerde Kütüphane Binaları Kullanım Verimliliğinin Yapı Biyolojisi Açısından İncelenmesi*. İstanbul: Türk Kütüphaneciler Derneği.
- [32] Edwards, B. & Fisher, B. (2002). *Libraries and Learning Resource Centres*. Oxford: Architectural Press.
- [33] Bruxvoort, D. (2016). Library as third place: A strategic frame work. *SCONUL Focus*, 68, 13-14.
- [34] Buldaç, M. (2019). *Ceza Yargılamalarında Duruşma Salonlarının Fiziksel ve Ruhsal Değerler Açısından İrdelenmesi ve Türkiye İçin Bir Tasarım Önerisi*. Sanatta Yeterlik Tezi, Anadolu Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Eskişehir.
- [35] Örneklem Teknikleri
https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/12176/mod_resource/content/1/örneklem%20Teknikleri.pdf
(Erişim tarihi: 27.01.2023).



Araştırma Makalesi - Research Article

Mikro Ölçekli Sıfır Değerlikli Demir (mZVI) Partikülü ile Sulu Çözeltilerden C.I. Vat Green 1 Boyasının Gideriminin İncelenmesi

Investigation of Removal of C.I. Vat Green 1 Dye from Aqueous Solutions by Microscale Zero Valence Iron Particle (mZVI)

Burçin Yıldız^{1*}

Geliş / Received: 16/06/2022

Reviz / Revised: 11/02/2023

Kabul / Accepted: 13/02/2023

ÖZ

Bu çalışma, sulardan C.I. Vat Green 1 boyar maddesinin adsorpsiyonu için mikro ölçekli sıfır değerlikli demirin (mZVI) uygulanabilirliğini göstermektedir. mZVI partikülleri SEM, EDX, BET yüzey alanı analizi ve pH_{zpc} ile karakterize edilmiştir. Analizlerde kullanılan mZVI partiküllerinin yüzey özelliklerinde meydana gelen değişimler ise SEM ve EDX ile belirlenmiştir. $5.2 \text{ m}^2/\text{g}$ BET yüzey alanı ile yaklaşık $5 \text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük olan küresel partiküller, yüksek giderim verimini desteklemiştir. Analiz sonrasında partikül boyut ve şekilleri ile elementel bileşimde meydana gelen değişiklikler yüksek adsorpsiyon verimini doğruladığı gibi 5.73 olan pH_{zpc} değeri de düşük pH'larda yüksek giderim veriminin gözlenmesini sağlamıştır. C.I. Vat Green 1'in giderim verimi ile adsorpsiyon kinetik ve izotermelerini değerlendirebilmek için çözelti pH'sı, demir dozajı, reaksiyon sıcaklığı, kirletici konsantrasyonu gibi parametreler kesikli deney serileri ile incelenmiştir. 3'ten büyük pH değerlerinde, 1 g/L 'den büyük mZVI dozajlarında ve kirletici derişiminin arttığı durumlarda giderim verimi azalırken 1 g/L 'ye kadar olan dozajlarda ve sıcaklık artışı ile verim artmıştır. Optimum pH, 3 ve optimum mZVI dozajı 1 g/L olarak belirlenmiştir. TOK sonuçları da giderim mekanizmasının adsorpsiyon olduğunu doğrulamıştır. Kinetik verilerin en iyi olarak pseudo ikinci dereceden modele uyduğu bulunmuştur. Adsorpsiyon denge verileri Langmuir modeli ile temsil edilmiş ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi 36.50 mg/g olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler- *Tekstil Atıksuyu, Vat Green 1, Mikro Ölçekli Demir, Adsorpsiyon*

ABSTRACT

This study demonstrates the applicability of microscale zero-valent iron (mZVI) in the removal of C.I. Vat Green 1 dye from water by adsorption. mZVI particles were characterized by SEM, EDX, BET surface area analysis and pH_{zpc} . The changes in the surface properties of the mZVI particles used in the analysis were determined by SEM and EDX. Spherical particles smaller than about $5 \text{ }\mu\text{m}$ with a surface area of $5.2 \text{ m}^2/\text{g}$ BET supported the high removal efficiency. Changes in particle size and shape and elemental composition after the analysis confirmed the high adsorption efficiency, and the pH_{zpc} value of 5.73 led to high removal efficiency at low pH. In order to evaluate the removal efficiency, adsorption kinetics and isotherms of C.I. Vat Green 1, parameters such as solution pH, iron dosage, reaction temperature and pollutant concentration were investigated by batch series of experiments. While the removal efficiency decreased at pH values greater than 3, mZVI dosages greater than 1 g/L and increased

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: burcinyildiz23@gmail.com (<http://orcid.org/0000-0001-9750-7278>)
Çevre Mühendisliği Bölümü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tuşba, Van

pollutant concentration, the efficiency increased at dosages up to 1 g/L and with temperature increase. It was determined that the optimum pH was 3 and the optimum mZVI dosage was 1 g/L. The results of TOC analysis also confirmed that the removal mechanism is adsorption. It was found that the kinetic data fit the pseudo second order model best. The adsorption equilibrium data were represented by the Langmuir model and the maximum adsorption capacity was found to be 36.50 mg/g.

Keywords- Textile Wastewater, Vat Green 1, Microscale Iron, Adsorption

I. GİRİŞ

Günümüzde organik bileşiklerle kirlilik ciddi bir çevre sorunudur [1]. Biyolojik prosesler, atıksulardaki organik bileşenleri verimli bir şekilde mineralize etmenin nispeten basit ve uygun maliyetli bir yolu olduğundan, evsel ve endüstriyel atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bazı endüstriyel atık suların klasik aerobik biyolojik proseslerle arıtılması, dirençli ve toksik organik maddelerin varlığı nedeniyle zordur [2]. Bu atıksular arasında yer alan yüksek organik içerik, güçlü renk, yüzey aktif maddeler ve katkı maddeleri ile karakterize edilen tekstil boyama ve terbiye endüstrilerinden deşarj edilen atıksuların da klasik biyolojik teknolojilerle arıtılması güçtür [3,4]. Tekstil, kağıt, baskı ve deri endüstrilerinden deşarj edilen atık sular çok çeşitli reaktif boyaları içerir ve bu boyalar, büyük miktarda uygulanmaları ve toksik yapıları nedeniyle ciddi çevresel endişelere sebep olurlar [5,6]. Tekstil endüstrisi, su tüketen ve kirleten endüstrilerin ön saflarında yer almaktadır [7,8]. Sadece 1 ton kumaş üretmek için yaklaşık 200 m³ temiz su tüketilmektedir [9]. Yılda 7x10⁵ tondan fazla boya üretilir [4,10,11] ve dünyadaki toplam boya üretiminin yaklaşık %15'i boyama işlemi sırasında kaybedilir ve tekstil atık sularında son bulur [12]. Her yıl dünya çapında tekstil endüstrisinde kullanılan yaklaşık 280.000 ton boya, endüstriyel atık olarak düşünülür [13]. Boyama endüstrilerinin çıkış sularındaki organik boyalar, suda yüksek çözünürlüğe sahip olmaları nedeniyle temel bileşenlerdir [14]. Bununla birlikte, boyama işlemi sırasında fazla boyaların kontrolsüz salınımı, atık suyu ciddi şekilde kirletmekte ve aynı şekilde yaban hayatını ve insanları da tehdit etmektedir [15-18]. Başka bir deyişle, boya atık suları yüzey suyuna deşarj edildiğinde insan sağlığı (örn. toksisite, kanserojenlik, mutajenite vb.) ve çevresel kalite (örn. estetik ve saydamlık) üzerinde çeşitli zararlı etkilere neden olmaktadır [10,19].

Vat boyaları pamuklu kumaşların boyanmasında yaygın olarak kullanılan boyalardan biridir [20]. Pamuklu kumaşlar da tüm tekstiller arasında en yaygın kullanılan kumaş olduğu için Vat boyalar da çevreye sıklıkla büyük miktarlarda salınırlar [21]. Yani vat boyaları, tekstil ve diğer endüstriyel atık sularındaki ana kirlilik kaynaklarıdır ve selülozik pamuklu kumaşların boyanmasında yaygın olarak tercih edilmektedir [20,22]. Vat boyaları arasında yer alan Vat green 1, yeşilin tüm renk aralığını kapsayan en iyi polisiklik aromatik karbonil boyalardır [23,24] ve kotların boyanması için oldukça fazla kullanılmaktadır [21]. Mükemmel renk haslığı, yıkanabilirlik ve klorla ağartılabilir renkli lifler ile karakterize edilirler [20,25]. Vat boyaları zayıf tükenme özelliklerine sahip olduğundan uygulanan ilk boyanın %5-20'si sabitlenmeden kalır ve çıkış sularında son bulur [21]. Suda pratik olarak çözünmezler [20,24] ancak selülozik lifler için belirli bir afiniteye sahip olan löko boyası olarak bilinen çözünür bir boya oluşturmak amacıyla bir alkali ve bir indirgeyici ajan varlığında indirgenebilirler [24]. Yani suda çözünmeyen Vat boyalarının boyama işleminden önce güçlü bir indirgeyici madde ile indirgeme yoluyla suda çözünür forma (Leuco dte) dönüştürülmesi gerekir [21]. Vat boyalar, endüstriyel atıksulara salınmalarıyla oluşturabilecekleri kanserojen etkileri nedeniyle çevresel açıdan endişe kaynağıdır [24,26].

Tekstil atık suları için etkili olan renk giderme ve mineralizasyon teknolojilerinin önemi günümüzde giderek artmaktadır. Bazı araştırmacılar, tekstil atıksularının düşük BOİ/KOİ oranına sahip olmaları nedeniyle aerobik koşullar altında biyolojik prosese karşı dirençli olduğunu gözlemlemişlerdir [3]. Boya moleküllerini renkli çıkış sularından gidermek için birçok proses kullanılır ve arıtma yöntemleri; (i) adsorpsiyon, membran filtrasyonu ve iyon değişimi gibi fiziksel yöntemler; (ii) kimyasal oksidasyon, elektrokimyasal bozulma ve ozonlama gibi kimyasal yöntemler ve (iii) biyolojik bozunma şeklinde üç kategoriye ayrılabilir [4,6,27]. Elektrokimyasal arıtma [28], sıvı-sıvı ekstraksiyonu [28,29], flokülasyon, kimyasal oksidasyon, koagülasyon, fotokimyasal degradasyon ve ters ozmoz gibi çeşitli prosesler, sudaki boyanın ıslahı için daha önce kullanılmıştır [4,30]. Bu yöntemlerin tümü boyaları sudan bir dereceye kadar giderebilir, ancak bunlar her zaman ya enerji yoğunlukludurlar ya da yüksek işletme maliyetleri nedeniyle sınırlı oranda kullanılırlar [11,31,32]. Alternatif olarak adsorpsiyon, boya ile kirlenmiş suyun arıtımı için düşük maliyetli ve verimli bir teknik olarak başarıyla kullanılmıştır [28]. Adsorpsiyon, düşük işletim maliyeti ve özellikle de etkili adsorbanlar kullanıldığında yüksek giderim verimliliği nedeniyle boya giderimi için etkili bir tekniktir [33].

Gözenekli malzemelerin kullanıldığı fiziksel adsorpsiyon, kirleticileri adsorbanlar üzerinde biriktiren ve daha fazla arıtma gerektirmeyen, zararsız bir süreçtir [34-36]. Adsorpsiyon, basit tasarım, düşük çamur işleme süreci, kullanım kolaylığı, adsorban rejenerasyonu ve yeniden kullanım yeteneği gibi çeşitli avantajlara sahiptir [37,38]. Adsorban kullanımı büyük bir giderim kapasitesi sağlar ve çok az işlem gerektirir [9,39-41]. Sıfır

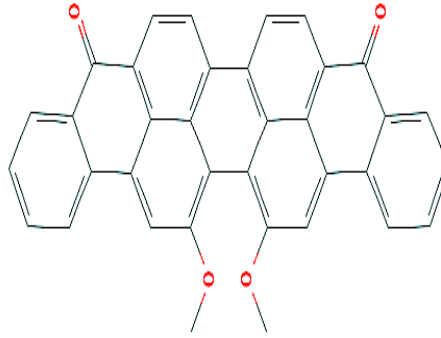
değerlikli demirin (ZVI), sudan adsorpsiyon, indirgeme ve/veya oksidasyon yoluyla çeşitli kirletici maddelerin uzaklaştırılması için uygun bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır [11]. Atık su arıtımı için, ZVI yöntemi genellikle biyolojik bozunmanın arttırılması için bir ön arıtma işlemi olarak uygulanır [42-44]. Çeşitli sınırlamalara (membran tıkanması, sınırlı çok yönlülük, uzun alıkonma süreleri, yüksek maliyet, vb.) sahip olan diğer arıtma teknolojileriyle karşılaştırıldığında, ZVI teknolojisi, çevre dostu olmasının yanı sıra düşük maliyetli ve kolayca elde edilebilirdir ayrıca yüksek bir bozunma kapasitesine sahiptir [10,45,46]. İndirgeyici özelliği göz önüne alındığında, ZVI, boya ları degrade etmek için de kullanılabilir [11]. Renk giderme işlemi için ZVI partiküllerini kullanmanın diğer avantajları, çamurda düşük demir konsantrasyonunun kalması, atık suların daha fazla arıtılmasına gerek duyulmaması, harcanan demir tozunun manyetizma yoluyla kolayca geri dönüştürülebilmesi [6], ZVI'nın yüksek potansiyele sahip saha uygulamaları ve ön arıtma işlemi olarak kolayca kullanımınıdır [3]. Sülfütlü ZVI [10], kil destekli nZVI [47], sıfır değerlikli bakır [48], MgO [49], TiO₂ [50], ZnO, Fe₃O₄ gibi metal oksit nanopartikülleri ile karbon nanotüpler [51], Co₃O₄/SiO₂ [52] gibi hibrit nanokompozit materyalleri, boya ların gideriminde kullanılan diğer malzemelerdir.

Bu çalışmada, farklı deneysel koşullar (pH, mZVI dozajı, başlangıç boya derişimi, sıcaklık) altında C.I. Vat Green 1'in mZVI ile gideriminin incelenmesi ve mZVI'nın C.I. Vat Green 1'i giderim potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

A. Materyaller

Vat Brilliant Green FFB (C.I. Vat Green 1) (C₃₆H₂₀O₄), Colorchem'den satın alınmıştır. Şekil 1, C.I. Vat Green 1'in yapısını göstermektedir. Deneylerdeki tüm çözeltiler oksijeni giderilmiş ultra saf su (USS) (Millipore Milli-Q Ultrapure Gradient 3 V) ile hazırlanmıştır. Kullanılan diğer tüm kimyasallar analitik saflıktadır.



Şekil 1. C.I. Vat Green 1'in yapısı [53]

Deneylerde kullanılan mZVI, daha önceki çalışmamızda [54] olduğu gibi Huguet ve Marshall [55]'da belirtilen metoda göre hazırlanmıştır. Ticari olarak satın alınan demir granüllerinin (Sigma) bilinen bir miktarı sırasıyla 6 M HCl, 5 kez USS, 3 kez etanol ve 3 kez aseton ile yıkanmış, daha sonra kurutulmuş ve kullanılabilecek kadar oksidasyondan koruyabilmek amacıyla N₂ ile oksijeni giderilmiş ortamda saklanmıştır. Partikülün morfolojik yapısı ile element içeriği ve analiz sonrasında bahsedilen bu özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) (ZEISS Sigma 300) ve X-ray enerji dağılım spektrometresi (EDX) ile belirlenmiştir. Spesifik yüzey alanı ise Brunauer–Emmett–Teller (BET) (Micromeritics Tristar II) ile analiz edilmiştir. mZVI'nın izoelektrik noktasının tespit edilebilmesi için zeta potansiyeli kullanılmıştır.

B. Kesikli Deneyler

mZVI ile sulu çözeltilerden C.I. Vat Green 1'in giderimi kesikli adsorpsiyon çalışmaları ile incelenmiştir. Deneyler 120 ml'lik deney şişelerinde 100 ml'lik boya çözeltileri ile gerçekleştirilmiş ve ışığın etkisiyle meydana gelebilecek C.I. Vat Green 1 bozunmasını elimine edebilmek için şişeler alüminyum folyo ile sarılmıştır. Her deney öncesinde boya çözeltileri yeniden hazırlanmıştır. Başlangıç çözelti pH'ı, mZVI dozajı, boya konsantrasyonu, reaksiyon sıcaklığı gibi faktörlerin, C.I. Vat Green 1 adsorpsiyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla; pH'a bağlı sorpsiyon denemesi için farklı pH'lardaki (3, 5, 7, 9) C.I. Vat Green 1 çözeltilerinin ilk konsantrasyonu 25 mg/L'de tutulmuştur. Çözeltilerin ilk pH'ları dijital pHmetre (Consort multi-parameter analyser C3010) kullanılarak HCl veya NaOH ile ayarlanmıştır. mZVI dozajının etkisi yine 25 mg/L konsantrasyonundaki C.I. Vat Green 1 çözeltilerinde 0.5 ile 5 g/L aralığında değişen farklı mZVI dozajlarında araştırılmıştır. Kirletici konsantrasyonunun etkisi ise 1 g/L mZVI dozajında pH=3 değerinde 10, 25 ve 50 mg/L'lik C.I. Vat Green 1 çözeltilerinde incelenmiştir. Sıcaklığın sorpsiyon üzerindeki etkisini belirleyebilmek için başlangıç C.I. Vat Green 1 konsantrasyonu 50 mg/L, pH=3, mZVI dozajı=1 g/L koşulları altında sıcaklık değerleri 30 °C, 45 °C ve 60 °C olarak ayarlanmıştır. Tüm deneyler için mZVI partikülleri eklendikten sonra çözelti 1 dk

boyunca ultrasonik banyoda (Jeitech) bekletilerek partiküllerin dağılması sağlanmış ve hemen sonrasında numune şişeleri sıcaklık kontrollü bir karıştırıcıda (Gallenkamp) 150 rpm'de reaksiyona tabi tutulmuştur. Tüm analizlerde reaksiyon süreleri sonunda alınan numuneler 5 dk süreyle 500 rpm'de santrifüjlenmiş ve üst sıvıdaki C.I. Vat Green 1 konsantrasyonu UV spektrofotometre (HACH LANGE DR6000) kullanılarak $\lambda_{max} = 640 \text{ nm}$ 'de analiz edilmiştir. Aynı analizler kontrol deneyleri için de gerçekleştirilmiştir. Deney aşamaları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deney aşamalarının şematik gösterimi (işlem basamakları sırası ile numaralandırılmıştır)

C.I. Vat Green 1 adsorpsiyon verimleri ve adsorbe olan C.I. Vat Green 1 miktarları sırasıyla Denklem 1 ve 2'ye göre hesaplanmıştır. Giderim mekanizmasının belirlenebilmesi maksadıyla optimum koşullarda Shimadzu TOC-VCPN cihazı ile Toplam Organik Karbon (TOK) ölçümleri de yapılmıştır.

$$\text{Adsorpsiyon verimi (\%)} = ((C_0 - C_e) / C_0) \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = ((C_0 - C_e) \times V) / m \quad (2)$$

Burada; C_0 ve C_e sırasıyla başlangıç ve denge anındaki C.I. Vat Green 1 konsantrasyonu; q_e denge zamanında g mZVI başına adsorbe edilen C.I. Vat Green 1 miktarı (mg g^{-1}), V çözelti hacmi (L) ve m ise adsorbent miktarıdır (g).

C. Adsorpsiyon Kinetikleri ve İzotermeler

C.I. Vat Green 1'in giderim çalışmalarında adsorpsiyon kinetiklerinin belirlenebilmesi amacıyla elde edilen sonuçlara pseudo birinci dereceden (Denklem 3) ve pseudo ikinci dereceden (Denklem 4) modeller uygulanmıştır [54].

$$dq/dt = k_1(q_e - q) \quad (3)$$

Burada; q , herhangi bir zamanda g mZVI başına adsorbe edilen C.I. Vat Green 1 miktarı (mg g^{-1}) ve k_1 , pseudo birinci dereceden hız sabitidir (dk^{-1}).

$$dq/dt = k_2(q_e - q)^2 \quad (4)$$

Burada; k_2 , pseudo ikinci dereceden hız sabitidir (dk^{-1}). Pseudo ikinci dereceden kinetik model, katı fazın adsorpsiyon kapasitesine bağlıdır.

Adsorpsiyon izotermeleri kirletici ile adsorbent maddeler arasındaki etkileşimi gösterir ve dengedeki adsorpsiyon izotermeleri çoğunlukla Langmuir ve Freundlich modelleri ile ifade edilir. Langmuir modeli, homojen bir yüzey üzerinde tek tabakalı adsorpsiyonun meydana geldiğini gösterir. Langmuir modeli (Denklem 5) [54];

$$C_e/q_e = (C_e/q_m) + (1/(K_b q_m)) \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır. Burada; q_m , maksimum tek tabakalı adsorpsiyon (mg g^{-1}), ve K_b , Langmuir sabitidir (Lmg^{-1}).

Heterojen yüzeydeki adsorpsiyonu ifade eden ve yaygın bir şekilde kullanılan Freundlich modeli ise (Denklem 6)[54];

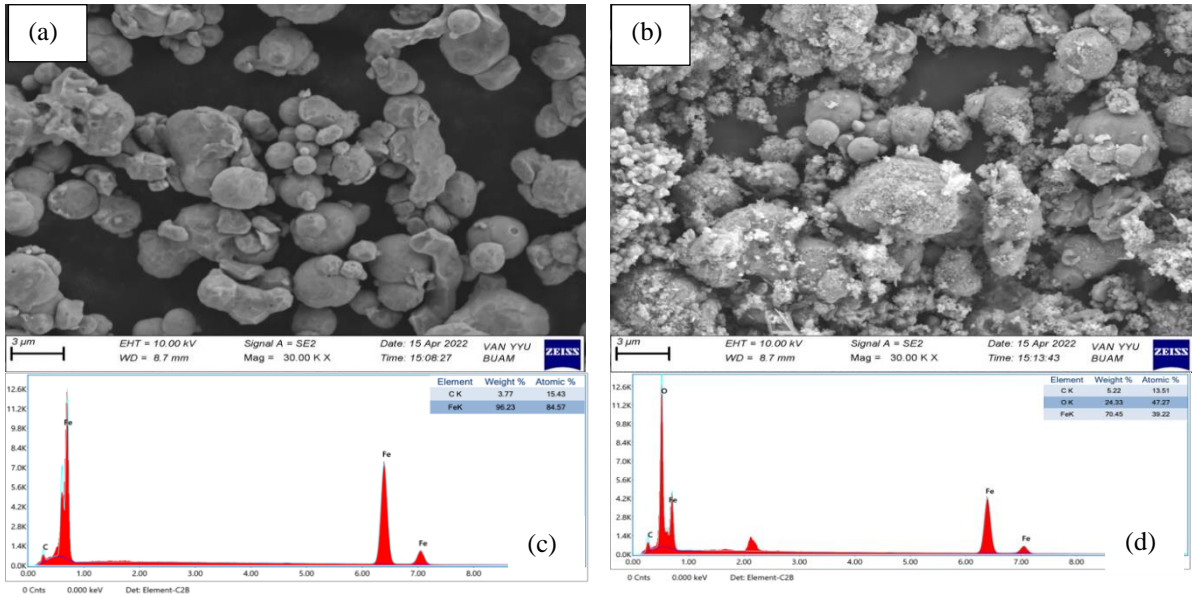
$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

şeklinde tanımlanır. Burada; K_F , adsorpsiyon kapasitesinin göstergesidir; n ise adsorpsiyon yoğunluğunun göstergesidir. Langmuir ve Freundlich model sabitleri, 30, 45 ve 60 °C'de sırasıyla C_e 'ye karşı C_e/q_e ve $\ln C_e$ 'ye karşı $\ln q_e$ eğrileri çizilerek belirlenmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. mZVI Karakterizasyonu

Ticari olarak temin edilen ve yıkama işleminden geçirilip kurutulmuş olan mZVI partikülleri ile analiz sonrasında toplanan mZVI partiküllerinin yüzey morfolojileri SEM ile elementel bileşimleri ise EDX ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3(a)'dan yıkama işleminden geçirilmiş demir partiküllerin çoğunlukla pürüzsüz, düzenli bir yapıda bulunduğu ve yaklaşık olarak 5 μm 'den küçük çaplarda küresel şekillerden oluştuğu gözlemlenebilmektedir. Ayrıca demir partikülleri manyetik özellikleri sebebiyle birbirleriyle temas halindedir ve zincir şeklinde bir yapı oluşturma eğilimindedir [56]. Şekil 3(b), mZVI yüzeyinin ve partiküller arasındaki boşlukların büyük bir kısmının C.I. Vat Green 1 ile kaplandığını ve yüzeylerin pürüzlü bir hal aldığını göstermektedir. Partikülün gözeneklerinin C.I. Vat Green 1 ile büyük oranda dolması hatta gözeneklerin boya molekülleri ile oldukça fazla bloke olması mZVI'nın C.I. Vat Green 1'e karşı yüksek afinitesini göstermektedir. Hamdy vd., sulu çözeltilerden metilen mavisi (MB) giderimi ile ilgili yaptıkları çalışmada MB moleküllerinin nZVI (nano ölçekli sıfır değerlikli demir) gözeneklerini işgal ettiğini ve doldurduğunu görmüşlerdir [28]. Arabi vd.'de Vat boyanın adsorbsiyon kinetiklerini ve termodinamiklerini incelerken nZVI yüzeyinin Vat Green 1 ile kaplandığını gözlemlemişlerdir [21]. Şekil 3(c) mZVI'nın yüzey yapısında %96.23 oranında Fe ve %3.77 oranında C olduğunu göstermektedir. Bu değerler adsorpsiyon işlemi sonrasında %70.45 Fe, %24.33 O ve %5.22 C olarak belirlenmiştir (Şekil 3(d)). Sadece yıkama işleminden geçirilmiş olan mZVI'nın yüzey yapısındaki C, yıkama işleminde kullanılan etanol ve asetonun kaynaklanmaktadır [28]. Analiz sonrasında ise toplam oran (%100) içerisinde O ve C oranındaki artışın sebebi adsorbe olan C.I. Vat Green 1 molekülünün kimyasal yapısındaki C ve O'dur. Fe oranındaki azalma da yine çoğunlukla yüzey yapısına O'nun dahil olması ve kısmen de olsa mZVI'nın su ve hava ile reaksiyona girmesiyle yüzeyde demir oksit kabuğunun meydana gelmesiyle [57].

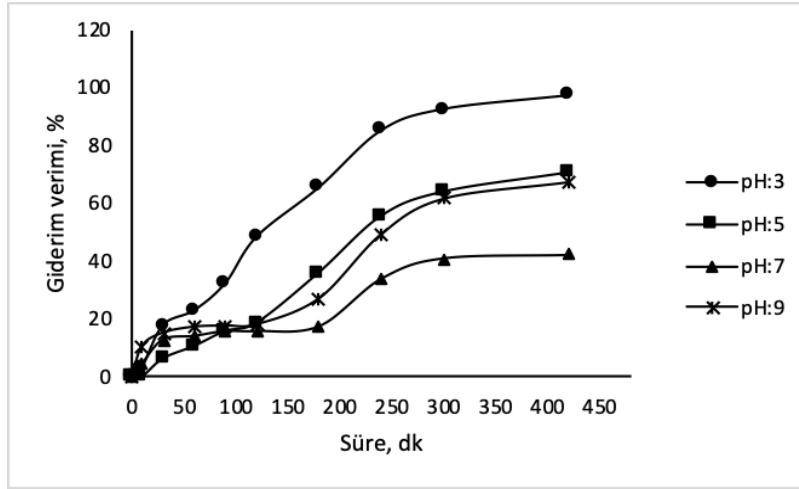


Şekil 3. mZVI partiküllerinin SEM görüntüleri: (a) saf mZVI (b) analiz sonrası mZVI ve EDX sonuçları: (c) saf mZVI (d) analiz sonrası mZVI

mZVI partiküllerinin spesifik yüzey alanı ise BET analizi ile 5.2 m^2/g olarak tespit edilmiştir. Mikro boyutta olan partiküllerin bulunan bu yüksek yüzey alanı, mZVI partiküllerinin yüksek adsorpsiyon kapasitesine ve aktiviteye sahip olmasını sağlar. Dolayısıyla reaksiyonlar sırasında C.I. Vat Green 1 için daha fazla kullanılabilir ZVI (sıfır değerlikli demir) yüzeyi mevcut olmakta ve renk giderim verimi daha yüksek oranda gerçekleşmektedir. Birim kütle başına geniş yüzey alanına sahip nano/mikro ZVI parçacıklarının, kirlenmiş arazi, yüzey ve yeraltı suyunu iyileştirme konusunda oldukça verimli bir indirgeyici ajan olduğu daha önce bulunmuştur [58]. Net yüzey yükünün sıfır olduğu pH değeri (pH_{zpc}) de zeta potansiyeli ile 5.73 olarak belirlenmiştir. $\text{pH} < 5.73$ olduğunda mZVI pozitif yüklükten $\text{pH} > 5.73$ 'de negatif yüklüdür [54].

B. Çözelti pH'sının Etkisi

mZVI ile sulardan kirletici maddelerin giderilmesi reaksiyonlarında giderim verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri pH'dır. Bu sebeple C.I. Vat Green 1'in giderim verimlilikleri 3, 5, 7 ve 9 olan başlangıç pH değerlerinde 7 saatlik reaksiyon süresince belirlenmiştir.



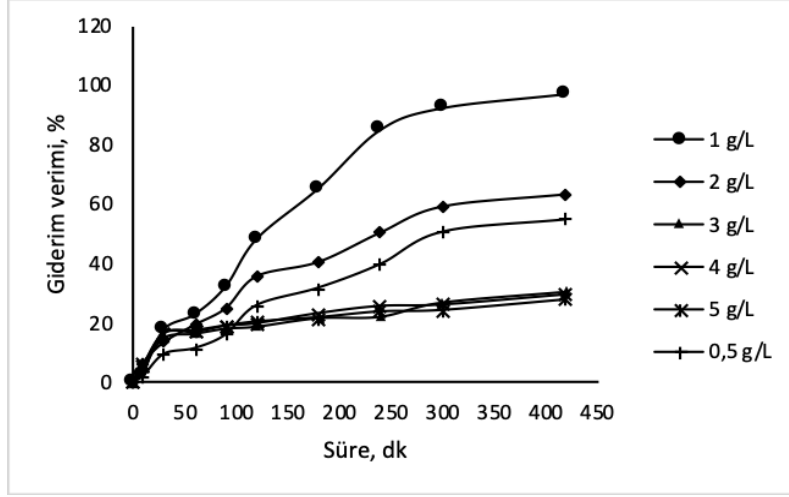
Şekil 4. C.I. Vat Green 1 giderimi üzerine başlangıç çözelti pH'nın etkisi (analiz koşulları: mZVI=1 g/L, C₀=25 mg/L, T=30 °C)

Şekil 4, C.I. Vat Green 1 boyasının mZVI üzerine adsorpsiyonunda pH=5 ve 9 değerleri arasında büyük bir farklılığın olmadığını göstermektedir. Fakat pH=3 değerinde giderim verimi oldukça artmıştır. Çözelti pH'ı reaksiyon sırasında (ilk pH=3; son pH=4.78) demir ve H⁺'nin birleşimi ile korozyonun artması sebebiyle yükselmiştir [59]. Diğer pH değerlerine kıyasla pH=7'de ise en düşük giderim verimi gözlenmiştir. pH'ın alkali pH değerlerine artırılması ile sıfır değerlikli demir ile renk giderim veriminde azalmanın meydana geldiği Chen vd. tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir [60]. Demirin yüzey üzerinde bir oksihidroksit tabakası oluşturmak üzere sulu ortamda su ile reaksiyona girdiği bilinmektedir [6]. Yüksek pH değerlerinde kütle transferini inhibe eden daha fazla mineral çökmesi sebebiyle ZVI, genellikle düşük reaktiviteye sahiptir. Düşük pH ise demir korozyonunun hızlanması ve pasif tabakanın azalması sebebiyle ZVI reaktivitesini artırabilir [61]. Chatterjee vd. yaptıkları çalışmada asidik pH (4-6) değerlerinde daha yüksek renk giderim verimi elde etmişlerdir [6]. Alkali pH değerlerinde hidroksil iyonları ve ZVI yüzeyindeki Fe⁺² iyonları demir hidroksitler olarak ZVI'nin yüzeyindeki reaktif alanları işgal edecek şekilde çökeler ve bu durum gerçekleşecek olan reaksiyonu engeller [3]. Yani alkali pH değerlerindeki düşük renk giderim verimi mZVI yüzeyinin oluşan korozyon ürünleri ile kaplanması ile açıklanabilir. Bu durum da etkin yüzey alanının azalmasına sebep olabileceği gibi yüzeyde meydana gelecek reaksiyonları da kısıtlar. Diğer yandan mZVI yüzey yükü de çözeltinin pH'ına bağlıdır. mZVI'nin pH_{ZPC} değerinin 5.73 olması sebebiyle pH<5.73 olduğunda mZVI pozitif yüklükten pH>5.73'de negatif yüklüdür. Bu nedenle mZVI yüzey yükü çözelti pH'ındaki artış ile pozitiften negatife doğru değişkenlik gösterir [6] ve bu durum C.I. Vat Green 1 boya molekülünün yüzey üzerine sorpsiyonunu azaltır. Yani pH<pH_{ZPC} iken boya moleküllerinin negatif yüklü, mZVI'nin pozitif yüklü olması C.I. Vat Green 1'in demir yüzeyine adsorpsiyonunu arttırmıştır. Arabi vd. da aynı sebeplere bağlı olarak nZVI ile Vat Green 1 gideriminde düşük pH'ların daha uygun olduğunu görmüşlerdir [21]. Başlangıç çözelti pH'ı 7 iken rengiderim reaksiyonları sırasında pH değişiminin olmamasıyla giderim veriminde daha düşük değerler gözlenmiştir. pH 5, 7 ve 9 olduğu durumlarda meydana gelen C.I. Vat Green 1 giderimi elektrostatik olmayan etkileşim sebebiyledir. Örneğin pH 5, 7 ve 9'da çözeltide bulunan C.I. Vat Green 1, reaksiyon süresi sonunda sırasıyla %70, %42 ve %67 oranında giderilmiştir. pH=3'de ise %97 oranında bir giderim meydana gelmiştir. Çözeltinin son pH değerleri ise pH 3, 5, 7 ve 9 için sırasıyla 4.78, 6.68, 6.95 ve 7.01 olarak belirlenmiştir. İlk çözelti pH'sının 3 olduğu durumda reaksiyon sırasında pH'nın artması metalik demir yüzeyleri üzerinde demir oksitlerin asit yıkanması sebebiyledir [62]. Başlangıç pH'sı 7'ye kadar olan analizlerde son pH artarken 7'den büyük pH değerinde son pH'da azalma meydana gelmiştir. O₂ yokluğunda pH'nın artmasının sebebi, Denklem 7'ye göre Fe⁰'nin Fe⁺²'ye oksitlenmesi ve H⁺'nin ise H₂'ye indirgenmesi ve daha sonra da Denklem 8'e göre H₂O'nun redüksiyonunun OH⁻'yi oluşturmasıdır. Farklı pH değerlerinde çözeltideki çözünmüş toplam Fe konsantrasyonu da ölçülmüş ve sonuçların ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Sonuç olarak C.I. Vat Green 1 boyasının mZVI ile giderimi için pH=3 değerinin daha uygun olduğu bulunmuştur.



C. mZVI Dozajının Etkisi

Sulu çözeltilerden C.I. Vat Green 1 boyasının adsorpsiyonu üzerine mZVI dozajının etkisi 0.5 ile 5 g/L arasında değişen farklı mZVI dozajları uygulanarak 7 saat boyunca incelenmiştir. İlk çözelti pH'ı optimum pH olan 3'te tutulurken, boya konsantrasyonu da 25 mg/L olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir.



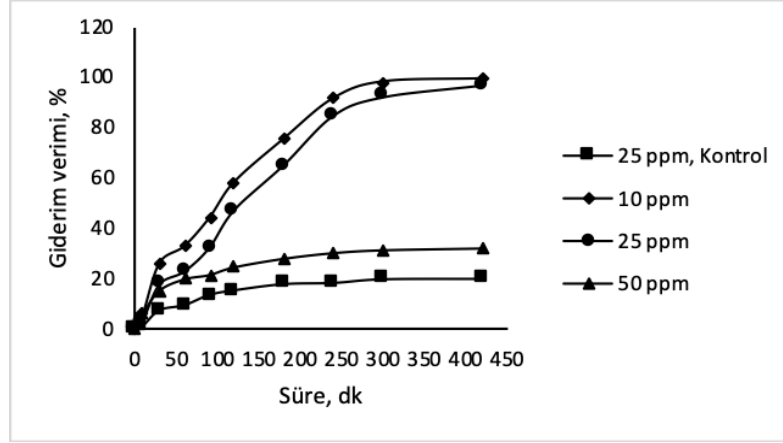
Şekil 5.C.I. Vat Green 1 giderimi üzerine mZVI dozajının etkisi (analiz koşulları: pH=3, C₀=25 mg/L, T=30 °C)

Şekil 5'ten görülebileceği gibi 0.5 g/L mZVI ilavesi ile giderim verimi artmış ve mZVI dozajının 0.5 g/L'den 1 g/L'ye artırılmasıyla %54 olan giderim verimi %97'ye ulaşmıştır. 1 g/L mZVI'nin üzerindeki dozaj artışları boya giderim verimini azaltmıştır. En düşük olan giderim verimi 5 g/L mZVI dozajında %27 oranında gerçekleşmiştir. 2, 3, 4 ve 5 g/L mZVI dozajlarında sırasıyla %63, %30, %29 ve %27 oranında giderim verimleri elde edilmiştir. Donadelli vd. [63] tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi mZVI dozajı arttıkça meydana gelen verim azalmasının, daha yüksek mZVI yüklemeleri sebebiyle pH'ın daha hızlı artması ve demir yüzeyi pasivasyonunun daha kısa sürede meydana gelmesi sonucunda ZVI reaktivitesinin azalmasından [64] ve yüksek dozlarda demir parçacıklarının birikme eğiliminde olması nedeniyle ZVI gramı başına mevcut olan reaktif yüzey alanlarının sayısındaki azaldan [58] kaynaklandığı düşünülmüştür. Li vd. bentonit destekli ZVI sütununu kullanarak atıksudan nitratı gidermeye çalışmışlar ve düşük dozajlarda giderim veriminin daha da arttığını gözlemlemişlerdir [65]. Le vd.'nin RB 19 (Reaktif Mavi 19) boyasını gidermek için yaptıkları çalışmada aşırı ZVI kullanımı, reaksiyonu inhibe etmiştir [66].

Reaksiyonun ilk 90 dk'sında 3, 4 ve 5 g/L dozajlarda giderim verimleri birbirine yakın değerler seyrederken diğer dozajlarda farklılıklar gözlenmiştir. 60 dk'dan sonra 1 g/L mZVI dozajının uygulandığı koşulda ani bir verim artışı meydana gelmiştir. Bu artış 1 g/L için gözlenen kadar büyük olmasa da 0.5 ve 2 g/L dozajlar içinde gözlenmiştir. 1 ve 2 g/L dozajlar için 90 dk'ya kadar verimler yakın değerler seyrederken asıl farklılığın 90 dk sonrasında meydana geldiği görülmüştür. Diğer reaktörlerde ise ilk üç reaktörde gözlenen verim artışına benzer bir artış gözlenmemiştir. Tüm dozajlar için 300 dk'lık reaksiyon süresi sonunda giderim hemen hemen aynı kalmış veya sabitlemiştir. Daha fazla demir kullanılmasının verimi olumsuz etkilediği ve maliyeti de artıracığı düşünüldüğünde %97 olarak gözlenen giderim verimi ile birlikte optimum mZVI dozajı, 1 g/L olarak belirlenmiştir.

D. Başlangıç C.I. Vat Green 1 Konsantrasyonunun Etkisi

Başlangıç C.I. Vat Green 1 konsantrasyonunun etkisi pH=3 değerinde 1 g/L mZVI mevcudiyetinde, 10, 25 ve 50 mg/L C.I. Vat Green 1 başlangıç konsantrasyonlarına sahip olan boya çözeltilerinde reaksiyon süresine bağlı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.



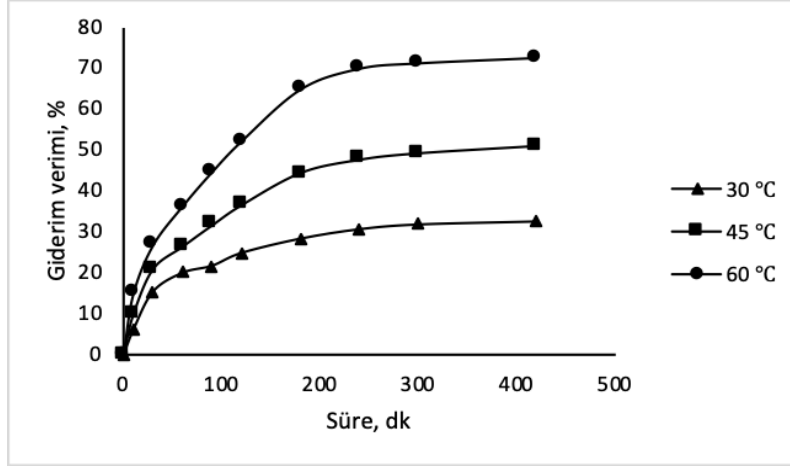
Şekil 6. C.I. Vat Green 1 giderimi üzerine boya konsantrasyonunun etkisi (analiz koşulları: pH=3, mZVI=1 g/L, T=30 °C)

Reaksiyon süresi sonunda 10 ve 25 mg/L C.I. Vat Green 1 konsantrasyonlarında giderim verimleri sırasıyla %99 ve %97 değerleriyle yüksek ve birbirine yakın iken 50 mg/L başlangıç konsantrasyonunda daha düşük giderim verimi (%32) gözlenmiştir. Yani 10 ve 25 mg/L C.I. Vat Green 1 konsantrasyonlarında reaksiyon hızı oldukça yüksek ve birbirine yakın iken 50 mg/L C.I. Vat Green 1 konsantrasyonunda reaksiyon hızı oldukça yavaşlamıştır. Yüksek boya derişimi söz konusu olduğunda adsorbent yüzeyi kısa sürede boya molekülleri tarafından bloke olmuş, adsorbentin doymuş olan aktif alanları artmış ve bu durum giderim verimini azaltmıştır. Düşük başlangıç boya derişimlerinde adsorbe olacak olan boya moleküllerinin aktif yüzey alanlarına oranı daha düşüktür ve bu daha fazla boya molekülünün yüzeye bağlanabileceği anlamına gelir [67]. Yüksek başlangıç derişimlerinde giderim verimi azalmıştır, bu durumun sebepleri (a) mZVI yüzeylerine bağlanacak tüm moleküller için yeterli yüzeyin mevcut olmaması ve (b) boya molekülleri arasındaki rekabetçi adsorbsiyonun mevcudiyetidir [68]. Hamdy vd., benzer sebepler ile başlangıç boya (MB) derişiminin artması ile giderim veriminin azaldığını gözlemlemişlerdir [28]. Karam vd. de nZVI, AC (aktif karbon) ve GT-nZVI (yeşil sentez nano sıfır değerlikli demir) kullanarak gerçekleştirdikleri karşılaştırmalı bir adsorpsiyon çalışmasında her üç adsorbent için başlangıç boya konsantrasyonu arttıkça aktif yüzey alanlarının azalması sebebiyle giderim veriminin azaldığını ve yüksek derişimlerde reaksiyonun başlangıcında daha yüksek reaksiyon hızlarının gözlemlendiğini sonra dengeye ulaştığını gözlemlemişlerdir [9]. Davarnejad vd., demir oksit nanopartiküllerini kullanarak MB adsorbsiyonunu çalışmış ve düşük boya konsantrasyonlarında boya moleküllerinin aktif alanlara olan oranlarının düşük olması sebebiyle daha yüksek giderim verimi elde etmişlerdir. Yüksek MB konsantrasyonlarında ise aktif alanların doymuşluğu sebebiyle MB giderim yüzdesi azalmıştır [69]. Zhang vd. 50, 100 ve 200 mg/L AR 73 (Asit kırmızı 73) konsantrasyonları ile çalışmışlar, başlangıç konsantrasyonlarının artması ile gözlenen giderim verimi azalması 200 mg/L'lik konsantrasyonda hız sabitinin daha fazla azalması ile çok daha fazla olmuştur [10]. Chatterjee vd. ZVI ile renk giderimini 10 ile 1000 mg/L RB5 (Reaktif Siyah 5) konsantrasyonlarında denemişler ve başlangıç boya konsantrasyonunun artması ile giderim veriminin azaldığını gözlemlemişlerdir [6].

Analizin bu aşamasında boya giderim çalışmalarına ilave olarak giderim prosesini doğrulayabilmek amacıyla her üç kirletici derişimi için TOK (Toplam Organik Karbon) analizleri yapılmıştır (Sonuçlar grafikleştirilmemiştir). Boya gideriminde gözlenen sonuçlara benzer eğilimde sonuçlar gözlenmiştir. 10 ve 25 mg/L başlangıç C.I. Vat Green 1 derişimlerinde TOK giderimi çok daha hızlı ve daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. 120 dk sonunda 10, 25 ve 50 mg/L C.I. Vat Green 1 derişimleri için TOK giderim verimleri sırasıyla yaklaşık olarak %50, %24 ve %13 iken 420 dk sonunda bu değerler sırasıyla %80, %67 ve %21'e ulaşmıştır. Gözlenen TOK giderim verimleri, temel giderim mekanizmasının adsorpsiyon olduğunu göstermektedir.

E. Sıcaklığın Etkisi

Kimyasal reaksiyonlar sıcaklıktaki değişikliklere duyarlı olduğu için mZVI ile C.I. Vat Green 1'in adsorpsiyonu üzerine sıcaklığın etkisi, reaksiyon süresine bağlı olarak 30 °C, 45 °C ve 60 °C sıcaklıklarda incelenmiştir. Çok yüksek sıcaklıklarda C.I. Vat Green 1'in bozunmasını önleyebilmek amacıyla daha yüksek sıcaklıklar çalışılmamıştır. Şekil 7, 50 mg/L C.I. Vat Green 1 için sıcaklığa ve temas süresine bağlı olarak adsorpsiyon veriminde meydana gelen değişiklikleri göstermektedir.



Şekil 7. C.I. Vat Green 1 giderimi üzerine sıcaklık değişiminin etkisi (analiz koşulları: pH=3, mZVI=1 g/L, C₀=50 mg/L)

Sıcaklığın 30 °C'den 60 °C'ye artırılmasına bağlı olarak adsorpsiyon verimlerinin reaksiyon süresiyle arttığı bulunmuştur. Bu durum sıcaklığın artması ile boya moleküllerinin sulu çözeltiden mZVI partiküllerine doğru olan taşınmasının artması ile açıklanabilir. İncelenen tüm sıcaklıklar için dengeye ulaşma süreleri çok büyük değişiklikler göstermemiştir ve tüm sıcaklıklarda ilk 30 dk içerisinde hızlı bir giderim verimi elde edilirken daha sonra bu hızda azalmalar meydana gelmiş ve denge süreleri 300 dk olarak belirlenmiştir. Yani bu süre içerisinde mZVI yüzeyindeki reaktif alanların büyük bir kısmı tükenmiş sonrasında ise reaksiyon çok daha yavaş gerçekleşmeye devam etmiştir. 30, 45 ve 60 °C sıcaklıklarda 300 dk'lık reaksiyon süresinin sonunda çözeltideki C.I. Vat Green 1'in sırasıyla %31, 49 ve 71'i ve 420 dk sonrasında ise sırasıyla %32, 50 ve 72'si adsorbe edilmiştir. Sıcaklık artışı ile adsorpsiyon veriminde gözlenen artış, adsorbent ve kirletici madde arasındaki adsorptif etkileşimin artması sebebiyle olabilir. Arabi vd., nZVI ile C.I. Vat Green 1'in gideriminde sıcaklık artışıyla giderim veriminin arttığını gözlemlemişlerdir [21]. Hamdy vd., sıcaklığın 30 °C'den 50 °C'ye çıkarılmasının sıfır değerlikli demir nanopartikülleri ile MB giderimini %97.4'ten %99'a arttırdığını bulmuşlardır ve bunu şu nedenlerle açıklamışlardır: (a) sıcaklığın artması MB çözünürlüğünü ve hareketliliğini arttırmış ve partikül içi difüzyonu arttırmıştır, (b) çözelti içerisindeki çözülmüş oksijenin azalması demir nanopartiküllerinin oksidasyonunu önlemiştir ve (c) aktivasyon enerjisinin artması yeni adsorpsiyon alanlarını ve reaktif yüzey kompleksini oluşturmuştur [28].

F. Adsorpsiyon Kinetikleri

Sulu çözeltilerden C.I. Vat Green 1'in mZVI ile adsorpsiyon kinetiklerini belirleyebilmek amacıyla farklı sıcaklık ve temas süresine bağlı olarak elde edilen veriler pseudo birinci dereceden Lagergren [70] ve pseudo ikinci dereceden Ho ve McKay [71] kinetik eşitliklerle analiz edilmiştir. Tablo 1, C.I. Vat Green 1 adsorpsiyonu için her iki modelin uygulanabilirliğini göstermektedir.

Her iki modelin uygulanabilirliğini gösteren regresyon katsayıları (R²) dikkate alındığında ve kıyaslandığında ikinci dereceden modelin R² değerinin 1'e daha yakın olduğu görülmektedir. Bu değerler elde edilen verilerin ikinci dereceden modele daha iyi uyum sağladığını göstermektedir. Her bir sıcaklık için kinetik eşitliklerden hesaplanan hız sabitleri ve denge adsorpsiyon kapasiteleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. C.I. Vat Green 1 adsorpsiyonu için pseudo birinci dereceden ve pseudo ikinci dereceden modellerinin uygulanabilirliği.

Sıcaklık (°C)	Lagergren Pseudo-Birinci Derece	R ²	Ho ve McKay Pseudo-İkinci Derece	R ²
30	y = -0.0125x + 2.6314	0.9812	y = 0.0545x + 2.7645	0.9980
45	y = -0.0135x + 3.2353	0.9758	y = 0.0337x + 2.1357	0.9948
60	y = -0.0157x + 3.7746	0.9499	y = 0.0231x + 1.5454	0.9913

Pseudo ikinci dereceden model için hesaplanan q_e değerleri, deneysel olarak bulunan q_e değerleri ile uyum içerisinde. Pseudo ikinci dereceden modele göre 30, 45 ve 60 °C için hesaplanan adsorpsiyon kapasiteleri (q_e) sırasıyla 18.34, 29.67 ve 43.29 mg/g iken bu değerler deneysel olarak sırasıyla 15.92, 24.79 ve 36.05 mg/g olarak belirlenmiştir. Hız sabiti değerleri üç sıcaklık için sırasıyla 0.0010, 0.0005 ve 0.0003 g/mg.dk olarak bulunmuştur. Bu değerler daha önce mZVI üzerine TC (Tetrasiklin) (sırasıyla 0.0035, 0.0031, and 0.0054 g/mg.dk) ve OTC (Oksitetrasiklin) (sırasıyla 0.013, 0.004 ve 0.013 g/mg.dk) adsorpsiyonu için bulunan değerlerden çok daha

düşüktür [54]. Hesaplanan üç hız sabiti değerinin farklılıklar sergilemesi adsorpsiyonun sıcaklıkla değiştiğini göstermektedir. Hız sınırlayıcı adım, iki faz arasındaki fizikokimyasal etkileşimler sebebiyle bir çözüldüden giderimin gerçekleştiği kemisorpsiyonu içeren bir yüzey adsorpsiyonu olabilir [54,72,73]. Pseudo ikinci dereceden model kinetikleri, sulu çözümlerden boyaların adsorpsiyonu için yaygın olarak kullanılan metotlardan biridir [74] ve bu çalışmada da elde edilen verilere en iyi uyumu göstermiştir.

Tablo 2. Birinci ve ikinci dereceden hız sabitleri (k_1 , k_2) ile denge adsorpsiyon kapasitelerinin (q_e) sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık (°C)	q_e , deneysel (mg/g)	Pseudo - Birinci derece		Pseudo - İkinci derece	
		k_1 (dk ⁻¹)	q_e , hesap (mg/g)	k_2 (g/mg.dk)	q_e , hesap (mg/g)
30	15.924	0.0125	13.8930	0.001074	18.3486
45	24.799	0.0135	25.4139	0.000532	29.6736
60	36.057	0.0157	43.5801	0.000345	43.2900

G. Adsorpsiyon İzotermi

mZVI'in C.I. Vat Green 1 için adsorpsiyon kapasitesini belirleyebilmek amacıyla farklı sıcaklıklarda ve farklı başlangıç derişimlerinde yapılan analizlerden elde edilen verilerden yola çıkılarak sırasıyla C_e 'ye karşı C_e/q_e grafiği ve $\ln(C_e)$ 'ye karşı $\ln(q_e)$ grafiği çizilerek Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermelerinin uygulanabilirliği ortaya koyulmak istenmiştir. İzoterm sabitleri ve belirlenen regresyon katsayıları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. mZVI üzerine C.I. Vat Green 1'in adsorpsiyonu için Langmuir ve Freundlich izoterm sabitleri

Sıcaklık (°C)	Langmuir izotermi			Freundlich izotermi		
	Q^0 (mg/g)	b (l/mg)	R^2	K_F	n	R^2
30	15.85	5.0887	0.9997	14.436	13.56852	0.2509
45	24.94	7.7115	1	17.6405	7.68049	0.5081
60	36.50	6.3721	1	22.6577	4.90918	0.8188

Çalışılan şartlar altında mZVI üzerine C.I. Vat Green 1'in adsorpsiyonunun Freundlich izotermine kıyasla Langmuir izotermine daha iyi uyum sağladığı bulunmuştur. Benzer şekilde daha önceki çalışmamızda da Tetrasiklin ve Oksitetrasiklin'in mZVI ile sorpsiyonunun Langmuir izotermi ile ifade edilebileceği bulunmuştur [54]. Langmuir izotermine göre mZVI'nin maksimum adsorpsiyon kapasitesi (Q^0) 30, 45 ve 60 °C için sırasıyla 15.85, 24.94 ve 36.50 mg/g olarak hesaplanmıştır. 60 °C için belirlenen 36.50 değeri, mZVI ile OTC gideriminin yapıldığı çalışmada [54] hesaplanan 34.01 mg/g değerine yakın iken nZVI üzerine Vat Green 1'in adsorpsiyonunun incelendiği çalışmada [21] bulunan 70.92 mg/g değerinden küçüktür.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada sulu çözümlerden C.I. Vat Green 1'in uzaklaştırılması amacıyla ticari olarak satın alınıp sadece yıkama işleminden geçirilmiş olan mZVI'nin adsorpsiyon özelliği incelenmiştir. Sonuçlar, sulu çözümlerden C.I. Vat Green 1'in etkili bir şekilde uzaklaştırılması için mikro ölçekli sıfır değerlikli demirin düşük maliyetli bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışılan kirleticinin giderimi daha çok asidik pH'da gerçekleşmiştir. 5.2 m²/g BET yüzey alanı yüksek giderim verimi sağlarken, 5.73 olan pH_{zpc} değerinden daha küçük pH değerlerinde mZVI'nin pozitif yüklü olması ve asidik pH değerlerinde demir korozyonunun daha fazla şekilde meydana gelmesi, pH:3'de en yüksek giderim veriminin (%97) gözlenmesine sebep olmuştur. Demir dozajlarının 2 ile 5 g/L arasında değiştiği durumlarda aşırı demir kullanımı pH'ın artmasına ve bu durum da mZVI yüzeyindeki aktif alanların azalmasına neden olduğundan en yüksek giderim verimi (%97), 1 g/L mZVI dozajında meydana gelmiştir. Optimum pH:3 ve mZVI dozajı da 1 g/L olarak belirlenmiş ayrıca sıcaklığın 30 ve 60 °C arasındaki artışı boya giderim veriminin %32'den %72'ye çıkmasını sağlamıştır. TOK giderim verimi sonuçları, giderim metodunun adsorpsiyon olduğunu doğrulamıştır. mZVI ile C.I. Vat Green 1'in giderimi neticesinde elde edilen adsorpsiyon kinetikleri, pseudo ikinci dereceden modele en iyi şekilde uyum gösterirken, izoterm çalışmasının sonuçları ise dengedeki sonuçların Langmuir modeli ile temsil edilebileceğini göstermiştir. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi 36.50 mg/g olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak sulu ortamlardan boya gibi kirleticilerin giderilebilmesi için kullanılan adsorbentin iyi bir performans sergilediği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Fu, F., Han, W., Tang, B., Hu, M., & Cheng, Z. (2013). Insights into environmental remediation of heavy metal and organic pollutants: Simultaneous removal of hexavalent chromium and dye from wastewater by zero-valent iron with ligand-enhanced reactivity. *Chemical Engineering Journal*, 232, 534–540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.014>.
- [2] Lee, J.W., Cha, D.K., Oh, Y.K., Ko, K.B., & Jin, S.H. (2010). Wastewater screening method for evaluating applicability of zero-valent iron to industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 180, 354–360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.038>.
- [3] Chang, M-C., Shu, H-Y., & Yu, H-H. (2006). An integrated technique using zero-valent iron and UV/H₂O₂ sequential process for complete decolorization and mineralization of C.I. Acid Black 24 wastewater. *Journal of Hazardous Materials B*, 138, 574–581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.088>.
- [4] Ravikumar, K.V.G., Santhosh S., Sudakaran, S.V., Nancharaiah, Y.V., Mrudula P., Chandrasekaran, N., & Mukherjee, A. (2018). Biogenic nano zero valent iron (Bio-nZVI) anaerobic granules for textile dye removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 1683–1689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.023>.
- [5] Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresource Technology*, 97, 1061–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>.
- [6] Chatterjee, S., Lim, S-R., & Woo, S.H. (2010). Removal of Reactive Black 5 by zero-valent iron modified with various surfactants. *Chemical Engineering Journal*, 160, 27–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.045>.
- [7] Paul, S.A., Chavan, S.K., & Khambe, S.D. (2012). Studies on characterization of textile industrial waste water in Solapur city. *International Journal of Chemical Sciences*, 10(2), 635-642.
- [8] Ghaly, A.E., Ananthashankar, R., Alhattab, M., & Ramakrishnan, V.V. (2014). Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review. *Journal Chemical Engineering Process Technology*, 5, 182. DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000182>.
- [9] Karam, A., Zaher, K., & Mahmoud, A.S. (2020). Comparative Studies of Using Nano Zerovalent Iron, Activated Carbon, and Green Synthesized Nano Zerovalent Iron for Textile Wastewater Color Removal Using Artificial Intelligence, Regression Analysis, Adsorption Isotherm, and Kinetic Studies. *Air, Soil and Water Research*, 13, 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1177/1178622120908273>.
- [10] Zhang, L., Shao, Q., & Xu, C. (2019). Enhanced azo dye removal from wastewater by coupling sulfidated zero-valent iron with a chelator. *Journal of Cleaner Production*, 213, 753-761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.183>.
- [11] Wang, S., Song, Y., & Sun, Y. (2018). Enhanced dyes removal by sulfidated zerovalent iron: Kinetics and influencing factors. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 339–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.014>.
- [12] Sun, X., Kurokawa, T., Suzuki, M., Takağı, M., & Kawase, Y. (2015). Removal of cationic dye methylene blue by zero-valent iron: Effects of pH and dissolved oxygen on removal mechanisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 50, 1057–1071. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2015.1038181>.
- [13] Du, Y., Dai, M., Cao, J., Peng, C., Ali, I., Naz, I., & Li, J. (2020). Efficient removal of acid orange 7 using a porous adsorbent-supported zero-valent iron as a synergistic catalyst in advanced oxidation process. *Chemosphere*, 244, 125522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125522>.
- [14] Basavarajappa, P.S., Seethya, N.H.B., Ganganagappa, N., Eshwaraswamy, K.B., & Reddy, K.R. (2018). Enhanced Photocatalytic Activity and Biosensing of Gadolinium Substituted BiFeO₃ Nanoparticles. *ChemistrySelect*, 3(31), 9025–9033. DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.201801198>.
- [15] Lops, C., Ancona, A., Di Cesare, K., Dumontel, B., Garino, N., Canavese, G., Hernández, S., & Cauda, V. (2019). Sonophotocatalytic degradation mechanisms of Rhodamine B dye via radicals generation by micro- and nano-particles of ZnO. *Applied Catalysis B: Environmental*, 243, 629–640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.10.078>.
- [16] Reddy, V.C., Reddy, N.I., Akkinapally, B., Harish, V.V.N., Reddy, R.K., & Jaesool, S. (2019). Mn-doped ZrO₂ nanoparticles prepared by a template-free method for electrochemical energy storage and abatement of dye degradation. *Ceramics International*, 45, 15298–15306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.020>.
- [17] Tavangar, T., Karimi, M., Rezakazemi, M., Reddy, K.R., & Aminabhavi, T.M. (2019). Textile waste, dyes/inorganic salts separation of cerium oxide-loaded loose nanofiltration polyethersulfone membranes. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123787>.
- [18] Ain, Q.U., Rasheed, U., Yaseen, M., Zhang, H., & Tonga, Z. (2020). Superior dye degradation and adsorption capability of polydopamine modified Fe₃O₄-pillared bentonite composite. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122758>.

- [19] Chequer, F.M.D., Dorta, D.J., & Oliveira, D.P.D. (2011). Azo dyes and their metabolites: does the discharge of the azo dye into water bodies represent human and ecological risks? Ed: Hauser, P.J. (Ed.), *Advances in Treating Textile Effluent*. InTech, Rijeka, Croatia, Sayfa: 27-48. DOI: <https://doi.org/10.5772/19872>.
- [20] Rápó, E., & Tonk, S. (2021). Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: A Review of Results from the Last Five Years (2017–2021). *Molecules*, 26, 5419. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26175419>.
- [21] Arabi, S., Sohrabi, M.R., & Khosravi, M., 2013. Adsorption kinetics and thermodynamics of vat dye onto nano zero-valent iron. *Indian Journal of Chemical Technology*, 20(3), 173-179.
- [22] Qayyum, S., Nasir, A., Mian, A.H., Rehman, S., Qayum, S., Siddiqui, M.F., & Kalsoom, U. (2020). Extraction of Peroxidase Enzyme from Different Vegetables for Biodetoxification of Vat Dyes. *Applied Nanoscience*, 10, 5191–5199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01348-4>.
- [23] Hunger, K. (2003). *Industrial Dyes, Chemistry, Properties, Applications*. Ed: Dr. Klaus Hunger, Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 660. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527602011>.
- [24] Kariyajanavar, P., Narayana, J., & Nayaka, Y.A. (2012). Degradation of Simulated Dye Wastewater by Electrochemical Method on Carbon Electrodes. *Indian Journal of Natural Sciences*, 11(10), 809-821.
- [25] Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A.A. (2020). A review on Classifications, Recent Synthesis and Applications of Textile Dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 107891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107891>.
- [26] Balan, D.S.L., & Monteiro, R.T.R. (2001). Decolorization of textile Indigo dye by ligninolytic fungi. *Journal of Biotechnology*, 89:141-145. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00304-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00304-2).
- [27] Forgacs, E., Cserhati, T., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, 30, 953–971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001>.
- [28] Hamdy, A., Mostafa, M.K., & Nasr, M. (2018). Zero-valent iron nanoparticles for methylene blue removal from aqueous solutions and textile wastewater treatment, with cost estimation. *Water Science & Technology*, 78(2): 367–378. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2018.306>.
- [29] Raman, C., & Kanmani, S. (2016). Textile dye degradation using nano zero valent iron: a review. *Journal of Environmental Management*, 177, 341–355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.034>.
- [30] Moghaddam, H.M., Beitollahi, H., Tajik, S., Malakootian, M., & Maleh, H.K. (2014). Simultaneous determination of hydroxylamine and phenol using a nanostructure-based electrochemical sensor. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 7431–7441. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3938-8>.
- [31] Gupta, V.K., & Suhas (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal — A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313–2342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>.
- [32] Sansuk, S., Srijaranai, S., & Srijaranai, S. (2016). A new approach for removing anionic organic dyes from wastewater based on electrostatically driven assembly. *Environmental Science & Technology*, 50(12), 6477–6484. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00919>.
- [33] Li, Z., Sellaouib, L., Franco, D., Netto, M.S., Georgin, J., Dotto, G.L., Bajahzar, A., Belmabrouk, H., Bonilla-Petriciolet, A., & Li, Q. (2020). Adsorption of hazardous dyes on functionalized multiwalled carbon nanotubes in single and binary systems: Experimental study and physicochemical interpretation of the adsorption mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 389, 124467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124467>.
- [34] Zhao, X., Zhao, H., Dai, W., Wei, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Zhi, L., Huang, H., & Gao, Z. (2018). A metal-organic framework with large 1-D channels and rich single bondOH sites for high-efficiency chloramphenicol removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 526, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.04.095>.
- [35] Fan, F., Wang, B., Yuan, S.H., Wu, X.H., Chen, J., & Wang, L.L. (2010). Adsorptive removal of chloramphenicol from wastewater by NaOH modified bamboo charcoal. *Bioresource Technology*, 101(19), 7661–7664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.046>.
- [36] Yu, J., Hou, X., Hu, X., Yuan, H., Wang, J., & Chen, C. (2019). Efficient degradation of chloramphenicol by zero-valent iron microspheres and new insights in mechanisms. *Applied Catalysis B: Environmental*, 256, 117876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.117876>.
- [37] Alqadami, A., Naushad, M., Abdalla, M., Khan, M., & Alothman, Z. (2016). Adsorptive removal of toxic dye using Fe₃O₄-TSC nanocomposite: equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 61(11), 3806–3813. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00446>.
- [38] Daneshvar, E., Vazirzadeh, A., Niazi, A., Kousha, M., Naushad, M., & Bhatnagar, A. (2017). Desorption of Methylene blue dye from brown macroalga: effects of operating parameters, isotherm study and kinetic modeling. *Journal of Cleaner Production*, 152, 443–453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.119>.
- [39] Tatarchuk, T., Paliychuk, N., Bitra, R.B., Shyichuk, A., Naushade, M., Mironyuk, I., & Ziółkowskad, D. (2019). Adsorptive removal of toxic Methylene Blue and Acid Orange 7 dyes from aqueous medium using

- cobalt-zinc ferrite nanoadsorbents. *Desalination and Water Treatment*, 150, 374-385. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23751>.
- [40] Mohanraj, J., Durgalakshmi, D., Balakumar, S., Aruna, P., Ganesan, S., Rajendran, S., & Naushad, M. (2020). Low cost and quick time absorption of organic dye pollutants under ambient condition using partially exfoliated graphite. *Journal of Water Process Engineering*, 34, 101078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101078>.
- [41] Naushad, M., Ahamad, T., AlOthman, Z.A., & Al-Muhtaseb, A.H. (2019). Green and eco-friendly nanocomposite for the removal of toxic Hg(II) metal ion from aqueous environment: adsorption kinetics & isotherm modelling. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.090>.
- [42] Saxe, J.P., Lubenow, B.L., Chiu, P.C., & Cha, D.K. (2006). Enhanced biodegradation of azo dyes using an integrated elemental iron-activated sludge system: I. Evaluation of system performance. *Water Environment Research*, 78(1), 19–25. DOI: <https://doi.org/10.2175/106143005x84477>.
- [43] Ma, L.M., & Zhang, W.X. (2008). Enhanced biological treatment of industrial wastewater with bimetallic zero-valent iron. *Environmental Science & Technology*, 42(15), 5384–5389. DOI: <https://doi.org/10.1021/es801743s>.
- [44] Zhang, Y., Jing, Y., Quan, X., Liu, Y., & Onu, P. (2011). A built-in zero valent iron anaerobic reactor to enhance treatment of azo dye wastewater. *Water Science Technology*, 63(4):741-746. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2011.301>.
- [45] Su, Y., Adeleye, A.S., Keller, A.A., Huang, Y., Dai, C., Zhou, X., & Zhang, Y. (2015). Magnetic sulfide-modified nanoscale zerovalent iron (S-nZVI) for dissolved metal ion removal. *Water Research*, 74, 47-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.004>.
- [46] Du, J., Bao, J., Lu, C., & Werner, D. (2016). Reductive sequestration of chromate by hierarchical FeS@Fe₀ particles. *Water Research*, 102, 73-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.009>.
- [47] Ezzatahmedi, N., Ayoko, G.A., Millar, G.J., Speight, R., Yan, C., Li, J., Li, S., Zhu, J., & Xi, Y. (2017). Clay-supported nanoscale zero-valent iron composite materials for the remediation of contaminated aqueous solutions: A review. *Chemical Engineering Journal*, 312, 336–350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.154>.
- [48] Marcelo, C.R., Puiatti, G.A., Nascimento, M.A., Oliveira, A.F., & Lopes, R.P. (2018). Degradation of the Reactive Blue 4 Dye in Aqueous Solution Using Zero-Valent Copper Nanoparticles. *J. Nanomater.*, 2018, 4642038. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4642038>.
- [49] Nguyen, D.T.C., Dang, H.H., Vo, D.-V.N., Bach, L.G., Nguyen, T.D., & Tran, T.V. (2021). Biogenic synthesis of MgO nanoparticles from different extracts (flower, bark, leaf) of *Tecoma stans* (L.) and their utilization in selected organic dyes treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124146>.
- [50] Latha, K., & Selvi, S.A. (2020). Green synthesis of TiO₂ nanoparticle prepared from *tridax procumbens* leaf extract for dye adsorption and their isotherm and kinetic studies. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Res.*, 5 (1), 293-304.
- [51] Raman, C.D., & Kanmani, S. (2018). Decolorization of mono azo dye and textile wastewater using nano iron particles. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38, 366-376. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.13063>.
- [52] Abdel Ghafar, H.H., Ali, G.A.M., Fouad, O.A., & Makhlof, S.A. (2015). Enhancement of adsorption efficiency of methylene blue on Co₃O₄/SiO₂ nanocomposite. *Desalination and Water Treatment*, 53(11), 2980-2989. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.871343>.
- [53] National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information, 2005, Vat Green 1, (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Vat-Green-1>), Erişim Tarihi: 15 Nisan 2022.
- [54] Hanay, Ö., Yıldız, B., Aslan, S., & Hasar, H. (2014). Removal of tetracycline and oxytetracycline by microscale zerovalent iron and formation of transformation products. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 3774–3782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2342-1>.
- [55] Huguet, M.R., & Marshall, W.D. (2009). Reduction of hexavalent chromium mediated by micro- and nano-sized mixed metallic particles. *Journal of Hazardous Materials*, 169, 1081–1087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.062>.
- [56] Cushing, B.L., Kolesnichenko, V.L., & O'Connor, C.J. (2004). Recent Advances in the Liquid-Phase Syntheses of Inorganic Nanoparticles. *Chemical Reviews*, 104 (9), 3893–3946. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr030027b>.
- [57] Wang, T., Jin, X., Chen, Z., Megharaj, M., & Naidu, R. (2014). Green synthesis of Fe nanoparticles using eucalyptus leaf extracts for treatment of eutrophic wastewater. *Science of The Total Environment*, 466–467, 210–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.022>.

- [58] He, Y., Gao, J-F., Feng, F-Q., Liu, C., Peng, Y-Z., & Wang, S-Y. (2012). The comparative study on the rapid decolorization of azo, anthraquinone and triphenylmethane dyes by zero-valent iron. *Chemical Engineering Journal*, 179, 8–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.107>.
- [59] Fan, J., Guo, Y., Wang, J., & Fan, M. (2009). Rapid decolorization of azo dye methyl orange in aqueous solution by nanoscale zerovalent iron particles. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 904–910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.091>.
- [60] Chen, J.L., Al-Abed, S.R., Ryan, J.A., & Li, Z. (2001). Effects of pH on dechlorination of trichloroethylene by zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials*, 83, 243–254. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00193-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00193-5).
- [61] Sun, Y., Li, J., Huang, T., & Guan, X. (2016). The influences of iron characteristics, operating conditions and solution chemistry on contaminants removal by zero-valent iron: A review. *Water Research*, 100, 277–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.031>.
- [62] Yang, G.C.C., & Lee, H.L. (2005). Chemical reduction of nitrate by nanosized iron: kinetics and pathways. *Water Research*, 39:884–894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.030>.
- [63] Donadelli, J.A., Carlos, L., Arques, A., & García Einschlag, F.S. (2018). Kinetic and mechanistic analysis of azo dyes decolorization by ZVI-assisted Fenton systems: pH-dependent shift in the contributions of reductive and oxidative transformation pathways. *Applied Catalysis B: Environmental*, 231, 51–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.02.057>.
- [64] Cwiertny, D.M., & Roberts, A.L. (2005). On the nonlinear relationship between kobs and reductant mass loading in iron batch systems. *Environmental Science & Technology*, 39, 8948–8957. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es050472j>.
- [65] Li, J., Li, Y., & Meng, Q. (2010). Removal of nitrate by zero-valent iron and pillared bentonite. *J. Hazard. Mater.*, 174, 188-193. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.035>.
- [66] Le, C., Wu, J-H., Li, P., Wang, X., Zhu, N-W., Wu, P-X., & Yang, B. (2011). Decolorization of anthraquinone dye Reactive Blue 19 by the combination of persulfate and zero-valent iron. *Water Science Technology*, 64(3), 754-759. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2011.708>.
- [67] Arabi, S., & Sohrabi, M. (2014). Removal of methylene blue, a basic dye, from aqueous solutions using nano-zerovalent iron. *Water Science & Technology*, 70 (1), 24–31. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2014.189>.
- [68] Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from Ficus carica bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10 (S1), S1445-S1451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>.
- [69] Davarnejad, R., Azizi, A., Mohammadi, M., & Mansoori, S. (2020). A green technique for synthesising iron oxide nanoparticles by extract of centaurea cyanus plant: an optimised adsorption process for methylene blue. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. DOI: <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1756273>.
- [70] Lagergren, S. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe (On the theory of so-called adsorption of soluble substances). *Kungliga svenska vetenskaps akademiens Handlingar*, 24, 1-39.
- [71] Ho, Y.-S., & McKay, G. (1998). Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood. *Process Safety and Environmental Protection*, 76, 183-191. DOI: <https://doi.org/10.1205/095758298529326>.
- [72] Robati, D. (2013). Pseudo-second-order kinetic equations for modeling adsorption systems for removal of lead ions using multi-walled carbon nanotube. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3(55). DOI: <https://doi.org/10.1186/2193-8865-3-55>.
- [73] Sahoo, T., & Prélôt, B. (2020). Adsorption processes for the removal of contaminants from wastewater, Kitap Adı: *Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants*, 161-222. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818489-9.00007-4>.
- [74] Hubbe, M.A., Azizian, S., & Douven, S. (2019). Implications of apparent pseudo-second-order adsorption kinetics onto cellulosic materials: A review. *BioResources*, 14(3), 7582-7626. DOI: <https://doi.org/10.15376/BIORES.14.3.7582-7626>.



Araştırma Makalesi-Research Article

İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin AWGGN Analizi

Analysis of RIS Transmitter Systems Using Dual-Branch Selection Combining Technique with AWGGN

Damla Gümüş¹, Mehmet Bilim^{2*}

Geliş / Received: 04/07/2022

Revize / Revised: 28/11/2022

Kabul / Accepted: 03/12/2022

ÖZ

Bu çalışmada, iki kollu seçme birleştirme tekniğini kullanan uyarlanabilir akıllı yüzey destekli bir haberleşme sisteminin eklenebilir beyaz genelleştirilmiş Gauss gürültüsü koşullarında hata analizi incelenmiştir. Ele alınan sistem modelinin Rayleigh sönümlü kanallarda olduğu varsayılmış ve hata analizi olasılık yoğunluk fonksiyonu temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda yaklaşık bir hata ifadesi türetilmiş ve farklı sistem parametre değerleri ile çeşitli senaryolar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler- Uyarlanabilir Akıllı Yüzey, Genelleştirilmiş Gauss Gürültüsü, Hata Analizi

ABSTRACT

In this study, error analysis of a reconfigurable intelligence surface assisted dual-branch selection combining communication system with additive white generalized Gaussian noise conditions is investigated. The considered system model is assumed to be in Rayleigh fading channels, and the error analysis is performed based on the probability density function. As a result of the analysis, an approximate error expression was derived and various scenarios were presented with different system parameter values.

Keywords- Reconfigurable Intelligence Surface, Generalized Gaussian Noise, Error Analysis

¹İletişim: damlakeser38@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0734-5066>)

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: mbilim@nny.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2518-3125>)

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

I. GİRİŞ

Uyarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligence surface, RIS) teknolojisi son dönemlerde oldukça popüler bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar, RIS destekli sistemler ile ilgili birçok çalışmalar yapmaktadır [1]-[6]. RIS yapıları, üzerlerinde bulunan akıllı yansıtıcı yüzey elemanları sayesinde gelen sinyali alıcı noktasına iletmektedirler. Bu sayede, gelen sinyalin farklı kopyaları alıcı noktasına aktarılmakta, daha doğru ve başarılı bir iletim gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, RIS'ların avantajları kullanılan sistemlere dahil edilmiş olup, daha verimli sistem modelleri elde edilmeye çalışılmıştır. Geri saçılım vericilerine yardımcı olmak için kullanılan RIS'lar ile işbirlikçi ortam geri saçılım iletişiminin performansının artırıldığı [1]'deki çalışmada açıklanmıştır. TeraHertz iletişim ile birlikte RIS'ların kullanılmasının daha verimli olabileceği ve bu şekilde birleştirilmiş bir sistemin gelecek nesil iletişim sistemlerine aday olabileceği [2]'de verilmiştir. Yazarlar [3]'te, genel RIS yapılarının kullanım bilgilerini ve bu sistem modellerinin özelliklerini detaylı bir şekilde izah etmişlerdir. Öte yandan [4]'te, yazarlar RIS destekli sistem yapılarına ait bazı performans incelemeleri gerçekleştirmişlerdir. [5]'teki çalışmada ise, mobil uç bilgi işlem güvenliğinin RIS destekli bir yapı ile nasıl gerçekleştirilebileceği izah edilmiştir. Makine öğrenme tekniklerinin RIS sistemlerine uygulanması ile ilgili detaylı literatür taraması da [6]'da sunulmuştur.

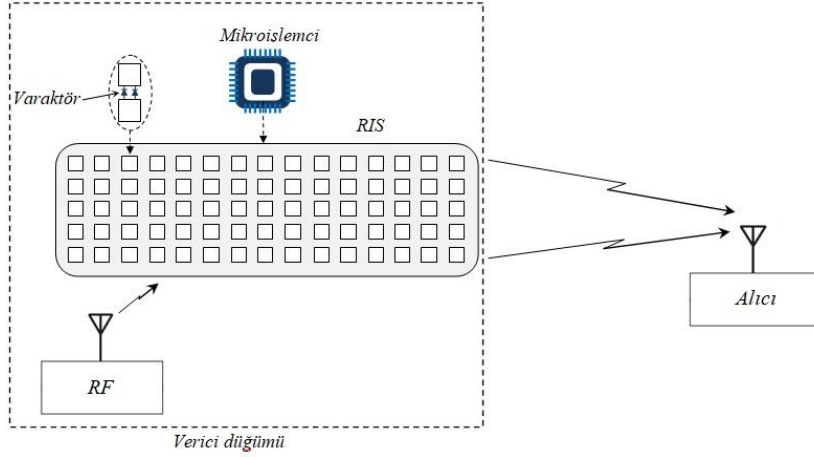
RIS'lar ile ilgili birçok çalışma yapılmasına ilave olarak, iki kollu (dual-branch, DB) iletim tekniği de alıcı noktasına farklı iki koldan iletim yapılmasını gözönüne alan bir sistem modeli olarak literatürdeki yerini almıştır. Bu sebeple, DB sistem yapılarının farklı sistem modellerine adapte edilmesini konu alan bazı çalışma örnekleri de [7-13]'te sunulmuştur. DB iletim sistem modelinde alıcı uçta birleştirme tekniklerinden faydalanılmaktadır. Alıcıdaki karmaşıklığı düşürmek için seçme birleştirme (selection combining, SC) tekniği birçok çalışmada tercih edilmektedir. Literatür incelemesi yapıldığı zaman, DB SC tekniğini kullanan RIS destekli bir sistem modelinin olmadığı dikkati çekmektedir. Ayrıca RIS yapılarını ele alan çalışma örneklerinin çoğunlukla eklenebilir beyaz Gauss gürültüsü (additive White Gaussiannoise, AWGN) koşullarında gerçekleştirildiği görülmektedir. Oysaki gerçek uygulamalar gözönüne alındığında, AWGN koşullarının bazı ortam şartlarını doğru bir şekilde sağlamadığı bilinmektedir [14,15]. Bu sebeple, genelleştirilmiş AWGN (AWGGN) modeli önerilmiş ve araştırmalarda uygulanmaya çalışılmıştır [14-16]. [16]'daki çalışmada iki atlamalı bir RIS destekli sistem modeli ele alınmıştır. DB SC tekniği [16]'daki çalışmada sunulmamıştır. Bütün bu açıklamalar doğrultusunda, DB SC sistemini kullanan RIS yapılarının AWGGN analizi bu çalışmada sunulmaktadır. Öncelikli olarak, DB SC sistemine ait olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) türetilmiştir. Türetilen bu PDF ifadesinden faydalanarak, AWGGN koşulları altında hata ifadesinin türetilmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda türetilen ifade kullanılarak hata eğrileri elde edilmiş, bununla beraber ele alınan sistemin hata performansı detaylı bir şekilde sunulmuştur. Yapılan analizlerin doğruluğu, tam nümerik simülasyon sonuçları ile gösterilmeye çalışılmıştır.

II. SİSTEM VE KANAL MODELİ İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Bu çalışmada ele alınan sistem modeli Şekil 1'deki gibidir. Burada sistem modeli için DB iletim tekniği kullanılmış olup, alıcı düğümünde SC tekniği ile bu iletim hatlarından gelen sinyaller birleştirilmektedir. Verici düğümünde radyo frekans (radio frequency, RF) noktası ile RIS yapısı birbirine çok yakın olduğu için aralarında herhangi bir iletim kaybının olmadığı varsayılmıştır. Böylece, RF ve RIS tek bir verici düğümü olarak değerlendirilmektedir [3]. Verici düğümü ile alıcı arasındaki DB iletim hatlarının Rayleigh sönümlü olduğu ve AWGGN gürültüsü altında iletim gerçekleştirdiği düşünülmektedir. Bu çalışmanın özgünlüğü, DB iletim kanallarının AWGGN gürültüsünde olmasıdır. AWGGN gürültüsü genel bir gürültü modeli olup, klasik haberleşme sistemlerinde karşılaşılan AWGN gürültüsü de dahil olmak üzere dürtüsel (impulsive), Laplas (Laplacian) ve Gama (Gamma) vb. gibi daha çok yıkıcı gürültü modellerini de kapsamaktadır. Böylelikle sistemin AWGGN analizi gerçekleştirilerek farklı gürültü tiplerinin de analizinin yapılması söz konusu olmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi, Rayleigh sönümlenme olduğu düşünüldüğünden, iletim hatlarından her birine ait anlık işaret gürültü oranının (signal to noise ratio, SNR) PDF ifadeleri şu şekilde tanımlanmıştır [4]:

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\gamma_1}} \quad (1)$$

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\gamma_2}} \quad (2)$$



Şekil 1. Ele alınan sistem modeli

Burada $W_1 = \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^N (N-1)!}$, $W_2 = \frac{1}{(B\bar{\gamma}_2)^N (N-1)!}$ $B = 1 + (N-1)\Gamma^2(3/2)$, N , RIS'teki yansıtıcı eleman sayısı ve $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2$ olup toplam ortalama SNR olarak tanımlanmaktadır. $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2$ ifadesindeki $\bar{\gamma}_1$ DB iletimdeki birinci iletim hattına ait, $\bar{\gamma}_2$ ise ikinci iletim hattına ait ortalama SNR ifadelerini temsil etmektedir. Alıcı düğümünde SC tekniği ile birleştirme yapıldığından alıcıdaki toplam PDF ifadesi [7,8]

$$f_{\gamma_{sc}}(\gamma) = f_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) + f_{\gamma_2}(\gamma)F_{\gamma_1}(\gamma) \quad (3)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $f_{\gamma_1}(\gamma)$ ve $f_{\gamma_2}(\gamma)$ sırasıyla (1) ve (2)'de tanımlandığı gibidir. $F_{\gamma_1}(\gamma)$ ve $F_{\gamma_2}(\gamma)$ ifadeleri ise DB'deki birinci ve ikinci iletim hatlarına ait anlık SNR'nin kümülatif dağılım fonksiyonlarıdır (cumulative distribution function, CDF). Buna göre, eşitlik (1) ve (2)'den faydalanarak $F_{\gamma_1}(\gamma)$ ve $F_{\gamma_2}(\gamma)$ ifadeleri aşağıdaki gibidir [4]:

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} \sum_{s=0}^{N-1} \frac{\gamma^s}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \quad (4)$$

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\gamma^k}{(B\bar{\gamma}_2)^k k!} \quad (5)$$

Eşitlik (1), (2), (4) ve (5)'teki ifadeler eşitlik (3)'te yerine konulursa

$$f_{\gamma_{sc}}(\gamma) = W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} - W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\gamma^k}{(B\bar{\gamma}_2)^k k!} + W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} - W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} \sum_{s=0}^{N-1} \frac{\gamma^s}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \quad (6)$$

olarak toplam PDF ifadesi türetilmiş olunur. Eşitlik (6)'da aynı türden matematik ifadeleri ortak bir paranteze alınıp, toplam serisi başa alınır

$$f_{\gamma_{sc}}(\gamma) = W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_2)^k k!} \gamma^{N+k-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} \right)} + W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \gamma^{N+s-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} \right)} \quad (7)$$

şeklinde kullanımı kolay olan nihai PDF ifadesi elde edilmiştir.

III. ANALİZLER

Bu alt başlıkta Şekil 1'deki sistemin AWGGN analizi sunulmaktadır. Bunun için PDF tabanlı genel hata formülü ele alınmaktadır. Buna göre

$$P_e = \int_0^{\infty} p(e|\gamma) f_{\gamma_{sc}}(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

olarak bilinmektedir. Burada $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi, $f_{\gamma_{sc}}(\gamma)$ ifadesi ise ele alınan sistemin toplam PDF ifadesidir. Bu PDF ifadesi eşitlik (7)'de türetilmiştir. $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi ise

$$p(e|\gamma) = f Q_{\lambda}(\sqrt{u\gamma}) \quad (9)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (9)'da $Q_{\lambda}(\cdot)$ ifadesi, λ parametrelili genelleştirilmiş Gaussian fonksiyonudur. λ parametresinin aldığı değere göre gürültü türü değişim göstermektedir. Misal olarak, $\lambda = 0$ alındığında Dürtüsel gürültü, $\lambda = 0.5$ alındığında Gama gürültüsü, $\lambda = 1$ olarak alındığında Laplas gürültüsüne dönüşmektedir. f ve u ise modülasyon katsayılarıdır. $f=1$, $u=1$ ikili frekans kaydırmalı anahtarlama (binary frequency shift keying, BFSK), $f=1$, $u=2$ ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) ve $f=2$, $u=1$ dördün faz kaydırmalı anahtarlama (quadrature phase shift keying, QPSK) modülasyonları ele alınmaktadır. $Q_{\lambda}(\cdot)$ ifadesi

$$Q_{\lambda}(x) = \frac{\lambda \Lambda^{2/\lambda}}{2\Gamma(1/\lambda)} \int_x^{\infty} e^{-\Lambda t^{\lambda}} dt \quad (10)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (10) ile verilen ifade eşitlik (9)'da kullanıldığı zaman matematiksel açıdan işleme çok müsait olmayan ifadeleri ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple, literatürde bu tip matematiksel işlemlerin yapılabilmesi için bazı yaklaşımlar önerilmiştir. Genelleştirilmiş Gaussian fonksiyonu için önerilmiş olan yaklaşımlardan [14]'teki ifade oldukça kullanışlıdır [15-17]. Bu ifade, üstel fonksiyon terimlerinin toplamı şeklindedir. Matematiksel olarak işlem yapmaya müsait olmasının nedeni de içerisinde sadece üstel fonksiyonlar bulunmasıdır. Bu sebeple, [14]'teki yaklaşım

$$Q_{\lambda}(x) \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j e^{-\omega_j x^2} \quad (11)$$

şeklindedir. Burada θ_j ve ω_j yaklaşıklık katsayılarıdır. λ parametresinin aldığı değere göre bu katsayılar değişiklik göstermektedir. θ_j ve ω_j katsayılarının değerleri Tablo 1'de verildiği gibidir [14].

Tablo 1. λ parametresinin aldığı değere katsayılar

	λ			
	0.5	1	1.5	2
θ_1	44.920	0.068	0.065	0.099
θ_2	126.460	0.202	0.149	0.157
θ_3	389.400	0.182	0.136	0.124
θ_4	96.540	0.255	0.125	0.119
ω_1	0.130	0.217	0.341	1.981
ω_2	2.311	2.185	0.712	0.534
ω_3	12.520	0.657	10.570	0.852
ω_4	0.629	12.640	1.945	10.268

Eşitlik (11)'deki yaklaşım $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi için kullanırsa

$$p(e|\gamma) \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j e^{-\omega_j u \gamma} \quad (12)$$

olarak elde edilir. Eşitlik (7)'deki PDF ifadesi, eşitlik (12)'deki $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi eşitlik (8)'de yerine yazılırsa

$$P_e \approx \int_0^{\infty} f \sum_{j=1}^4 \theta_j e^{-\omega_j u \gamma} \left[\begin{aligned} &W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} \gamma^{N+k-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} \right)} \\ &+ W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \gamma^{N+s-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} \right)} \end{aligned} \right] d\gamma \quad (13)$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (13) için matematiksel olarak ortak parantez ve integralin toplama ve çıkarma üzerine dağılım özelliği kullanılırsa

$$P_e \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j \left\{ W_1 I_1 - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} I_2 + W_2 I_3 - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} I_4 \right\} \quad (14)$$

olarak yeniden elde edilir. Burada I_1, I_2, I_3 ve I_4 sırasıyla şu şekildedir:

$$I_1 = \int_0^{\infty} \gamma^{N-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (15)$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} \gamma^{N+k-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (16)$$

$$I_3 = \int_0^{\infty} \gamma^{N-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (17)$$

$$I_4 = \int_0^{\infty} \gamma^{N+s-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (18)$$

Eşitlik (15)-(18)'de verilen aynı integraller formattadır. [18, Eşitlik (3.381.4)] yardımıyla çözülebilmektedir. Buna göre

$$I_1 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) \quad (19)$$

$$I_2 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-(N+k)} \Gamma(N+k) \quad (20)$$

$$I_3 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) \quad (21)$$

$$I_4 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-(N+s)} \Gamma(N+s) \quad (22)$$

olarak elde edilir. Burada $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonudur [18]. Eşitlik (19)-(22)'de verilen çözümler, eşitlik (14)'te yerine yazılırsa

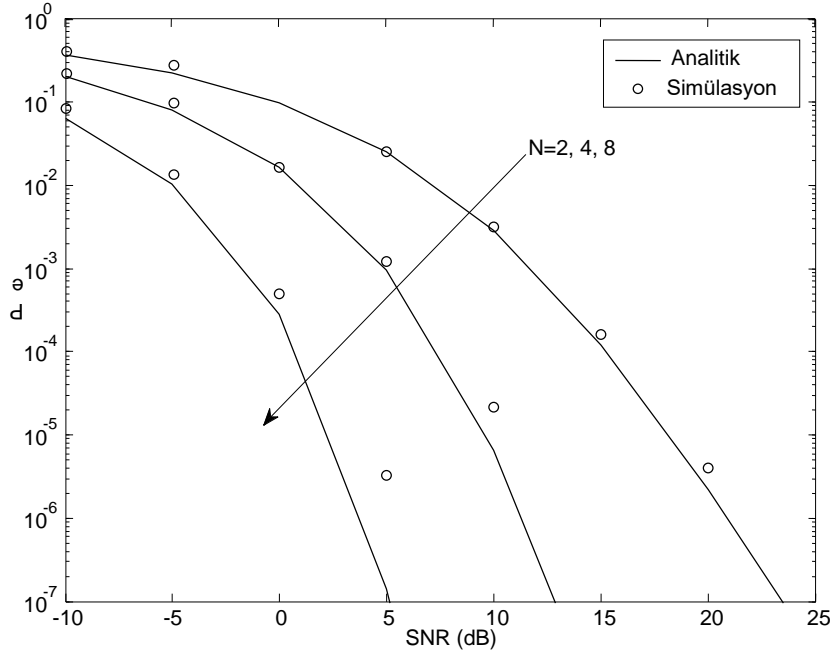
$$P_e \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j \left\{ \begin{aligned} &W_1 \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-(N+k)} \Gamma(N+k) \\ &+ W_2 \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-(N+s)} \Gamma(N+s) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

olarak yaklaşık ifade elde edilir. Eşitlik (23) ile türetilmiş olan ifade yaklaşık bir ifade olup, DBSC tekniğini kullanan RIS verici sistemlerin AWGGN koşullarında hata ifadesidir. Yazarların bildiği kadarıyla, eşitlik (23) ile verilen ifade literatürde ilk kez bu çalışmada türetilmiştir.

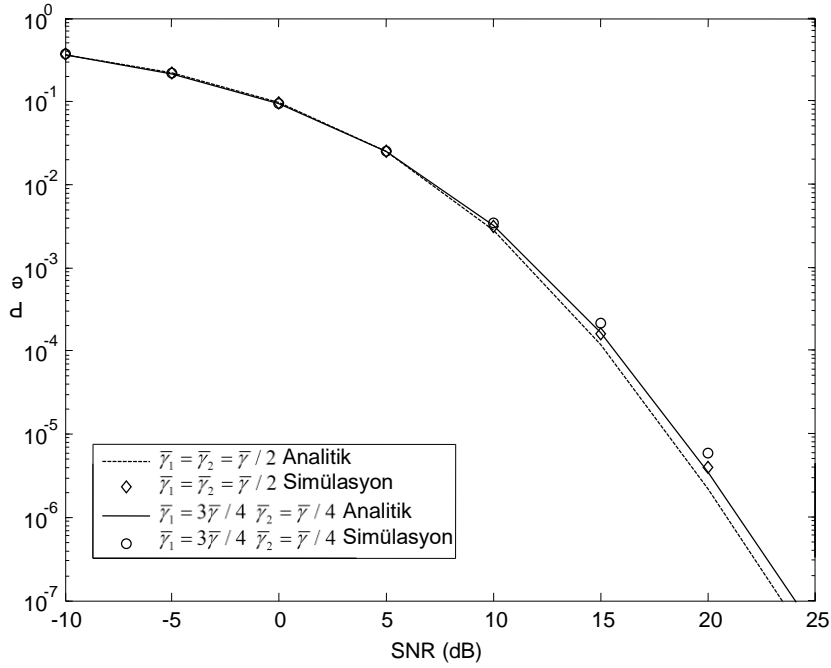
IV. BULGULAR

Bu alt başlıkta bir önceki bölümde yapılan analizler sonucunda türetilmiş olan yaklaşık hata ifadesinin doğruluğu gösterilmeye çalışılmaktadır. Ele sistem modeli için farklı parametre ayarlamaları ile değişik senaryolar oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu senaryolar ve elde edilen hata eğrileri Şekil 2-4'te sunulmaktadır. Şekil 2'de BFSK modülasyonu ile Laplas gürültüsünün etkisi gözetilerek, DB SC RIS verici sisteminin hata eğrileri sunulmaktadır. Şekil 2'de N yansıtıcı eleman sayısının değişiminin etkisi araştırılmaktadır. Buradaki senaryo için $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2$ olup $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 2$ şeklinde ayarlanmıştır. Bunun anlamı DB iletim hatlarındaki ortalama SNR miktarı her bir iletim hattına eşit olarak dağıtılmış demektir. RIS sistemlerindeki N yansıtıcı eleman sayısının artması sistemi olumlu etkilemektedir. Bunun da sebebi, RIS'teki yansıtıcı eleman sayısının artması aynı sinyalin daha fazla miktarda farklı kopyasının iletim hatlarından gönderilmesi demektir. Bu durum, Şekil 2'deki sonuçlarda da açıkça görülmektedir. Sırasıyla hata eğrilerinin performans kıyaslaması az olandan çok olana 2, 4 ve 8 şeklindedir.

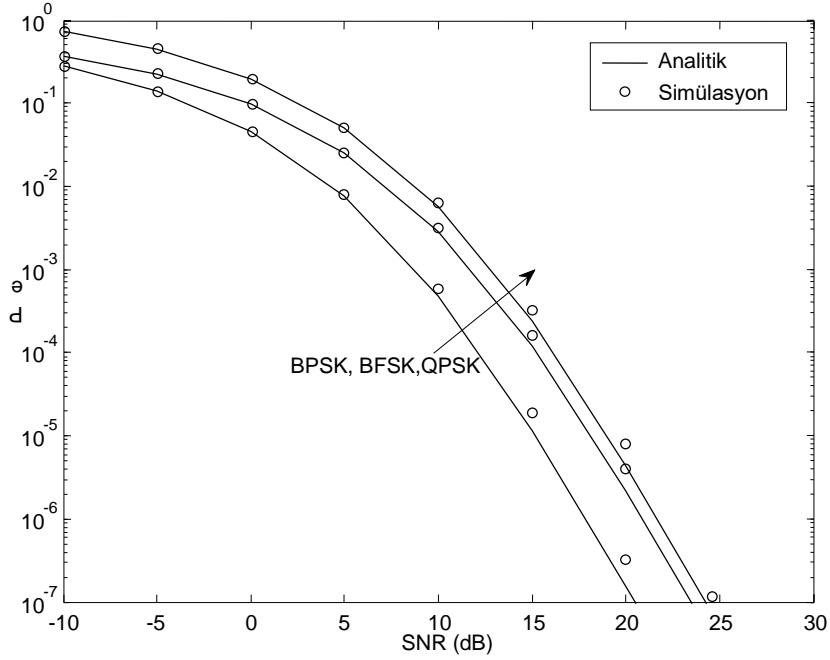
Şekil 3'teki senaryoda ise $\bar{\gamma}_1$ ve $\bar{\gamma}_2$ miktarlarındaki farklı durumların ele alınan sistem modeline etkisi gösterilmektedir. Burada yine BFSK modülasyonun kullanıldığı varsayılmış, Laplas gürültüsünün etkisi altında sistem hata eğrileri elde edilmiştir. RIS'teki N yansıtıcı eleman sayısının ise 2 olduğu durum incelenmiştir. DB'deki iletim hatları için iki farklı ortalama SNR dağılımı araştırılmaktadır. Bunlardan ilki, $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 2$ durumu, ikincisi ise $\bar{\gamma}_1 = 3\bar{\gamma} / 4$, $\bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 4$ olarak değerlendirilmektedir. Şekil 3'ten de görüldüğü gibi, iki durumda birbirine benzer hata performansı göstermektedir. Ancak ilk durumun hata performansının ikinci duruma göre özellikle 10 dB'den sonra biraz daha iyi olduğu dikkati çekmektedir.



Şekil 2. Laplas gürültüsü altında ele alınan sistemin farklı N yansıtıcı eleman sayısı ile hata eğrileri



Şekil 3. Ele alınan sistem modeli için Laplas gürültüsü etkisinde farklı iletim hatları ortalama SNR değerlerine ait hata eğrileri



Şekil 4. Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültüsü etkisinde farklı modülasyonlarla hata eğrileri

Bu bölümde sunulan son inceleme ise Şekil 4'te verilmektedir. Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültüsü etkisi altında, $N=2$ ve $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 2$ olduğu durumda farklı modülasyon türlerinin ele alınan sisteme etkisi incelenmektedir. Sunulan grafikte, üç farklı modülasyon türü analiz edilmiştir. Bunlar: BPSK, BFSK ve QPSK şeklindedir. Beklenildiği gibi, BFSK modülasyonlu sistemin hata performansı QPSK modülasyonluya göre daha iyi, ancak BPSK modülasyonlu duruma göre daha kötüdür. Şekil 2-4'te sunulan bütün nümerik sonuçlarda yapılan analizler sonucunda türetilen ifadenin analitik sonuçları ile nümerik tam simülasyon sonuçlarının birbiri ile iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu durum, yapılan analizlerin doğruluğunu göstermektedir. Sonuçların kıyaslamalı olarak verilmesinin nedenini bu şekilde açıklamak mümkündür.

V. SONUÇLAR

Bu çalışma RIS sisteminin verici olarak kullanıldığı bir DB SC iletim sisteminin AWGGN koşullarında hata analizini incelemektedir. Yapılan hata analizi için ele alınan sistemin toplam anlık SNR'sine ait PDF ifadesi türetilmiş, türetilen bu PDF yardımıyla yaklaşık hata analizi ifadesi elde edilmiştir. Eşitlik (23) ile verilen yaklaşık hata ifadesinin doğruluğu çeşitli senaryolar ile gösterilmiş ve tam nümerik simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sunulan bu çalışmanın amacı, gelecek nesil iletişim sistemleri için önemli bir yere sahip olacağı öngörülen RIS destekli sistemlerin AWGGN gibi gerçek hayat senaryolarında karşılaşılabilecek koşullarda hata analizini sunmaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Ma, H., Zhang, H., Zhang, N., Wang, J., Wang N., & Leung, V. C. M. (2022). Reconfigurable intelligent surface with energy harvesting assisted cooperative ambient back scatter communications, *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(6), 1283-1287.
- [2] H. Du et al., (2022). Performance and optimization of reconfigurable intelligent surface aided THz communications, *IEEE Transactions on Communications*, 70(5), 3575-3593.
- [3] Basar, E., DiRenzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M.-S., & Zhang, R. (2019). Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces, *IEEE Access*, 7, 116753-116773.
- [4] Yang, L. et al., (2020). Accurate closed-form approximations to channel distributions of RIS-aided wireless systems, *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(11), 1985-1989.
- [5] Mao S. et al., (2022). Reconfigurable intelligent surface-assisted secure mobile edge computing networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(6), 6647-6660.
- [6] Faisal K. M. & Choi, W. (2022). Machine learning approaches for reconfigurable intelligent surfaces: a survey, *IEEE Access*, 10, 27343-27367.
- [7] Khatalin S. (2009). Performance of dual-branch selection combining diversity systems in non-identical Nakagami-q (Hoyt) fading channels, *IET Communications*, 4(5), 585-595.
- [8] Bilim, M. (2021). Dual-branch SC wireless systems with HQAM for beyond 5G over η - μ fading channels, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14(1), 305-318.
- [9] Bilim M. & Kapucu, N. (2020). Error analysis of dual-branch simo systems over λ - μ fading channels, 2020 *28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4.
- [10] DiRenzo M. & Lu, W. (2015). On the diversity order of selection combining dual-branch dual-hop AF relaying in a Poisson field of interferers at the destination, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(4), 1620-1628.
- [11] Haghani S. & Beaulieu, N. C. (2009). On decorrelation in dual-branch diversity systems, *IEEE Transactions on Communications*, 57(7), 2138-2147.
- [12] Du, Z., Cheng J. & Beaulieu, N. C. (2008). Asymptotic error rate analysis of dual-branch diversity over correlated Rician channels, *IEEE Transactions on Communications*, 56,4, 527-530.
- [13] Zhu B. & Cheng, J. (2019). Asymptotic outage analysis on dual-branch diversity receptions over non-identically distributed correlated lognormal channels, *IEEE Transactions on Communications*, 67(10), 7126-7138.
- [14] Salahat, E. & Hakam, A. (2014). Novel unified expressions for error rates and ergodic channel capacity analysis over generalized fading subject to AWGGN, *IEEE Global Communications Conference*, 3976-3982.
- [15] Bilim, M. (2020). Up link communications with AWGGN over non-homogeneous fading channels, *Physical Communication*, 39, 101047.
- [16] Gümüş D., & Bilim M. (2022). RIS destekli kablosuz bir haberleşme sisteminin AWGGN analizi, *30. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Sempozyumu (SIU)*, 1-4.
- [17] Özen, C. & Bilim M. (2022). Kaskat bir sistemin FTR sönümlenmeli kanallarda HQAM performans analizi, *NÖHÜ Müh. Bilim. Dergisi*, 11(2), 258-263.
- [18] Gradshteyn, I. S., & Ryzhik, I. M. (2007). *Tables of Integrals, Series and Products, 7th ed.*, San Diego, CA: Academic.



Araştırma Makalesi - Research Article

Esnek Ardışık-Çıkarımlı Kutupsal Kod Çözücünün FPGA Gerçeklemesi

FPGA Implementation of Flexible Successive-Cancellation Polar Decoder

Muhammet Fatih Sertkaya^{1*}, Enver Çavuş²

Geliş / Received: 08/07/2022

Revize / Revised: 12/02/2023

Kabul / Accepted: 19/02/2023

ÖZET

Kanal kapasitesi, bir kanalın iletilebileceği maksimum bit hızını ifade eder. Kutupsal kodlar, simetrik ikili girişli, hafızasız kanallar için sonsuz blok uzunluğunda kanal kapasitesine erişebilen ilk hata düzeltme kodlarıdır. Kutupsal kodların bu başarımı ile 5. Nesil Yeni Radyo Haberleşme standardında kullanımına karar verilmiştir. Bu çalışmada, farklı blok uzunluklarında ve farklı kod oranlarında kutupsal kodların, ardışık-çıkarma (successive-cancellation) kod çözücü algoritması alanında programlanabilir kapı dizileri (Field-programmable gate array, FPGA) ile gerçekleştirilmesi anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Kutupsal Kodlar, FPGA, Kutupsal Kod Çözücü

ABSTRACT

Channel capacity refers to the maximum bit rate at which a channel can be transmitted. Polar codes were the first error correcting codes to achieve infinite block length channel capacity for symmetric binary input, memoryless channels. This achievement of polar codes has been decided to be used in the 5th Generation New Radio Communication standard. In this study, the implementation of the successive-cancellation decoder algorithm of polar codes at different block lengths and different code rates with field programmable gate arrays (FPGA) is explained.

Keywords-Polar Codes, FPGA, Polar Decoder

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: 185105127@ybu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5985-2724>)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

²İletişim: ecavus@ybu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7203-9700>)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

I. GİRİŞ

E. Arıkan tarafından sunulan kutupsal hata düzeltme kodları [1], simetrik ikili-girişli ayırık hafızasız kanal altında ve sonsuz kod uzunluğunda Shannon kanal kapasitesine erişilebilmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte kablosuz haberleşmede daha hızlı veri alışverişine duyulan ihtiyaç, kutupsal kodların önemini artırmaktadır. Bundan dolayı “5. Nesil Yeni Radyo” standardında kutupsal kodlar kullanılacaktır [2].

Önceki nesillerden farklı olarak 5. nesil yeni radyo ile makinelerin etkin bir şekilde kendi aralarında haberleşmesi öngörülmektedir. Bu durum, sınırlı olan bant genişliğinin daha etkili kullanılmasına sebep olur. Bant genişliğinin etkin kullanılması için kutupsal kodların donanım tasarımının en etkili şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Kutupsal kodların sonsuz kod uzunluğunda kanal kapasitesine ulaşabilmeleri, donanım gerçekleştirilmesi açısından karmaşıklığı ve gecikmeyi artırmaktadır. Bundan dolayı daha düşük kod uzunluklarında performansı arttırmak adına çalışmalar yapılmıştır [3,4]. Kutupsal kodların yazılımsal ve donanımsal olarak gerçekleştirilmesi literatürde çeşitli yayınlar tarafından sunulmuştur [5-10].

Bu çalışmada kutupsal kodlara ait ardışık-çıkarma (successive-cancellation, SC) kod çözücüsünün kod uzunluğunun ve kod oranının esnek bir şekilde değişebildiği donanım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kod oranının esnek bir şekilde değiştirilmesinin hedefi, sinyal örnekleme frekansı kriteri olan Nyquist Örnekleme Kriterinden daha hızlı bir şekilde örnekleme (Faster-Than-Nyquist) [11] yapılarak haberleşmenin donanımsal olarak doğrulanması hedeflenmektedir. Bu bağlamda hem kanalın daha verimli kullanılması hem de doğrulamanın sağlıklı yapılabilmesi için donanım üzerinde kod oranının değiştirilmesi çalışma için kritiktir. Bunun yanında kod çözücünün yüksek oranda hafıza elemanına ihtiyaç duyması kaynak kullanımı açısından tasarımları zora sokmaktadır. Bunu engellemek için FPGA içinde bulunan hafıza blokları kullanılarak lojik kaynak tüketim oranını azaltmak ve hafıza blokları ve lojik hafıza elemanlı olarak ayrı ayrı tasarımı yapılan birimlerin kaynak kullanım karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu çalışmanın II. Bölümünde sırasıyla kutupsal kodların kodlamasından ve kod çözücü yapısından bahsedilmiştir. SC kutupsal kod çözücü FPGA donanım gerçekleştirilmesi üzerinde III. Bölümde durulmaktadır. Sonuç bölümünde ise bu çalışmanın çıktılarından bahsedilmektedir.

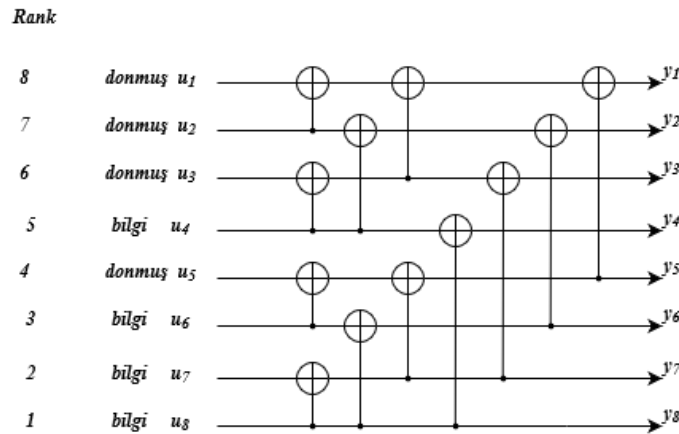
II. KUTUSAP KODLAR

A. Kutupsal Kodlayıcı

Kutupsal kodlar, asimptotik kod uzunluğunda kanal kapasitesine erişebilen hata-doğrulama kodlarıdır. Kod uzunluğu “ N ” olan kodlanmış bitlerin, kanal kutuplaşmasına göre kanaldan geçirebileceği güvenilir bilgi bit sayısı “ K ” ile gösterilir. Şekil 1’de görüldüğü gibi kanallar güvenilirliğine göre sıralanır ve kod oranına göre güvenilir kanallar seçilir. Güvenilmeyen “ $N-K$ ” kadar donmuş bitler, kanaldan geçmez. Böylece kutupsal kodlar “ $P(N, K)$ ”, doğrusal blok uzunluğu “ $N = 2^n$ ” ve kod oranı “ $R = K/N$ ” olarak gösterilir. Kutupsal kodların kodlamasını matris çarpması olarak ise:

$$x_0^{N-1} = u_0^{N-1} G^{\otimes n} \quad (1)$$

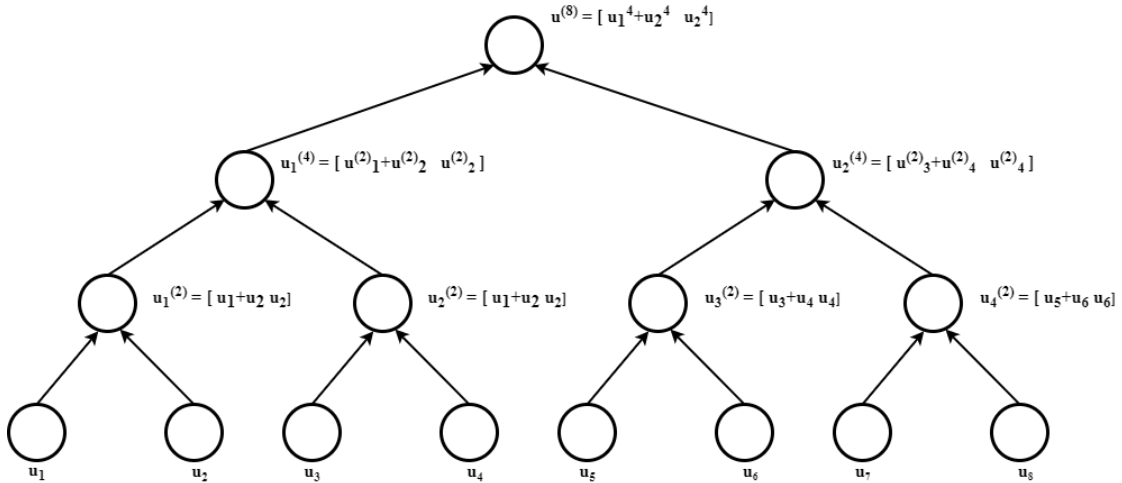
biçiminde gösterebiliriz. Burada, “ $u_0^{N-1} = \{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\}$ ” girişvektörü, “ $x_0^{N-1} = x, x_1, \dots, x_{N-1}$ ” kodlanmış vektör ve “ $G^{\otimes n}$ ” ise “ $G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ ” matrisinin Kronecker çarpımıdır. “ N ” uzunluğundaki bir kutup kodu, “ $N/2$ ” uzunluğundaki ikili sıralı kutup kodundan oluşur. Oluşturulan kod çözücü bloğuna dair bir örnek Şekil 2’de “ $N=8$ ” için gösterilmektedir.



Şekil 1. Kanal Güvenirlik Sıralaması, $N=8$

B. Ardışık-Çıkarım Kutupsal Kod Çözücü

Elde edilen “ N ” tane “ u ” kutupsal kodlu bitler, kanaldan geçerek alıcı kısmında “ $y = \{y, y_1, \dots, y_{N-1}\}$ ” olarak elde edilir. Şimdi “ y ” kodunun çözülmesi hedeflenmektedir. Bu işlem SC kod çözücüyle gerçekleştirilecektir. Tasarlanan kod çözücü mimarisi Şekil 3’te “ $N=8$ ” için gösterilmiştir. SC kod çözücüye “ y ” verildiğinde, sırayla “ u_0 ”, sonra “ u_1 ” in değerini şeklinde devam ederek “ u_{N-1} ” e kadar çıkarılır. Yani, “ u_i ” nin kod çözümü, “ $(u_0, u_1, \dots, u_{i-1})$ ” olarak gösterilir. Kod uzunluğu “ N ” arttıkça ve önceki tüm bitlerin doğru çözüldüğü kabul edildiğinde, “ u_i ” bitinin doğru çözülme olasılığı “1”e veya “0,5”e yaklaşır. Başarılı kod çözme olasılığı “1”e yaklaşan bitlerin oranı, “ N ” arttıkça kanalın kapasitesine doğru eğilim gösterir. Bu polarizasyonun etkisidir. Eğer “ u_i ” yi tahmin etme olasılığı çok iyi değilse, o zaman değeri hem kodlayıcıda hem de kod çözücüde “0” olarak ayarlanır ve böylece “ u_i ” aracılığıyla hiçbir bilgi iletilmez. Bu bitlere “dondurulmuş bit” (frozen bit) denir ve herhangi bir bilgi içermez.



Şekil 2. Kutupsal Kodlayıcı İkili Ağaç Gösterimi, N=8

“ N ” tane olabilirlik oranı (likelihood-ratio, LLR) için kod çözücü “ $n = \log_2^N$ ” tane evreden oluşmaktadır. Her evrenin LLR değerlerinin hesaplanması kendinden önceki evrenin LLR değerine bağlıdır. LLR değerleri evreyi ikiye bölüp, her bölmeden iki “LLR” değeri olarak hesaplanır. Sıfırıncı indeksten başlayarak alınan değerler üzerinde “min-sum algoritması” uygulanmıştır. Elde edilen LLR değeri, bir sonraki evreye, evrenin ilk indisinden başlayarak yazılmıştır. Her evre sonucunda “ $N/2$ ” adet LLR değeri elde edilmiştir. Denklem 4’te görüldüğü gibi son evrenin LLR değeri elde edildikten sonra LLR değeri için bit kararı verilmiştir. Eğer bit, dondurulmuş bit konumunda ise direkt “0” kabul edilmiştir, değilse işaretine bakılarak bit değerine karar verilmiştir. Eğer LLR değeri negatif ise bit değeri “1”, pozitif ise “0” olarak karar verilmiştir. Bu işlem tasarımı “ f ” fonksiyonu olarak tanımlanmıştır ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$L_a^n = f(L_a^{n-1}, L_b^{n-1}) \quad (2)$$

$$f(L_a, L_b) \approx \text{işaret}(L_a) \text{işaret}(L_b) \min(|L_a|, |L_b|) \quad (3)$$

$$u_{\hat{n}}^n = \begin{cases} 0, \text{ eğer } \hat{n} \text{ donmuş bit;} \\ 1, \text{ başka eğer } L_{\hat{n}}^n < 0; \\ 0, \text{ bunun dışında.} \end{cases} \quad (4)$$

Evrelerin diğer “LLR” değerlerinin hesabı için ikinci bir fonksiyon olan “ g ” fonksiyonu hesabı yapılmıştır. Bu fonksiyona “ f ” fonksiyonunda olduğu gibi bir önceki evrenin LLR değeriyle birlikte kendi evresindeki LLR değerinin bit sonucu da giriş olarak verilmektedir, “ g ” fonksiyonunu şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$L_b^{n-1} = g(L_a^{n-1}, L_b^{n-1}, u_a^n) \quad (5)$$

$$g(L_a, L_b, \hat{u}_a) \approx L_a(1 - 2\hat{u}_a) + L_b \quad (6)$$

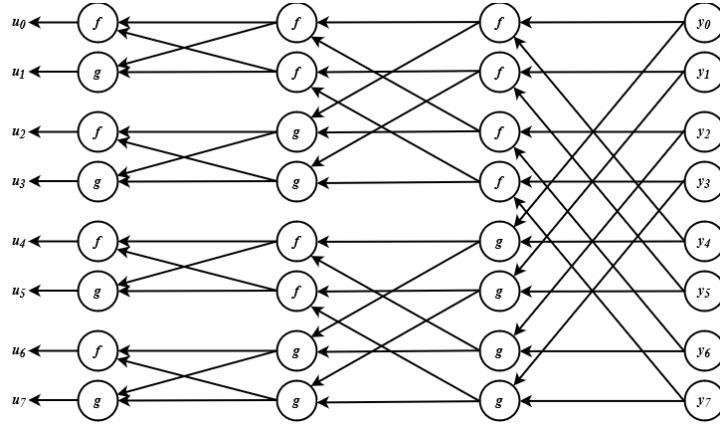
Burada, $\hat{u} \in \{0,1\}$.

Bu işlemden sonra yukarıda bahsedilen bit kararı işlemi tekrar uygulanır ve “LLR” değerinin bit kararı verilir. Fakat bu bit kararı işlemleri, sadece son evre “LLR” değerleri için geçerlidir. Son evre dışındaki “LLR” değerlerinin bit kararları kendinden sonraki evrelerin bit değerlerine göre belirlenmektedir. Bu işlem, evrenin indeksteki ilk bit için kendinden sonraki evrenin bit değerlerinin “XOR” sonucudur, ikinci indeksteki bit değeri ise sonraki evrenin aynı indisindeki bit değerinin aynıdır. Bu işlem şu şekilde gösterilebilir:

$$u_a^{n-1} = u_a^n \oplus u_b^n \quad (7)$$

$$u_b^{n-1} = u_b^n \quad (8)$$

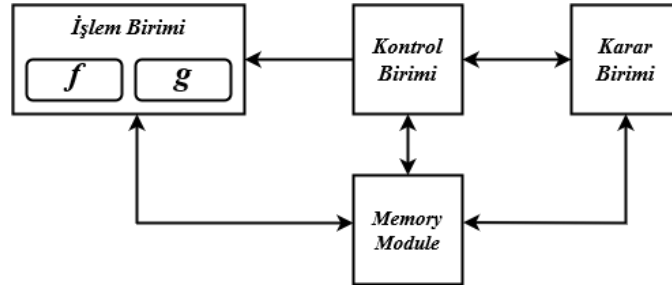
Kod çözüm işlemi “ u_N^n ” indeksli bit elde edilene kadar devam eder ve edildiğinde işlem son bulur.



Şekil 3. Kutupsal SC Kod Çözücü Mimarisi, N=8

III. ARDIŞIK-ÇIKARIM KUTUPSAL KOD ÇÖZÜCÜNÜN DONANIM GERÇEKLEMESİ

Bu bölümde ardışık-çıkarma kutupsal kod çözücünün FPGA donanım gerçekleştirilmesinin detayları anlatılmıştır. Tasarım konfigürasyon, kontrol, hafıza, işlem ve karar birimlerinden oluşmaktadır. Şekil 4’te en üst seviye şematik tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 4. Kutupsal SC Kod Çözücü Şematik Gösterimi

A. Konfigürasyon Birimi

Konfigürasyon birimi polar kod çözücünün giriş bit uzunluğunu, kod oranını ve kod uzunluğunu ayarlamak için kullanılır. Girilen parametreler doğrultusunda uygun donanımını oluşturur. Örneğin bit uzunluğu ‘8’ girildiğinde girişleri ‘8’ bit olarak ayarlar ve arada yapılan işlemlerde taşmayı engelleyecek şekilde bit uzunluklarını ayarlar. Çıkış “1” bit olduğu için çıkış bu durumdan etkilenmemektedir. Bunun yanı sıra kod uzunluğuna göre kullanacağı hafıza elemanlarını üretir. Her derinlik bir hafıza bloğu olduğu için “ $N \log_2^N$ ” adet hafıza elemanı üretir. Kod oranı ise dondurulacak bit adreslerini seçer. Tüm donmuş bit adresleri başlangıçta üretilmiştir, kod oranına göre seçimini gerçekleştirir.

B. Kontrol Birimi

Kontrol birimi, kanaldan gelen verilerin doğru adreslerle okuma erişimli hafızaya (RAM, random access memory) yazılmasını sağlar. Yazma işlemi bittiğinde veri alma işlemini durdurur ve kod çözüme işlemini başlatır ve kontrol biriminin içinde bulunan sonlu durum makinesi sayesinde, her evre “s” için gerekli RAM okuma işlemlerini gerçekleştirir. Daha sonra okunan değerler için “f” veya “g” fonksiyonunu uygular ve gerekli RAM’e yazma işlemini gerçekleştirir. Fonksiyonların sonucunda gerekli veriler işlendiğinde, karar verme mekanizmasını çalıştırır ve sonucun yine uygun RAM’e yazılmasını sağlar. Son veri işlendiğinde ise tekrar veri almayı aktif hale getirir ve beklemeğe geçer.

C. Hafıza Birimi

Kod uzunluğu “N” olan kutupsal kodlar için “ $N \log_2(N)$ ” tane hafıza elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç “FPGA” içinde bulunan mantık elemanlarını kullanarak oluşturulabilen Distributed RAM yerine FPGA’in içinde hazır donanım olarak bulunan Block RAM’leri kullanarak giderilir. Böylece FPGA içindeki mantık hücre kaynakları (Flip-Floplar ve LUTlar), tasarruflu kullanılmış olurlar. Kullanılan RAM boyutları olabilecek maksimum veri uzunluğu ve paket uzunluğu baz alınarak belirlenmiştir. Çalışmada mesaj uzunluğu maksimum 2048, veri uzunluğu ise 16 bit işaretli olacak şekilde oluşturulmuştur. Daha kısa veri uzunluklarında iki adet yöntemle işlemler devam etmektedir: mesajın işareti dikkate alınarak fazla bitlere kesik atılması veya işaret genişlemesi yapılarak 16 bit mevcut şekilde devam edilmesidir.

D. İşlem Birimi

İşlem birimi, kutupsal kod çözücü için “f”, “g” fonksiyonlarının ve karar verme modüllerinin gerçekleştirilmesini içerir. LLR domaininde, “f” ve “g” işlemleri çarpma ve bölme işlemleri içermektedir. Burada, “f” ve “g” işlemlerinin donanımsal kompleksliği oldukça azdır. Tasarım yapısı Şekil 4’te gösterildiği gibi dallanma şeklinde olduğu için bu işlemler daha anlaşılabilir olması için ebeveyn-çocuk ilişkisi şeklinde isimlendirilmiştir [12]. Burada, ebeveyn olan bir düğümden aşağı inen sağ ve sol çocuklar sırasıyla “f” ve “g” fonksiyonlarını belirtmektedir. “Sol çocuk” işlem biriminden iki tane veri beklemekte olup burada gelen verilerin mutlak değerini almanın yanı sıra işaretleri de dikkate almaktadır. Mutlak değerlerinin küçüğünse işaretlerin çarpım sonucuna göre dışarıya vermektedir. Burada çarpma işlemi kompleksliği arttıracığı için, işaretlere “XOR” işlemi uygulanmıştır ve aynı sonuç elde edilmiştir. Basit bir toplayıcı ve çıkarıcı ile gerçekleştirilebilen “sağ çocuk” işlem modülü, “sol çocuk” modülünde olduğu gibi iki adet veri beklemesinin yanında, bir de “sol çocuk” fonksiyonu işlemi sonucu elde edilen karar bitini de giriş olarak almaktadır. Bu karar biti, işlemin toplama ya da çıkarma olacağına karar vermektedir. Eğer bit “1” ise çıkarma, “0” ise toplama yapılmaktadır. Sağ ve sol çocuk işlemleri tamamlandığında ebeveyn işlemi bu iki çocuktan şu iki bilgiyi alarak değerini belirler: ilk bit için sağ ve sol çocuk bilgisinin “XOR” sonucu, ikinci bit için sadece sağ çocuğun bit sonucunu alır.

Sol Çocuk İşlemi :

$$f(L_a, L_b) = \text{işaret}(L_a) \text{işaret}(L_b) \min(|L_a|, |L_b|) \quad (9)$$

Sağ Çocuk İşlemi:

$$g(\hat{u}_s, L_a, L_b) = L_a (-1)^{\hat{u}_s} + L_b \quad (10)$$

Ebeveyn İşlemi:

$$\hat{u}_1 + \hat{u}_2, \hat{u}_2 \quad (11)$$

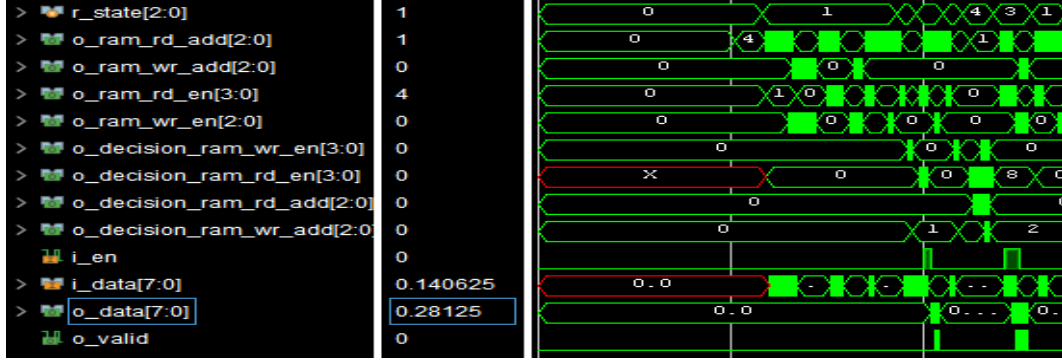
E. Karar Birimi

Karar birimi, kutupsal kod çözücü her son evreye geldiğinde elde edilen LLR değerinin kararını vermektedir. Eğer elde edilen LLR değeri donmuş bit koordinatında ise LLR değerine bakılmaksızın “0” olarak karar vermektedir. LLR değeri bilgi biti koordinatında ise değerın işaretine bakıp pozitif ise “0”, negatif ise “1” olarak karar verir. Bunun yanında son evrede olmayan işlemler için her “g” fonksiyonu işlemi tamamlandığında daha önce açıklanan karar verme işlemini gerçekleştirmektedir.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada kutupsal kodlar için “SC” kod çözücünün farklı kod uzunlukları ve oranlarında “ZYNQ-7 ZC706 (xc7z045ffg900-2) FPGA Geliştirme kartı” üzerinde çalışma frekansı “200 MHz” olacak şekilde donanımsal gerçekleştirilmesi gerçekleştirilmiş, “N=8” için durum değişimleri, birimler arası bazı giriş ve çıkışlar, “RAM” kontrol sinyallerinin simülasyon görüntüsü Şekil 5’te, kaynak kullanımı Tablo 1’de gösterilmiştir. Burada “BRAM” ve lojik elemanları kullanarak iki farklı tasarımın sonuçları incelendiğinde, arada ciddi bir kaynak kullanımı görülmektedir. “FPGA” in kendi lojik kaynaklarıyla oluşturulan tasarımda, kaynakların büyük bir oranı

hafıza birimi için kullanılmıştır. Bu durum, “BRAM” tabanlı hafıza birimi kullanılmasının kaynak tüketimi açısından avantajlı olduğunu göstermektedir. Hafıza biriminin bu ciddi kaynak tüketimi, çalışma frekansının sınırlanmasında önemli bir etkiye sahiptir. Bu yüzden gelecek çalışmalarda hafıza birimi daha optimize hale getirilip, yüksek çalışma frekanslarına çıkılması planlanmaktadır.



Şekil 5. Simülasyon Görüntüsü, N=8

Tablo 1. Polar Kod Çözücünün 200 MHz Çalışma Frekansında BRAM ve Lojik Tabanlı Hafıza Elemanlarının Kaynak Kullanım Sonuçları

	Kod Uzunluğu, N							
	BRAM Tabanlı Tasarım				Lojik Tabanlı Tasarım			
	8	128	512	2048	8	128	512	2048
LUT	167	266	316	370	380	5073	24135	113780
FlipFlop	146	192	217	249	581	9932	47124	222639
BRAM	4	7	12	19	0	0	0	0

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma TÜBİTAK 122E236 numaralı projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Arıkan, E. (2009). Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55 (7), 996–1009.
- [2] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #87. (2016). On the hardware implementation of channel decoders for short block lengths. Reno, Nevada, USA.
- [3] Tal, I., & Vardy, A. (2015). List Decoding of Polar Codes, *IEEE Transactions on Information Theory*, 61 (5), 2213-2226.
- [4] Tal, I., & Vardy, A. (2011). List Decoding of Polar Codes. International Symposium on Information Theory Proceedings, 31 July - 05 August, St. Petersburg, Russia, 1-5.
- [5] Leroux, C., Tal, I., Vardy, A., & Gross, W., J. (2011). Hardware architectures for successive cancellation decoding of polar codes. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 22-27 May, Prague, Czech Republic, 1665-1668.
- [6] Pamuk, A. (2011). An FPGA implementation architecture for decoding of polar codes. 8th International Symposium on Wireless Communication Systems, 06-09 November, Aachen, Germany, 1665-1668.
- [7] Sarkis, G., Giard, P., Vardy, A., Thibeault, C., & Gross, W., J. (2016). Fast List Decoders for Polar Codes. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34 (2), 318-328.
- [8] Dizdar, O., & Arıkan, E. (2016). A High-Throughput Energy-Efficient Implementation of Successive Cancellation Decoder for Polar Codes Using Combinational Logic. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 63 (3), 436-447.
- [9] Le Gal, B., Leroux C., & Jeco C. (2017). Successive Cancellation Decoder for Very Long Polar Codes. IEEE International Workshop on Signal Processing Systems, 03-05 October, Lorient, France, 1-6.
- [10] Arlı, A. Ç., Çolak, A., & Gazi O. (2017). The implementation of a successive cancellation polar decoder on Xilinx System Generator. 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 05-08 December, Batumi, Georgia, 372-376.
- [11] Mazo, J. E. (1975). Faster-than-Nyquist signaling. *The Bell System Technical Journal*, 54 (8), 1451– 1462.
- [12] A. Balatsoukas-Stimming & M. B. Parizi & A. Burg (2015). LLR-Based Successive Cancellation List Decoding of Polar Codes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(19), 5165-5179.



Araştırma Makalesi - Research Article

Temporal Analysis of Meteorological and Hydrological Drought in the Middle Mediterranean Basin

Orta Akdeniz Havzası'nda Meteorolojik ve Hidrolojik Kuraklığın Zamansal Değişimi

Dilek Taylan¹, Tuba Aydın², Tahsin Baykal³, Özlem Terzi^{4*}

Geliş / Received: 20/07/2022

Revize / Revised: 25/11/2022

Kabul / Accepted: 25/11/2022

ABSTRACT

In this study, Mann-Kendall (M-K) trend test was used to observe the temporal variation of precipitation, temperature, and flow data of Manavgat Stream, Köprüçay and Dim Stream sub-basins in the Middle Mediterranean Basin. Also, meteorological drought analysis by using Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI), and hydrological drought analysis by using Streamflow Drought Index (SDI) were performed for this study region. M-K trend test was re-applied to define the temporal variation of standardized meteorological and hydrological drought values obtained in 3-, 6-, 9- and 12-months periods. When the trend analysis results were examined, there was an increasing trend in all stations for the SPI method in the 12-month period, while a decreasing trend was observed in the Manavgat and Alanya stations in the RDI method. In the SDI method, a decreasing trend was detected in all periods. The temporal relationship of these drought indices was tried to be explained for the processes in which significant changes were observed according to the trend test. Therefore, the relationships between flow data and SPI as well as RDI were examined at different lag times. When the relationship between flow values of Dim and Manavgat Stream and both SPI and RDI values was examined, it was obtained a high correlation for four-month delay.

Keywords- Middle Mediterranean Basin, Standardized Precipitation Index, Reconnaissance Drought Index, Streamflow Drought Index, Trend Analysis

ÖZ

Bu çalışmada, Orta Akdeniz Havzası'nda bulunan Manavgat Nehri, Köprüçay ve Dim Çayı alt havzalarına ait yağış, sıcaklık ve akım verilerinin zamansal değişimini gözlemlemek için Mann-Kendall (M-K) trend testi kullanılmıştır. Aynı zamanda, bu bölge için Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ) ve Keşif Kuraklık İndeksi (KKİ) ile meteorolojik kuraklık, Akım Kuraklık İndeksi (AKİ) ile hidrolojik kuraklık analizleri gerçekleştirilmiştir. 3-, 6-, 9- ve 12- aylık periyotlarda elde edilen standartlaştırılmış meteorolojik ve hidrolojik kuraklık değerlerinin zamansal değişimini tanımlayabilmek için M-K trend testi tekrarlanmıştır. Trend analizi

¹ Contact: dilektaylan@sdu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0734-1900>)

İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

² Contact: tubaaydin@sdu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-7404-5020>)

İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

³ Contact: tahsinbaykal@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6218-0826>)

İnşaat Mühendisliği ABD, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

^{4*} Corresponding Author contact: ozlemterzi@isparta.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6429-5176>)

İnşaat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye

sonuçları incelendiğinde 12 aylık periyotta SYİ yöntemi için tüm istasyonlarda artan trend varken, KKİ yönteminde ise Manavgat ve Alanya istasyonunda azalan trend görülmüştür. AKİ yönteminde tüm periyotlarda azalan trend tespit edilmiştir. Trend testine göre anlamlı değişimlerin gözlemlendiği süreçler için bu kuraklık indekslerinin birbirleriyle olan zamansal ilişkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bunun için, akış verileri ile SPI ve ayrıca KKI arasındaki ilişkiler farklı gecikme sürelerinde incelenmiştir. Dim ve Manavgat Çayı için SYİ ve KKİ ile akım değerleri arasındaki ilişki irdelendiğinde 4 ay gecikme ile yüksek korelasyon elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- *Orta Akdeniz Havzası, Standartlaştırılmış Yağış İndeksi, Keşif Kuraklık İndeksi, Akım Kuraklık İndeksi, Trend Analizi*

I. INTRODUCTION

Drought is defined as the scarcity of water due to the lack of precipitation in a region. Although drought is one of the most difficult natural disasters to predict, it often develops slowly and occurs in over a long period of time [1]. Drought, which is considered a common feature of the climate, is a recurrent event. This phenomenon occurs not only in arid regions, but in all climatic zones [2]. Drought is examined in three parts as meteorological, agricultural, and hydrological drought that occurs sequentially over time. Some indices are used in the determination of these drought types. There are various studies related to Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI) which are used for the determination of meteorological drought. SPI is an index developed by McKee et al. [1] to determine the time interval, region, severity, and frequency of drought. Aktürk et al. [3] presented a drought analysis study in the Kırıkkale province of Turkey with the use of SPI and SPEI methods for the 1963-2018 period. They obtained high correlations between the two indices for the same time scale and concluded that SPI and SPEI methods are applicable in the detection and monitoring of drought in the study area. Aktürk et al. [4] employed the SPI method to examine drought characteristics in the Kızılırmak river basin of Turkey for the 1960–2017 period. They determined that the basin was under the impact of widespread droughts across the country during the study period. Katipoğlu et al. [5] used the average precipitation and temperature values for 3- and 12- months periods in 52 years (1966-2017) of Erzincan station located in the Euphrates Basin in Turkey. They analyzed these data using SPI, RDI, Statistical Z-Score Index (ZSI), Rainfall Anomaly Index (RAI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) methods. According to the analysis results, it was seen that the precipitation-based SPI and ZSI methods were in accordance with each other. Also, temperature-based SPEI and RDI were similar in themselves. It has been observed that the RAI method is more effective than other methods in detecting extreme drought or rainy periods. SPEI and RDI have been shown to be superior to other indices because they reflect the water climate changes on the analysis. Jehanzaib et al. [6] conducted drought analyzes for South Korea using SPI, SPEI, Standardized Runoff Index (SRI) indices for different time intervals. It has been observed that the possibility of the transformation of meteorological drought into the hydrological drought increases under the effect of climate change. Çavuş and Aksoy [7] conducted SPI analysis on the precipitation data obtained from the Adana meteorology station located in the Seyhan river basin of Turkey. For the years 1960-2016, analyzes were made for 1-, 3-, 6-, 9-, 12- and 24- months periods. Eris et al. [8] conducted analyzes for 13 different stations in the KüçükMenderes river basin of Turkey using Dimensionless Precipitation Anomaly Index (DPAI), SPI, SPEI methods between 1960 and 2018. According to the analysis results, it was observed that there was a severe and extreme drought in the basin. In addition, they indicate that it was determined that drought intensity increased, and its frequency decreased over time. Çavuş and Aksoy [9] examined the spatial drought for the Seyhan River Basin in the Eastern Mediterranean region of Turkey. SPI was derived from monthly precipitation data on a 12- month period for 19 meteorology stations on the river basin. In terms of the lack of precipitation, it was determined that there was a moderate and severe drought in the Seyhan River Basin. It was observed that the coastal part of the basin was affected more by the drought, while the northern part was less affected. Aksever [10] examined a SPI drought analysis by using precipitation data between 1975 and 2018 for the Kaklık Plain in the Denizli province of Turkey. According to the analysis, it was found that 13 months were dry in this time interval. Gümüş et al. [11] conducted a drought analysis with SPI by using monthly precipitation data from the stations in the Sanlıurfa province of Turkey for 78 years. For the data of the last 30 years, they found that the drought frequency increased. Efe and Özgür [12] conducted monthly and annual drought analyzes for the Konya Province in Turkey by using SPI and Percentage of Normal Index (PNI) with the precipitation data obtained from 20 stations for 1972-2013 years. They determined dry in most of the stations in April especially in recent years according to the SPI method. According to the PNI method, they found that drought recurs frequently in the summer months, especially in August in the majority of the stations. Another meteorological drought method is the RDI proposed by Tsakiris and Vangelis [13]. In this method, potential evapotranspiration (PET) data and precipitation data were used. Malakiya and Suryanarayana [14] used the RDI and SPI methods to assess drought in Amreli region in India. They tried to determine drought categories based on 35-year data including precipitation and PET values. For both methods, more meaningful results were obtained

for the 12- month period, and it was stated that moderate drought category was seen more frequently in the region. Kousari et al. [15] conducted drought analysis for Iran with the RDI, nonparametric Mann-Kendall (M-K) method and Sen's trend test. According to their outcomes, the RDI results showed a decreasing trend, especially in long periods of 12-, 18- and 24- months. They stated that decreasing trend in RDI time series means the increasing trend in drought severities. Tsakaris et al. [16] used the RDI, SPI and decimal slices methods for regional drought assessment in Mornos and Nestos basins in Greece. According to their analysis, decimal slices methods gave similar results with the SPI and RDI methods. However, they stated that the RDI method was more suitable for sensitive areas and regions that climate change occurs.

Hydrological drought appears as the lack of underground and surface water resources with the effect of meteorological drought in a region in the next stage. Mishra and Singh [17] drew attention to the consequences such as hydrological drought, the deterioration of water quality in the region, the decrease in agricultural yield, the decrease in stream flows and the adverse effects on morphology. Many studies have been carried out for the determination of hydrological drought with the Streamflow Drought Index (SDI) applied to standardize the stream flow data. In the SDI method proposed by Nalbantis [18], volumetric flow data were used. Malik et al. [19] conducted a drought analysis the SDI method using data from two stations located at the top of the Ramganga River basin in India between 1975 and 2007. They stated that there was no severe and extreme drought for both stations. They identified that the frequency of moderate drought was high for both stations. Gümüş [20] conducted a drought analysis with the SDI method using a 52-year data set taken from four different stations in the Asi River basin. According to the results of the analysis, he determined the year 2000 was a severe drought year, while the year 2001 was an extreme drought year. Tabari et al. [21] conducted a drought analysis with the SDI method using data from 1975-2009 for 14 stations located in the northwest of Iran. According to the SDI results, they found that there was drought in each station. In addition, they observed that extreme drought occurred for 12-years between 1997 and 2009.

The precipitation, temperature and flow data used in meteorological and hydrological drought analysis are randomly changing variables that may increase or decrease over time. The M-K test, one of the special methods used in the study, is a non-parametric test that examines the increase or decrease trend of a time dependent variable. Yıldız et. al [22] analyzed drought severity, trend and results with SPI, 12- month period over a 48-year period in the Susurluk Basin of Turkey. Innovative trend analysis and M-K tests were used to determine the trends of SPI values. Malik et. al [23] used M-K and graphical Şen-Innovative Trend (ŞIT) tests to determine the Effective Drought Index (EDI) trend of 13 meteorological stations in India. The results obtained by examining the trend that could not be detected and observed by the MK method in the EDI data series showed the superiority of the ŞIT method. Kışi and Ay [24] used Şen's [25] innovative water parameters method and M-K test. They conducted trend analysis for 4 stations selected across the Kızılırmak river basin. They found that the two methods were compatible with each other. Büyükyıldız and Berktaş [26] examined the trend of monthly total precipitation data of Sakarya Basin by using the Sen, Spearman Rho and seasonal M-K tests in addition to the M-K test. For the precipitation data obtained from 25 stations, decreasing trends with a significance level of 0.05 were determined at the half of the stations while an increasing trend was observed in the remaining part. Yue and Wang [27] applied the cross-correlated M-K Rank Correlation test to approximately 100-year precipitation data of 22 stations for three different geographic regions in Canada.

In this study, meteorological and hydrological drought analysis, which is of great importance for the water resources planning and monitoring, was carried out by using the monthly average flow, monthly average precipitation, and temperature data. The Manavgat Stream, Dim Stream and Köprüçay stations in the Middle Mediterranean Basin in Turkey were selected as the study area. The SPI and RDI methods were used for the meteorological drought and the SDI was used for the hydrological drought analyses. The temporal variation was investigated by applying the M-K test to historical precipitation, temperature, flow records and calculated PET values, as well as the standardized drought indices obtained by the RDI, SPI and SDI methods for 3-, 6-, 9- and 12- month periods. The relationship between meteorological and hydrological drought was investigated using SPI, RDI and flow values for different lag times.

II. METHOD

A. Study Area and Data

The study area includes the Manavgat stream, Köprüçay stream and Dim stream sub-basins which are located in the Middle Mediterranean Basin. The Mediterranean climate is effective in this region, where the annual average precipitation is 881.7 mm, the annual average temperature is 18.1 °C and the relative humidity is 60.6% [28]. The Manavgat stream, which originates from the Taurus Mountains is 93 km long. It flows into the Mediterranean Sea through Manavgat district center [29]. The Köprüçay stream originates from the Taurus Mountains near Isparta Sütçüler and flows into the Mediterranean Sea through narrow and deep canyons near Serik. Likewise, the Dim stream originates from the Taurus Mountains and flows into the sea in Alanya. The map of the study area is given in Figure 1.

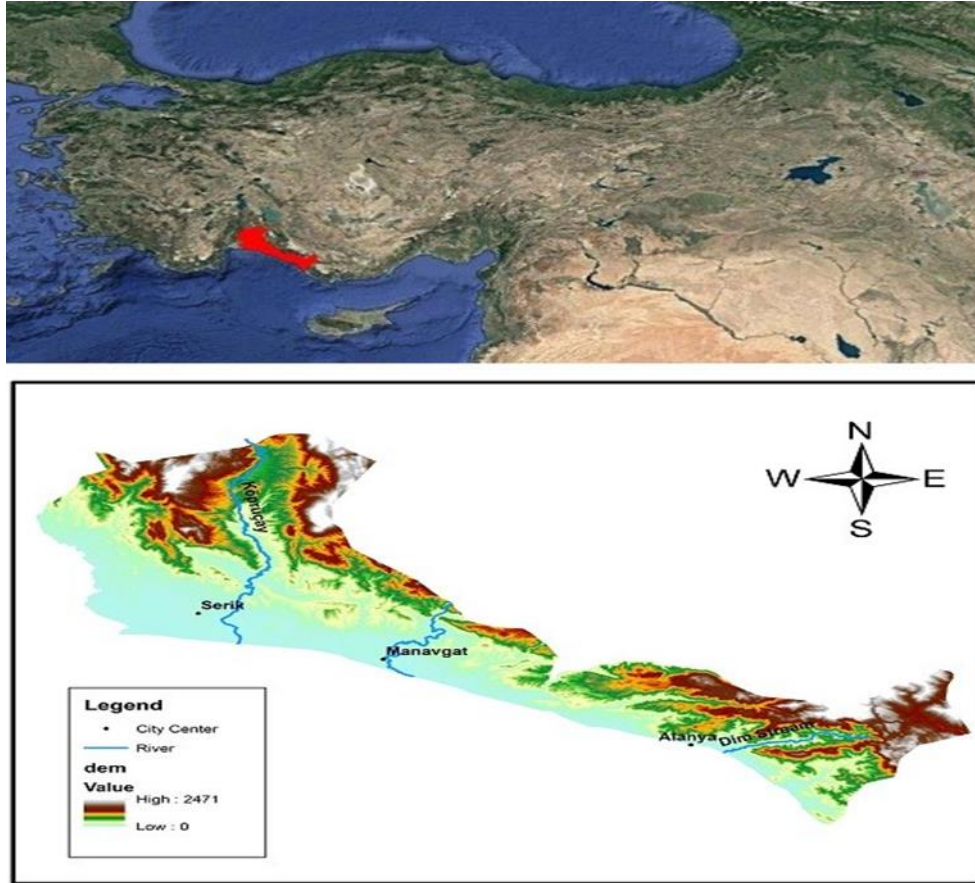


Figure 1. The map of study area

For the meteorological drought analysis, monthly total precipitation, maximum, minimum and average temperature values of Manavgat, Serik and Alanya meteorology stations were taken from the Turkish State Meteorological Service. Also, for the hydrological drought analysis, monthly flow values of Manavgat Stream, Köprüçay and Dim Stream were obtained from the General Directorate of State Hydraulic Works. These data included values between 1972-1994 for Köprüçay, 1963-2002 for Manavgat River and 1963-1998 for Dim Stream. Some statistical values of historical data were summarized in Table 1 and Table 2.

Table 1. Statistical values of precipitation and temperature data

Name of Station	Time Intervals	Precipitation (mm)				Temperature (°C)			
		Max.	Average	Min.	Standard Deviation	Max.	Average	Min.	Standard Deviation
Manavgat	1963-2002	780.8	92.04	0	47.57	30.3	18.49	7.7	0.13
Serik	1972-1994	603.4	93.48	0	48.03	29.9	18.40	6.8	0.24
Alanya	1963-1998	710.4	93.06	0	47.41	30.5	18.87	8.3	0.14

Table 2. Statistical values of flow data (m³/s)

Name of Station	Time Intervals	Max.	Average	Min.	Standard Deviation
Manavgat Stream	1963-2002	0.084	0.020	0.0000	0.006
Köprüçay	1972-1994	0.100	0.023	0.0080	0.007
Dim River	1963-1998	0.080	0.011	0.0009	0.005

B. Standardized Precipitation Index

The Standardized Precipitation Index (SPI) is a multiscale probability index that calculates precipitation deviation during wet and dry periods and allows drought monitoring at different periods [1]. This index is accepted as the starting point for the meteorological drought monitoring by the World Meteorological Organization. It is widely used because it is simple and uses only monthly precipitation data [30].

With this index, calculations are made for a continuous monthly precipitation data set for at least 30 years at different periods. Each of the precipitation data sets is considered to fit the Gamma function. Thus, the relationship between precipitation and the probability of its occurrence can be determined [31].

SPI is obtained by subtracting the mean of precipitation from the amount of precipitation within the specified time interval or period and dividing it by the standard deviation [32]. SPI is calculated as in Equation (1).

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}_t}{S_x} \quad (1)$$

Here, X_i is the amount of precipitation, X_t is the mean precipitation in the time interval t , and S_x is the standard deviation of the precipitation. The classification of SPI values is given in Table 3.

Table 3. Classification of SPI values [1]

SPI Value	Classification
≥ 2.00	Extremely humid
1.50 – 1.99	Humid
1.00 – 1.49	Moderately humid
- 0.99 – 0.99	Milddrought
- 1.00 – - 1.49	Moderate drought
- 1.50 – - 1.99	Severe drought
$\leq - 2.00$	Extremedrought

C. Reconnaissance Drought Index

Since the calculation approaches applied for each basin differ from each other, the results are unique for each basin [33]. Reconnaissance Drought Index (RDI) is a method based on precipitation and potential evapotranspiration data [13-16]. Reconnaissance drought index is calculated by Equation (2).

$$a_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad i = 1(1)N \text{ and } j = 1(1)k \quad (2)$$

where P_{ij} and PET_{ij} represent precipitation and potential evapotranspiration values, respectively. N parameter indicates the number of years of data set. Equation (2) is used to calculate the RDI initial value. RDI_n value is calculated as follows.

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_k^{(i)}}{\bar{a}_k^{(i)}} - 1 \quad (3)$$

In Equation (3), $\bar{a}_k^{(i)}$ represents the mean of the $a_k^{(i)}$ parameter. RDI_{st} refers to the standardized index and is calculated as follows.

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (4)$$

Where $y^{(i)}$ is the $\ln(a_k^{(i)})$, \bar{y} is the arithmetic mean value. $\hat{\sigma}_y$ is the standard deviation value [34].

1) Thornthwaite method:

According to the method proposed by Thornthwaite and Matter [35], the PET value (mm/month) is calculated according to Equation (5) by using the daily average temperature (T) values.

$$PET = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (5)$$

where a is given by a third- order polynomial in the heat index(I) as below.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (6)$$

$$a = 0.675 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 0.017921 + 0.49239 \quad (7)$$

The PET value for different values of T is calculated according to Equation (8).

$$PET = \begin{cases} 0 & T < 0^\circ\text{C} \\ 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a & 0^\circ\text{C} \leq T < 25.5^\circ\text{C} \\ -425.85 + 32.24 - 0.43T^2 & T \geq 26.5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

The number of days in a month (θ), the daylight duration (in hours) on fifteenth day of the month (h), and latitude are required to calculate the PET correction (Equation 9) [36].

$$PET = PET \left(\frac{\theta}{30} \right) \left(\frac{h}{12} \right) \quad (9)$$

D. Streamflow Drought Index

Streamflow Drought Index (SDI) was proposed by Nalbantis [37] for the analysis of hydrological drought characteristics (duration, severity, and intensity) on multiple time scales. The SDI calculation method is like the SPI method developed by [1]. The only difference is streamflow values that used instead of precipitation values [37].

In this method, the stream cumulative flow is calculated by Equation (10) [38].

$$Q_{i,j} = \sum_{j=1}^{3k} q_{i,j} \quad i = 1,2,3, \dots \quad j = 1,2,3, \dots, 12 \quad k = 1,2,3,4 \quad (10)$$

Here, Q_{ij} is cumulative, q_{ij} is hydrological year and k is the total flow in the reference period. j defines the months in a hydrological year ($j = 1$ October and $j = 12$ September). The k value is the drought periods ($k = 1$, October-December, $k = 2$, October-March, $k = 3$, October-June, $k = 4$, October-September). SDI value for each hydrological year for period k is calculated by Equation (11).

$$SDI_{i,k} = \frac{Q_{i,k} - \overline{Q_k}}{S_k} \quad i = 1,2,3, \dots \quad k = 1,2,3,4 \quad (11)$$

Here $\overline{Q_k}$ is the mean of the cumulative volume of flow for the reference period k and over a long period, and S_k is the standard deviation value. $\overline{Q_k}$ is considered the threshold level [39]. Hydrological drought conditions are defined in Table 4 based on SDI.

Table 4. Hydrological drought conditions according to SDI [40]

Criterion	Definition
$SDI \geq 0$	No drought
$-1 \leq SDI \leq 0$	Mild drought
$-1.5 \leq SDI \leq -1$	Moderate drought
$-2 \leq SDI \leq -1.5$	Severe drought
$SDI \leq -2$	Extreme drought

E. Mann-Kendall Trend Test

Mann-Kendall (M-K) trend test, known as Kendall's Tau statistics, is highly preferred in determining the trends of the time series [41, 42]. M-K test is nonparametric and independent of data distribution. While the M-K test statistic is expressed as S , it is calculated as follows.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (12)$$

The trend in a time series is investigated by the null hypothesis. According to Equation (12), the hypotheses are ranked in $i = 1, 2, \dots, n-1$ and x_j . Also, the hypothesis is applied to x_i time series. Each of the data points (x_i) is taken as a point compared with the rest of the x_j data points. This is expressed in Equation (13).

$$\text{sgn}(x_j - x_i) \begin{cases} \text{if } (x_j - x_i) > 0, & \text{then } +1 \\ \text{if } (x_j - x_i) = 0, & \text{then } 0 \\ \text{if } (x_j - x_i) < 0, & \text{then } -1 \end{cases} \quad (13)$$

The variance value of the S parameter is calculated according to Equation (14).

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2i+5)}{18} \quad (14)$$

In Equation (14), t_i is accepted as the number of nodes up to the sample i , and the significance of the M-K test whose variance is determined by Equation (14) is confirmed by comparing it with the critical z value calculated by Equation (15) with the standard normal variable z [21].

$$z = \begin{cases} \text{If } S > 0, & \text{then } \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \\ \text{If } S = 0, & \text{then } 0 \\ \text{If } S < 0, & \text{then } \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \end{cases} \quad (15)$$

If the S value calculated according to Equation (15) is positive, it is an increasing trend and if it is negative, it is a decreasing trend. In addition, M-K test provides convenience to the user as it is a method that can be used even if there is any deficiency in the data set [43].

III. APPLICATION

In this study, firstly, M-K tests were applied to historical precipitation, temperature data, and potential evapotranspiration values which were calculated by depending on precipitation and temperature. Then, the M-K test was applied to the standardized drought indices calculated using SPI, RDI and SDI in the 3-, 6-, 9- and 12-month periods by DrinC software.

In SPI, the calculation of the index in 12-month and shorter periods is quite complicated because precipitation data do not conform to the normal distribution. After establishing a probability relationship from historical records, the probability of the occurrence of any observed precipitation data and its deviation from the normal distribution whose mean is zero (0) and standard deviation is one (1) can be calculated. Precipitation data are generally found to be compatible with the Gamma probability distribution. The conformity of the precipitation data of the stations to the Gamma probability distribution was investigated to determine the precipitation probabilities observed in periods less than 12-month. Thus, the cumulative probabilities of observed precipitation data can be determined.

A. M-K Test of Historical Records

In addition to historical precipitation, temperature, and flow data, the M-K test was applied by using potential evapotranspiration (PET) values calculated according to the Thornthwaite method to obtain RDI values used in monitoring meteorological drought. M-K test results were given in Table 5.

Table 5. M-K test results of historical records

Period	Station	October	November	December	January	February	March	April	May	June	July	August	September
Prec.	Manavgat	-0.69	0.79	-0.77	-0.11	-0.21	1.43	-0.61	1.16	-0.27	1.86	-0.14	-0.94
	Serik	-0.58	0.32	1.06	0.37	-0.53	1.69	-0.95	-0.16	-1.41	1.28	0.33	0.16
	Alanya	-0.63	1.37	-0.21	-0.63	-0.37	0.85	-0.79	1.06	-0.03	1.09	0.20	-0.44
Temp.	Manavgat	2.40 *	2.24 *	1.00	1.19	0.00	-0.68	0.23	2.08 **	2.89 ***	3.72 ***	4.27 ***	3.48 ***
	Serik	1.85	0.90	1.03	1.38	-0.13	-0.34	0.03	1.17	2.30 *	1.53	2.99 **	1.99 *
	Alanya	2.25 *	0.64	0.33	1.87	0.94	-0.08	1.16	2.20 *	2.35 *	4.29 ***	3.94 ***	5.12 ***
PET	Manavgat	1.83	0.92	-0.83	0.15	-1.06	-2.06 *	-0.94	1.36	2.74 **	3.76***	4.37***	3.30 ***
	Serik	1.48	0.05	0.42	0.85	-0.85	-1.53	-0.63	0.74	2.11 *	1.53	3.12 **	1.90
	Alanya	1.76	-0.18	-1.24	0.37	-0.61	-1.89	0.26	1.92	2.25 *	4.18 ***	3.99 ***	5.16 ***
Flow	Manavgat Str.	-2.10 *	1.39	-0.17	-0.77	-0.55	-1.71	0.22	-0.52	-1.11	-0.99	-1.47	-2.23 *
	Köprüçay	-2.03 *	0.13	0.13	-0.66	-0.82	-0.50	-0.61	-0.45	-1.00	-1.37	-1.08	-1.32
	Dim Str.	1.36	2.08 *	0.53	-0.67	-0.78	-1.62	-0.26	-0.53	-1.70	-1.68	-0.18	-0.61

The values given in Table 5 are the z statistics obtained from the M-K test. The z statistics represent different α confidence intervals. The *, **, and *** signs which were seen next to the values are the significance levels of α for 0.05, 0.01, and 0.001 confidence intervals, respectively. In other words, when the confidence intervals are narrower, the more meaningful the test results are obtained. On the other hand, negative (-) values indicate the decreasing trend, positive (+) values indicate the increasing trend over time.

According to the M-K test results of PET values, an increasing trend was observed in Manavgat and Alanya stations in May, June, July, August, September, and October, while a decreasing trend was observed in both in March. At the Serik station, the most significant test result was obtained in August for the increasing trend observed in June, July, August, and September. In general, there was an increasing trend in temperature values in all months of the year. Especially in the period between May and October, this increase was in significant level for all three stations. Although the flow data generally showed a decreasing trend, the most significant results were seen in October for Manavgat Stream and Köprüçay stations and in November for Dim Stream.

B. M-K Test for Meteorological and Hydrological Droughts

To observe the change of meteorological and hydrological drought in the region over time, the standard values of SPI, RDI, and SDI were calculated at 3-, 6-, 9- and 12-month periods, and the M-K test was applied for these indices. In Tables 6, 7, and 8, these test results were given for SPI, RDI, and SDI, respectively.

Table 6. M-K test results of SPI values

Period	Station	October	November	December	January	February	March	April	May	June	July	August	September
3-month	Manavgat	0.87	0.17	-0.71	-0.24	0.06	1.24	0.94	0.40	-0.33	1.05	0.20	1.58
	Serik	1.21	0.74	0.85	0.85	1.06	1.90	-0.74	-0.05	-0.42	0.29	-0.48	0.00
	Alanya	1.54	0.72	-0.31	-1.02	-0.56	0.19	0.12	0.10	1.27	0.38	0.69	0.75
6-month	Manavgat	0.48	0.10	0.01	-0.05	0.03	1.27	0.78	0.43	1.57	0.64	0.13	-0.27
	Serik	1.16	0.95	0.95	0.63	0.69	1.69	-0.85	-0.42	0.11	0.63	0.37	-0.05
	Alanya	0.59	0.12	-0.01	-0.93	-0.45	0.59	0.10	1.19	1.08	1.21	0.40	0.12
9-month	Manavgat	0.22	0.08	-0.22	-0.20	0.05	1.64	0.59	0.13	-0.31	0.06	-0.17	-0.15
	Serik	1.00	1.16	0.90	0.74	0.63	0.90	0.37	0.00	0.00	0.48	0.40	0.42
	Alanya	0.72	0.31	0.07	-0.89	-0.01	1.29	1.46	0.69	0.23	0.20	0.26	0.12
12-month	Manavgat	0.06	0.10	0.64	0.06	0.20	0.06	0.20	0.01	-0.10	-0.24	-0.22	-0.29
	Serik	1.00	0.79	0.32	0.53	0.32	0.37	0.53	0.21	0.48	0.53	0.48	0.42
	Alanya	0.91	0.12	0.56	0.31	0.15	0.53	0.34	0.34	0.26	0.20	0.34	0.42

In Table 6, while the SPI values for the Manavgat and Serik stations showed an increasing trend in the 3- and 6- months periods in March, an increasing trend was observed at the Manavgat station in the 9 months period in March. In addition, an increasing trend was observed at the Serik and Alanya stations in 12 months period in October. In the 3- months period, an increasing trend was observed in June and October at the Alanya station. In parallel with the increasing trend in historical precipitation data given in Table 5, a general increase was observed in the SPI values while there was no significant decreasing trend.

Table 7. M-K test results of RDI values

Period	Station	October	November	December	January	February	March	April	May	June	July	August	September
3-month	Manavgat	0.76	0.43	-0.13	0.20	0.85	1.36	0.76	0.15	-0.42	0.98	-0.03	1.27
	Serik	0.90	0.53	0.37	0.58	1.16	1.80	-0.79	-0.05	-0.53	0.16	-0.53	-0.26
	Alanya	1.13	0.89	-0.04	-0.80	-0.18	0.18	-0.18	-0.01	1.16	0.16	0.29	0.37
6-month	Manavgat	0.78	0.71	0.06	-0.03	-0.20	0.69	0.50	0.10	1.29	0.10	-0.27	-0.48
	Serik	0.79	1.32	1.06	0.42	0.90	1.48	-0.74	-0.58	-0.21	0.32	-0.26	-0.26
	Alanya	0.78	0.53	0.12	-1.02	-0.97	-0.04	-0.45	0.78	0.75	0.59	0.01	-0.31
9-month	Manavgat	0.31	-0.27	-0.83	-0.66	-0.45	1.36	-0.06	-0.36	-0.78	-0.36	-0.13	-0.29
	Serik	0.74	0.74	0.42	0.05	0.32	0.85	0.16	-0.37	-0.26	0.11	0.00	0.05
	Alanya	0.59	0.10	-0.50	-1.59	-0.75	0.72	0.80	0.10	-0.48	-0.75	-0.34	0.10
12-month	Manavgat	-0.45	-0.71	-0.20	-0.48	-0.50	-0.41	-0.45	-0.55	-0.48	-0.62	-0.76	-0.90
	Serik	0.48	0.21	0.37	0.11	-0.53	0.05	0.05	-0.05	0.05	0.00	0.00	-0.05
	Alanya	-0.07	-0.56	0.04	-0.20	-0.56	-0.20	-0.40	-0.40	-0.18	-0.20	-0.42	-0.40

As can be seen in Table 7, an increasing trend was observed with the RDI method, which is similar to the SPI method, in March at the Serik and Manavgat stations for the 3-month period. There is an increasing trend for November at the Serik station in the 6-month period. The same upward trend was also observed at Alanya station in October. Especially at the Serik station, there is a trend parallel to the increase in historical temperature and PET values in both SPI and RDI methods for 12- month period. Since the upward trend in both temperature and PET values at Serik station was lower than that of Manavgat and Alanya stations, decreasing trends were observed in the RDI. When the 12-month period was analysed, an increasing trend was seen in SPI values at Manavgat,

Serik and Alanya stations. In the same period, a decreasing trend was observed in RDI values at Manavgat and Alanya stations. The decreasing trend seen in RDI is thought to be due to more significant increases in temperature values in Manavgat and Alanya. In RDI method, unlike SPI, PET values are also used depending on the air temperature as well as the precipitation parameter. For this reason, it has been observed that there are trend differences between the two indices.

Similar to this study, Dinç et al. [28] carried out drought analysis of eight meteorological stations in Antalya using SPI. They observed increasing trends at 3-, 6-, 12- and 24-month periods at Alanya and Manavgat stations. Simsek [44] performed trend analysis using 3-, 6- and 12-month SDI values of 29 streamflow-gauging stations in the Mediterranean Basin. It was seen that there was decreasing trend in most of the stations. In addition, there are studies having similar results in nearby regions as [45, 46].

Table 8. M-K test results of SDI values

Period	Station	October	November	December	January	February	March	April	May	June	July	August	September
3- month	Manavgat Stream	0.13	0.00	-0.57	-1.06	-0.80	-0.69	-0.34	-0.89	-1.27	-1.43	-1.85	0.24
	Köprüçay	0.00	-0.32	-0.90	-0.79	-1.00	-0.37	-0.53	-0.82	-1.00	-1.21	-2.01*	-0.95
	Dim Stream	1.27	0.61	-0.23	-1.21	-0.94	-0.72	-0.75	-1.08	-1.57	-1.51	1.29	1.57
6- month	Manavgat Stream	-0.45	-0.48	-0.80	-1.04	-0.83	-0.69	-0.52	-1.04	-0.69	-0.22	-0.73	-0.66
	Köprüçay	-0.90	-0.74	-0.74	-0.69	-0.77	-0.37	-0.85	-0.74	-0.69	0.05	-0.69	-1.43
	Dim Stream	0.00	-0.40	-0.64	-1.32	-0.94	-0.78	-0.89	-1.13	0.75	0.67	0.40	0.10
9- month	Manavgat Stream	-0.64	-0.80	-1.01	-1.20	-1.25	-0.59	-0.38	-0.87	-0.66	-0.94	-0.92	-0.94
	Köprüçay	-0.85	-0.74	-1.00	-0.79	-0.16	-0.11	-0.32	-0.95	-1.58	-1.27	-1.27	-1.37
	Dim Stream	-0.26	-0.20	-0.67	-1.38	-1.48	0.00	0.23	-0.18	-0.53	-0.53	-0.69	-0.83
12- month	Manavgat Stream	-0.87	-0.80	-0.78	-0.90	-0.97	-0.80	-0.76	-0.94	-1.04	-1.01	-1.13	-1.29
	Köprüçay	-0.79	-0.32	-0.58	-0.63	-0.85	-1.00	-1.37	-1.56	-1.58	-1.48	-1.21	-1.16
	Dim Stream	-0.18	-0.83	-0.91	-0.50	-0.59	-0.42	-0.78	-0.80	-1.08	-0.86	-0.72	-0.69

According to Table 8, there was a decreasing trend for all three flow stations in the 3-, 6-, 9- and 12-month period in June, July, and August. According to the SDI method, the decreasing trend was observed in the summer months, and it supported the occurrence of the hydrological drought in the continuation of the meteorological droughts detected in March in the region. The decreasing trends for the Manavgat and Dim streams in January and for 3-, 6- and 9- month periods showed the effect of hydrological drought in the flows of the region.

In addition, it was considered that hydrological drought may occur in the continuation of meteorological drought, the relationships between monthly flow values of each stream and both SPI and RDI values were examined in different lag times. A high correlation was obtained between meteorological drought indices and flow values in the four-month delay period for the Dim stream as shown in Figs. 2 and 3. In the figures, the highest R^2 values ($0.60 < R^2 < 0.80$) for the 6- and 9- month periods were obtained in December and January. The highest R^2 value was found to be 0.74 for both SPI and RDI in the 9-month period with a delay of four months. This showed that the correlation was strong between the standardized meteorological data in October (i.e. the beginning of the water year) and the flow data in January and December approximately four months later. While this high relationship in the winter months seemed to weaken towards the end of the water year for the 3-month period ($0.00 < R^2 < 0.20$), it increased relatively during the 6-, 9- and 12-month periods after July ($0.20 < R^2 < 0.40$). There was a common similarity at the end of November and in February for all periods with a range of $0.40 < R^2 < 0.60$.

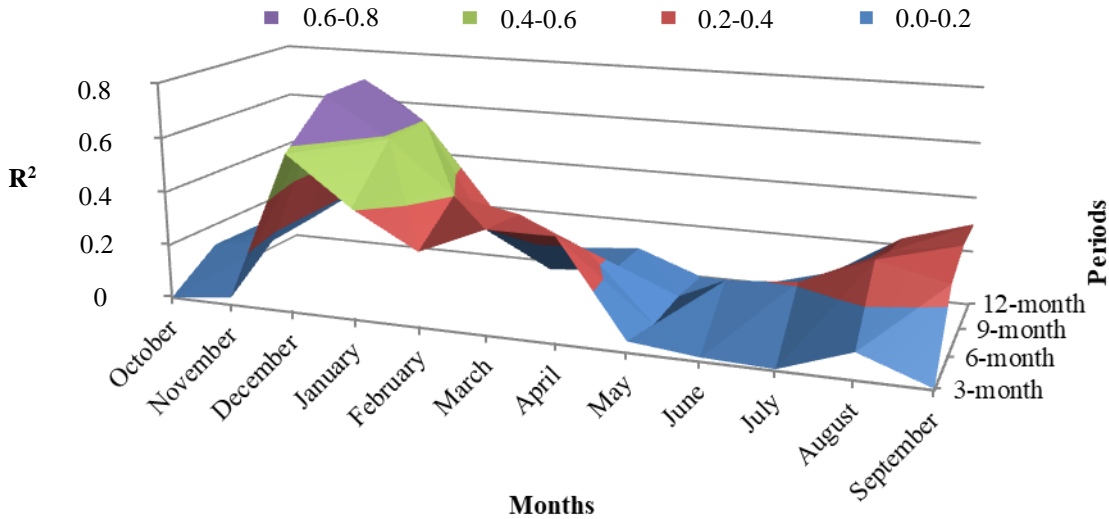


Figure 2. R^2 values between SPI and flow values of Dim Stream for a delay of four months

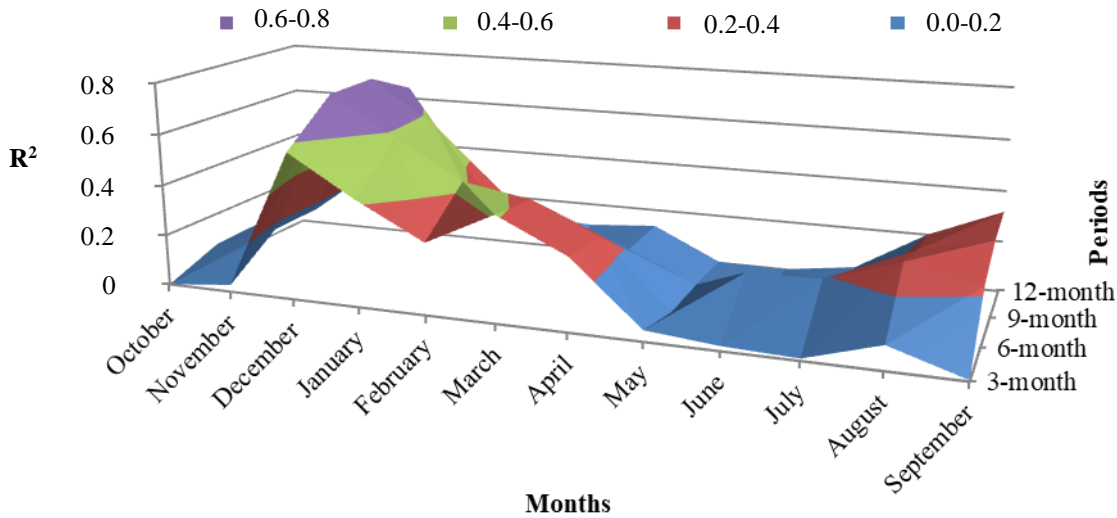


Figure 3. R^2 values between RDI and flow values of Dim Stream for a delay of four months

Also, the relationship between flow values and meteorological drought indices (SPI and RDI) were obtained as 0.58 ($0.40 < R^2 < 0.60$) for 6- months period for the 4-month delay period of Manavgat Stream. For Köprüçay, the lower relationship was found ($0.00 < R^2 < 0.20$). In the study area, the relationship between flow values and meteorological drought indices showed local differences in different periods.

IV. CONCLUSIONS

The increasing need for domestic, industrial, and irrigation water because of the climate change due to global warming and the population growth requires better planning of non-renewable water resources. For this planning, it is not possible to separate the drought risk which occurs in a long time from the decrease in water resources. The effect of determining hydrological drought that may occur in the case of long-term meteorological drought, defined as lack of precipitation, on sustainable water resources studies is important. M-K trend test has been applied to see the temporal changes of historical precipitation, temperature, flow, and potential evapotranspiration data of Manavgat Stream, Köprüçay, and Dim Stream sub-basins in the Middle Mediterranean Basin, which is important for agricultural production to monitor meteorological and subsequent hydrological drought. In addition, the standard values obtained with the SPI, RDI, and SDI used for the analysis of meteorological and hydrological drought were also tested with the M-K test. According to the M-K test, the increasing and decreasing trends of the precipitation and flow drought indices in the region over time were observed in successive months. It is known that SPI in a 6- month period may be an indicator for the determination of hydrological drought in the continuation of meteorological drought. In addition, a strong correlation was observed between the 6-month SPI values and the flow values for the 4- month lag time. This situation supports

that agricultural and hydrological drought may occur after the meteorological drought. Similarly, the parallel changes of precipitation and PET values in the same time intervals show that agricultural drought is compatible with arid and rainy processes in terms of meteorology. As a result of this study, by knowing the relationship between meteorological and hydrological drought with a delay of 4 months, early detection of possible hydrological drought risk will be provided. In this way, it could be recommended to take measures for the optimum use of water resources for the relevant stakeholders.

REFERENCES

- [1] McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. 17(22), 179-183.
- [2] Dai, M., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Guo, Y., Wang, L., Fang, W., Li, P., & Zheng, X. (2020). Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics. *Agricultural Water Management*, 231, 106003.
- [3] Aktürk, G., Zeybekoğlu, U., & Yıldız, O. (2022). SPI ve SPEI yöntemleri ile kuraklık araştırması: Kırıkkale Örneği. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (IJERAD)*, 14(2), 762-776.
- [4] Akturk, G., Zeybekoglu, U., & Yildiz, O. (2022). Assessment of meteorological drought analysis in the Kızılırmak River Basin, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 1-15.
- [5] Katipoğlu, O. M., Acar, R., & Şengül, S. (2020). Comparison of meteorological indices for drought monitoring and evaluating: a case study from Euphrates basin, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*, 11(S1), 29-43.
- [6] Jehanzaib, M., Sattar, M. N., Lee, J. H., & Kim, T. W. (2020). Investigating effect of climate change on drought propagation from meteorological to hydrological drought using multi-model ensemble projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(1), 7-21.
- [7] Çavus, Y., & Aksoy, H. (2020). Critical drought severity/intensity-duration-frequency curves based on precipitation deficit. *Journal of Hydrology*, 584, 124312.
- [8] Eris, E., Çavus, Y., Aksoy, H., Burgan, H. I., Aksu, H., & Boyacıoğlu, H. (2020). Spatiotemporal analysis of meteorological drought over Küçük Menderes River Basin in the Aegean Region of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1515-1530.
- [9] Cavus, Y., & Aksoy, H. (2019). Spatial drought characterization for Seyhan River basin in the Mediterranean region of Turkey. *Water*, 11(7), 1331.
- [10] Aksever, F. (2019). Standartlaştırılmış yağış indeksi (SYİ) yöntemi ile kuraklık analizi ve Kaklık (Honaz-Denizli) ovasındaki yeraltısuyu değişimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(1), 152-160.
- [11] Gümüş, V., Başak, A., & Oruç, N. (2016). Drought Analysis of Şanlıurfa Station with Standard Precipitation Index (SPI). *Harran University Journal of Engineering*, 1(1), 36-44.
- [12] Efe, B., & Özgür, E. (2014). *Drought analysis of Konya and surroundings by standardized precipitation index (SPI) percent of normal index (PNI)*. 2nd International Drought and Desertification Symposium, Konya, Turkey. 146-159.
- [13] Tsakiris, G., & Vangelis, H. J. E. W. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11.
- [14] Malakiya, A. D., & Suryanarayana, T. M. V. (2016). Assessment of drought using standardized precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI): a case study of Amreli District. *International Journal of Science and Research*, 5(8), 1995-2002.
- [15] Kousari, M. R., Dastorani, M. T., Niazi, Y., Soheili, E., Hayatzadeh, M., & Chezgi, J. (2014). Trend detection of drought in arid and semi-arid regions of Iran based on implementation of reconnaissance drought index (RDI) and application of non-parametrical statistical method. *Water Resources Management*, 28(7), 1857-1872.
- [16] Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821-833.
- [17] Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- [18] Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European water*, 23(24), 67-77.
- [19] Malik, A., Kumar, A., Salih, S. Q., & Yaseen, Z. M. (2021). Hydrological drought investigation using streamflow drought index. *In Intelligent Data Analytics for Decision-Support Systems in Hazard Mitigation*. 63-88.
- [20] Gümüş, V. (2017). Akım kuraklık indeksi ile Asi havzasının hidrolojik kuraklık analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(1), 65-73.
- [21] Tabari, H., Nikbakht, J., & Hosseinzadeh Talaei, P. (2013). Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water resources management*, 27(1), 137-151.

- [22] Yıldız, M. B., Nacar, S., & Şan, M. (2022). Assessment of regional drought trends by using improved visualization version of Innovative Trend Analysis and Mann Kendall test. 14th International Conference on Hydroscience& Engineering Izmir, Turkey. 503-513.
- [23] Malik, A., Kumar, A., Pham, Q. B., Zhu, S., Linh, N. T. T., & Tri, D. Q. (2020). Identification of EDI trend using Mann-Kendall and Şen-innovative trend methods (Uttarakhand, India). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(18), 1-15.
- [24] Kisi, O., & Ay, M. (2014). Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology*, 513, 362-375.
- [25] Şen, Z. (2017). Innovative trend significance test and applications. *Theoretical and applied climatology*, 127(3), 939-947.
- [26] Büyükyıldız, M., & Berktaş, A. (2004). Parametrik olmayan testler kullanılarak Sakarya havzası yağışlarının trend analizi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, *Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19(2), 23-38.
- [27] Yue, S., & Wang, C. Y. (2002). Regional streamflow trend detection with consideration of both temporal and spatial correlation. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(8), 933-946.
- [28] Dinç, N., Aydınşakir, K., Işık, M., & Büyüктаş, D. (2016). Drought analysis of Antalya province by standardized precipitation index (SPI). *Derim*, 33(2), 279-298.
- [29] Doğaner, S. (2016) Ovalar, Akdeniz Bölgesi Coğrafyası, academia.edu. Erişim tarihi: 27 Mayıs 2016.
- [30] DanandehMehri, A., Sorman, A. U., Kahya, E., & Hesami Afshar, M. (2020). Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2), 254-268.
- [31] Bhunia, P., Das, P., & Maiti, R. (2020). Meteorological drought study through SPI in three drought prone districts of West Bengal, India. *Earth Systems and Environment*, 4(1), 43-55.
- [32] Özfidaner, M., & Topaloğlu, F. (2020). Standart yağış indeksi yöntemi ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde kuraklık analizi. *Toprak Su Dergisi*, 9(2), 130-136.
- [33] Gürler, Ç. (2017) *Beyşehir ve Konya-Çumra-Karapınar Alt Havzalarında Standartlaştırılmış İndis Yaklaşımı ile Hidrolojik Kuraklık Değerlendirmesi*. Uzmanlık Alan Tezi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [34] Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2013). The RDI as a composite climatic index. *Eur Water*, 41, 17-22.
- [35] Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). Instruction and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. *Drexel Institute of Technology Laboratory of Climatology*, 10(3).
- [36] Rusnam, R., & Yanti, N. R. (2021). Potential evapotranspiration uses Thornthwaite method to the water balance in Padang City. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 757(1), 1-6.
- [37] Malik, A., Kumar, A., & Singh, R. P. (2019). Application of heuristic approaches for prediction of hydrological drought using multi-scalar streamflow drought index. *Water Resources Management*, 33(11), 3985-4006.
- [38] Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897.
- [39] Jahangir, M. H., & Yarahmadi, Y. (2020). Hydrological drought analyzing and monitoring by using Streamflow Drought Index (SDI)(case study: Lorestan, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(3), 1-12.
- [40] Adib, A., & Tavancheh, F. (2019). Relationship between hydrologic and metrological droughts using the streamflow drought indices and standardized precipitation indices in the Dez Watershed of Iran. *International Journal of Civil Engineering*, 17(7), 1171-1181.
- [41] Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., & Yuzyk, T. R. (2001). Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37(4), 987-998.
- [42] Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1-4), 254-271.
- [43] Yu, Y. S., Zou, S., & Whittemore, D. (1993). Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. *Journal of Hydrology*, 150(1), 61-80.
- [44] Simsek, O. (2021). Hydrological drought analysis of Mediterranean basins, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(20), 1-17.
- [45] Topcu, E., & Seçkin, N. (2022). Drought assessment using the reconnaissance drought index (RDI): A case study of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan, and Asi basins of Turkey. *Journal of Engineering Research*, 10(2B), 124-141.
- [46] Yuce, M. I., & Esit, M. (2021). Drought monitoring in Ceyhan basin, Turkey. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(4), 293-314.



Araştırma Makalesi – Research Article

Üniversal Freze Tezgâhlarında Düz Dişli Çark İmalatı Destek Yazılımı

Spur Gear Manufacturing Support Software for Universal Milling Machines

Telat Türkyılmaz^{1*}

Geliş / Received: 17/08/2022

Revize / Revised: 21/02/2023

Kabul / Accepted: 07/03/2023

ÖZ

Mühendislik fakülteleri, meslek yüksekokulları veya teknik okullarda makine ve benzeri bölümlerden eğitim alan teknik öğrencilere düz dişli gibi makine parçaları imalat uygulamaları yaptırılmaktadır. Bu uygulamalar öğrencilere üniversal freze ve torna gibi tezgâhları kullanabilme becerisini kazandırmaktadır. Böylece makine tasarımlarında yaygın olarak kullanılan düz dişli hesaplamaları ve montaj sistemleri öğrenilmektedir. Bu çalışmada düz dişli çark hesaplamaları ve yapım resmini hazırlayan bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımla üniversal freze tezgâhlarında modül freze çakısı ile yapılacak dişli çark imalatı için gerekli olan teknik bilgiler, hesaplamalar ve çizimler otomatik olarak yapılarak yapım resmi çıktısı alınabilmektedir. Öğrencilerin teknik bilgi ve hesaplamaları yazılım destekli öğrenmeleri sayesinde uygulama hazırlık zamanı azalmaktadır. Makine alanında geliştirilen bu yazılımın öğrencilere teknik bilgi ve beceri katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler- *Düz Dişli Yazılımı, Divizör, Üniversal Freze Tezgâhları, Visual Basic*

ABSTRACT

Technical students who receive training from engineering faculties, vocational schools, or technical schools from machinery and similar departments are made to manufacture machine parts such as spur gears. These applications provide students with the ability to operate machines such as universal milling and lathes. Thus, spur gear calculations and assembly systems commonly used in machine designs are learned. In this study, a software that prepares spur gear calculations and construction drawing has been developed. With the developed software, the technical information, calculations and drawings required for the gear wheel manufacturing to be made with the module milling cutter on the universal milling machines can be made automatically and the production picture output can be obtained. Thanks to the software-supported learning of the students' technical knowledge and calculations, the application preparation time is reduced. This software developed in the field of machinery is expected to contribute to the technical knowledge and skills of the students.

Keywords- *Spur Gear Software, Dividing Head, Universal Milling Machines, Visual Basic*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: telat.turkyilmaz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3543-1201>)

Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Bilecik, Türkiye

I. GİRİŞ

Makine imalatında yaygın olarak kullanılan düz dişliler farklı yöntemlerle imal edilebilmektedirler. Seri üretimde azdırma freze çakıları ile dişli imalatının tercih edildiği görülmektedir. Bazı durumlarda otomasyon ile imalat mümkün olmamakta bunların yerine üniversal freze tezgâhlarında modül freze çakısı kullanılarak özel imalatlar yapılabilmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özet olarak sunulmaktadır.

Avcıl [1] yüksek lisans çalışmasında, düz ve helis dişli çark hesaplamalarının klasik yöntemle yapılışını gösterdikten sonra Visual Basic ve Excel ortamında bu hesaplamaları hızlı ve otomatik olarak yapan bir yazılım geliştirmiştir.

Ayyıldız ve Fuat çalışmalarında [2], Visual BASIC ve AutoLISP programlama dillerini kullanarak dişli çarkların parametrelerini hesaplayan, 2D çizim ve 3D modellerini Bilgisayar Destekli Tasarım ortamında otomatik olarak yapan bir yazılım geliştirmişlerdir. Çalışmalarında düz dişli çark, helis dişli çark, konik dişli çark, sonsuz vida mili, sonsuz vida karşılık dişlisi ve kramayer dişli çeşitleri kullanılmıştır.

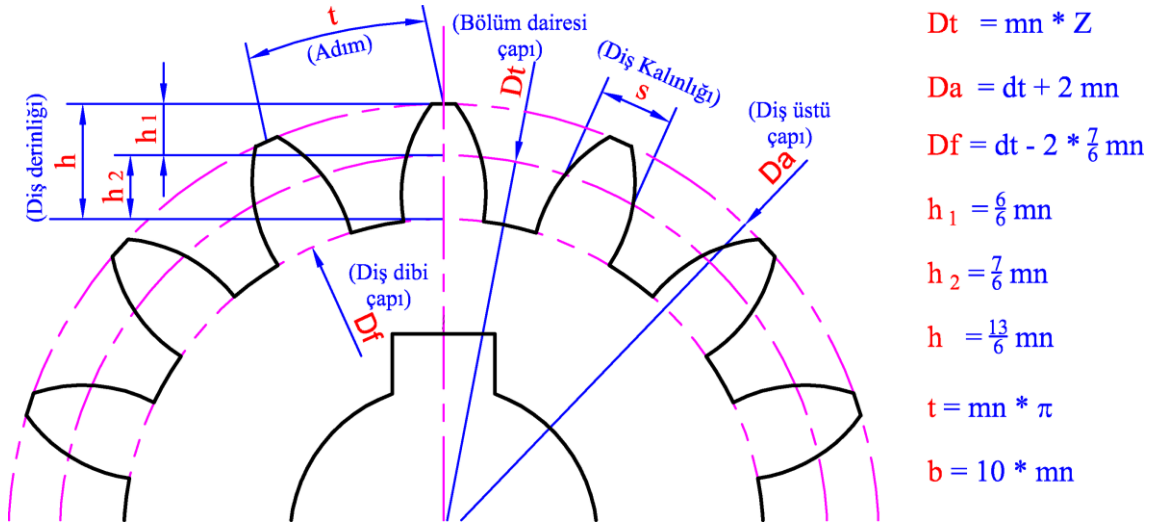
Doğan ve Kamer[4] yaptıkları çalışmalarında, topoloji optimizasyon yöntemleri kullanarak tasarladıkları düz dişli çark modelini eklemeli imalat yöntemi üretmişler ve ağırlık ve dayanım yönünden değerlendirmişlerdir.

Güllü vd. [5] üniversal freze tezgâhlarında yaygın kullanılan dişli sistemli divizörün PLC tabanlı yeni bir modelini yapmışlardır.

Bu çalışmada ise farklı olarak modül ve Z değerleri kullanıcıdan alınarak düz dişli çark imalat parametreleri ve çizimlerini hazırlayan bir program geliştirilmiştir. Program tasarımında Visual Basic .NET kullanılmıştır[7, 12]. Dişli imalatının üniversal freze tezgâhında yapılması öngörülerek mevcut delikli aynalar ile çevirme oranı hesaplama yapılması ve yapım resimleri çıktısı sağlanmıştır.

II. ÜRETİM YAZILIMI GELİŞTİRİLEN DÜZ DİŞLİNİN ELEMANLARI VE HESAPLANMASI

Bu bölümde düz dişli elemanları ile ilgili kısa bilgiler verilmektedir.



Şekil 1. Düz dişli elemanları

Düz dişli elemanları Şekil 1’ de gösterilmektedir. Düz dişli elemanları ve hesaplama formülleri maddeler halinde aşağıda verilmektedir. Bir dişlinin imalatının yapılabilmesi için en az modül (Mn) ve diş sayısı (Z) değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir[6, 8-11].

• Modül

Modül “Mn” ile gösterilir. Birimi mm’ dir. Bölüm dairesi üzerinde iki diş arası yayının(adım) uzunluğunun π sayısına bölünmesi ile elde edilir.

• Diş Sayısı

Diş sayısı “Z” ile gösterilir. Birimi adettir. Dişlide diş dolusu veya diş boşluğu sayısıdır.

• Bölüm Dairesi Çapı

Bölüm Dairesi Çapı “Dt” simgesi ile gösterilir. Birimi mm’ dir. Birlikte çalışan dişliler bu eksen üzerinde temas durumundadırlar. Modül ve diş sayısı çarpımı ile hesaplanır.

$$Dt = Mn * Z \quad (1)$$

• **Diş Üstü Yüksekliği**

Diş üstü yüksekliği “h₁” ile gösterilir. Birimi mm’ dir. Bölüm dairesi ve diş üstü çapı arasındaki uzaklıktır.

$$h_1 = \frac{6}{6} Mn = Mn \quad (2)$$

• **Diş Dibi Yüksekliği**

Diş dibi yüksekliği “h₂” ile gösterilir. Birimi mm’ dir. Bölüm dairesi ve diş dibi arasındaki uzaklıktır.

$$h_2 = \frac{7}{6} Mn = 2,33 * Mn \quad (3)$$

• **Diş Derinliği**

Diş derinliği “Df” ile gösterilir. Birimi mm’ dir. Diş üstü ve diş dibi arasında kalan aralıktır.

$$h_1 = \frac{7}{6} Mn = 2,33 * Mn \quad (4)$$

• **Diş Üstü Çapı**

Diş dibi çapı “Da” simgesi ile gösterilir. Birimi mm’ dir. Dişlinin ham tornalama çapıdır.

$$Da = Dt + 2 h_1 = Dt + 2 \frac{6}{6} Mn = Dt + 2 Mn \quad (5)$$

• **Diş Dibi Çapı**

Diş dibi Çapı “Df” simgesi ile gösterilir. Birimi mm’ dir.

$$Df = Dt - 2 h_2 = Dt - 2 \frac{7}{6} Mn = Dt - 2,33 Mn \quad (6)$$

• **Adım**

Adım “t” simgesi ile gösterilir. Birimi mm’ dir.

$$t = Pi * Mn \quad (7)$$

• **Diş Genişliği**

Diş genişliği “b” simgesi ile gösterilir. Birimi mm’ dir.

$$b = 10 * Mn \quad (8)$$

• **Devir Sayısı Hesaplama**

N dev/dk cinsinden devir sayısıdır. V m/dk cinsinden kesme hızıdır. D mm cinsinden freze çakısı çapıdır.

$$N = \frac{1000 * V}{\pi * D} \quad (9)$$

• **İlerleme Hızı Hesaplama**

F mm/dk cinsinden ilerleme hızıdır. N dev/dk cinsinden devir sayısıdır. Mz modül freze çakısı diş sayısıdır. Fz mm cinsinden öngörülen talaş kalınlığıdır.

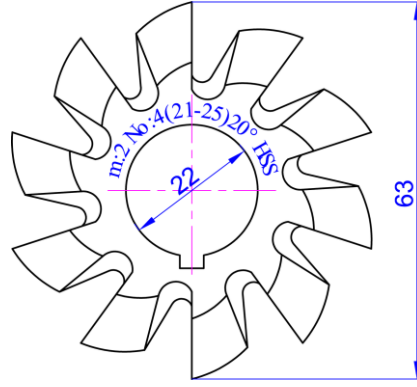
$$F = N * Mz * Fz \quad (10)$$

III. ÜNİVERSAL FREZEDE DİVİZÖR KULLANARAK DÜZ DİŞLİ ÇARKIN AÇILMASI

Üniversal Freze tezgâhlarında düz dişli çark açmak için modül freze çakıları bölüntü aparatı divizörlerle birlikte kullanılmaktadır.

A. Dişli Kanallarının Açılmasında Kullanılan Modül Freze Çakıları

Modül freze çakıları her modül için 1’ den 8’ e kadar numaralı takımlar olarak üretilmektedir. Böylece diş sayısı ile değişim gösteren diş profillerindeki eğri hataları azaltılmaya çalışılmaktadır. Şekil 2’ de modül değeri 2 mm olan 21, 22, 23, 24 ve 25 dişli çarklarının imalatında önerilen 4 numaralı modül freze çakısı görülmektedir.



Şekil 2. Modül çakısı

Üniversal freze tezgâhlarında HSS bir modül freze çakısı ile diş açarken çakının dış çapına uygun devir sayısı ve uygun ilerleme miktarının ayarlanması büyük bir önem arz etmektedir. Şekil 2' de verilen modül freze çakısı çapı 63 mm ve dişli malzemesi Ç1020' dir. Tablo 1' de çelik üreticileri tarafından sunulan malzeme ve işleme cinsine bağlı tavsiye edilen kesme hızları bulunmaktadır. Bu değerler 9 numaralı denklemde yerine konursa,

$$N = \frac{1000 * V}{\pi * D} = \frac{1000 * 25}{\pi * 63} = 126 \text{ dev/dk}$$

Tezgâhın ayarlanması gereken devir sayısı 126 dev/dk veya daha azı bulunmaktadır. HSS seri çelik kesicilerin maksimum çalışma sıcaklıkları 400-600 derece arasında değişmektedir. Isınmanın fazla olduğu durumlarda devir düşürülürken soğutma sıvısı kullanılmaktadır.

İlerleme miktarı hesaplamak için Şekil 2' de verilen modül freze çakısının $Mz=10$ adet dişi bulunduğu görülmektedir. Diş başı güvenli kesme kalınlığını 0,1 mm' dir. Buna göre 10 nolu formülde yerine konursa;

$$F=N * Mz * Fz= 126 * 10 * 0,1 = 126 \text{ mm/dk}$$

Elde edilir. Tezgâhın İlerleme hızı 126 mm/dk veya daha azı olması gerekmektedir.

Tablo 2' de 21 den 25' e kadar diş sayıları için 4 numaralı freze çakısının seçilmesi gerektiği gösterilmektedir. 135 diş sayısına kadar modül freze çakılarında çakı no dikkate alınarak tercih yapılmaktadır. Diş sayısı 135' den büyük dişlilerde ise 8 numaralı çakı kullanılmaktadır.

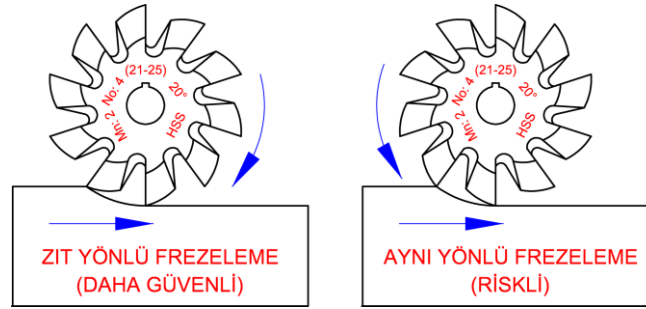
Tablo 1. Kesme hızları tablosu

Malzeme cinsi	HSS-Çelik kalemler		Sert metal kalemler	
	Kaba talaş m/dk	İnce talaş m/dk	Kaba talaş m/dk	İnce talaş m/dk
Ç1020-Ç1030	15-25	60-75	50-100	200-300
Ç1040-Ç1050	12-20	50-70	40-00	160-250
Ç1060-Ç1070	10-10	25-40	35-60	120-240
Çelik dökümler	10-10	25-40	35-60	120-240
Dökme demirler	10-20	30-45	45-70	90-150
Bronz ve kızıl döküm	45-60	00-130	200-300	350-400
Alüminyum ve alaşımları	80 -120	100 -150	150 -300	250 - 400

Çakı numarasına dikkat edilmeden yapılan dişlerde oluşan eğri hataları hatalı imalat yapılmasına neden olmaktadır. Bu yüzden dişliler düzgün çalışmamakta sürtünme ve gürültü gibi problemler ortaya çıkmaktadır. İmalat öncesinde freze tezgâhında daha önceden bağlı modül freze çakısı olması durumunda yeni diş sayısına uygun numara ve modüllü çakı olup olmadığı kontrol edilmekte gerekiyorsa değiştirilmektedir. Kesinlikle tüm dişliler aynı modül çakısı ile yapılmamaktadır.

Tablo 2. Modül Freze Çakı Numaraları

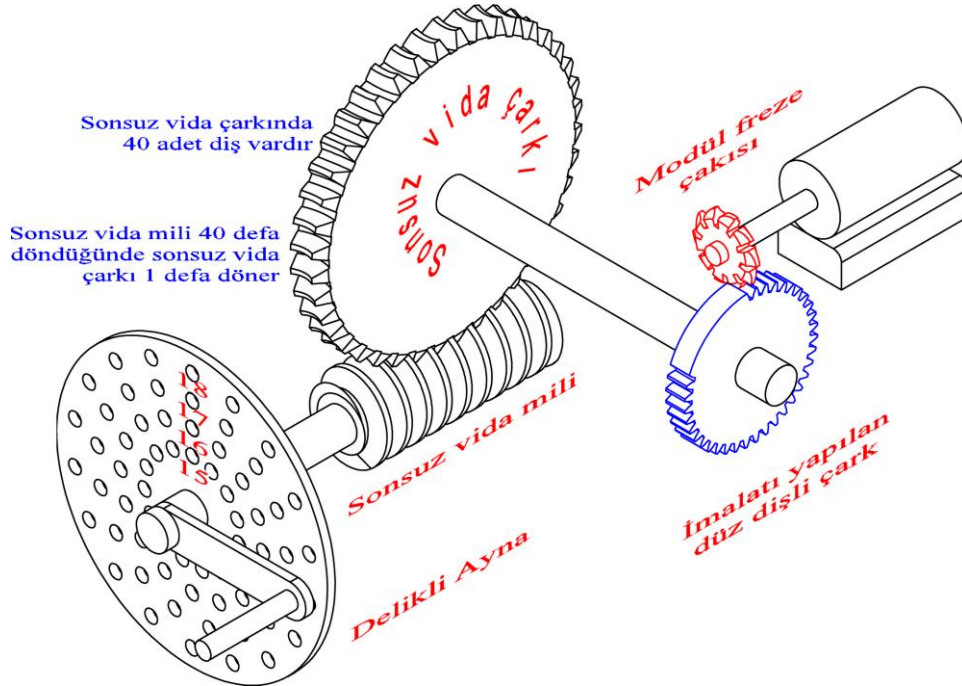
ZMin	Modül Freze Çakı No	ZMax
12	1	13
14	2	16
17	3	20
21	4	25
26	5	34
35	6	54
55	7	134
135	8	Kremayer



Şekil 3. Frezeleme yönleri

Aynı yönlü frezelemede ilerleme fazla verildiğinde sert yüzeylerde çakı işe dalamadığından iş ve kesici zarar görebilir. Bu yüzden zıt yönlü frezeleme yöntemi tavsiye edilmektedir. Frezeleme yönleri Şekil 3' te gösterilmektedir.

B. Bölme İşlemlerinde Divizör Kullanılması



Şekil 4. Divizör İç Yapısı

Farklı diş sayılı çarkları üretmek için freze tezgâhlarında diş sayısında bölme işlemi yapılması gerekmektedir. Bölme işlemlerinde divizör adlı bölme aygıtı kullanılmaktadır. Şekil 4' te divizör aygıtının iç yapısı görülmektedir. Aygıt içinde sonsuz vida mili ve sonsuz vida çarkı vardır. Sonsuz vida çarkının diş sayısı 40 adet olduğundan sonsuz vida mili 40 defa döndürüldüğünde çark sadece 1 tam tur yapar.

40 sayısının tam bölenlerisıraıyla2, 4, 5, 8, 10, 20 ve 40 olmaktadır. Bunun anlamı tur sayısı ile sadece bu sayılarda dişli çarklar veya bölüntüler yapılabilir. Örneğin 10 dişlisi için $40\text{tur}/10=4\text{tur}$ veya 20 dişlisi için $40\text{tur}/20=2\text{ tur çevirme}$ ile kanal açma işlemi yapılması gerekmektedir.

Bu kadar diş sayısı yeterli olmamaktadır. $Z=12'$ den $Z=135'$ e bölme işlemleri söz konusu olabilmektedir.

$$\text{Çevirme Miktarı} = \frac{40 \text{ tur}(\text{tam devir})}{\text{Diş sayısı}} \quad (11)$$

Denklem (11)' de verilen formülün geliştirilmesi gerekmektedir. $1/15, 1/25, 1/30, 1/55$ gibi daha küçük bölme işlemlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Çözüm olarak delikli ayna kullanımı ile daha küçük bölme işlemleri mümkün olmaktadır.

$$\text{Çevirme Miktarı} = \frac{40 \text{ tur}(\text{tam devir}) * \text{Delikli ayna aralık sayısı}}{\text{Diş sayısı}} \quad (12)$$

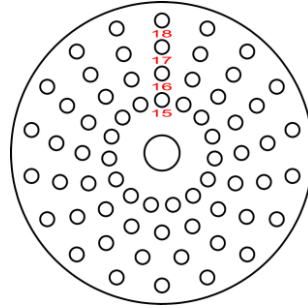
Şekil 5'te 15, 16, 17 ve 18 aralıklı bölmeleri içeren delikli ayna gösterilmektedir. Delikli aynalar kullanılması sayesinde sonsuz vida mili tam tur çevrilme dışında aktif delikli ayna aralık sayıları oranında daha hassas çevrilme oranlarına sahip olmaktadır. Örneğin 15 aralık ayna tam bölenleri 3, 5 ve 15 olmaktadır. 40 sayısında olmayan bölenler 3 ve 15'tir. Dişli çark Z diş sayısı 40 ve 15 sayılarının tam bölenleri ile kalansız bölündüğünde bu dişli çark imal edilebilmektedir.

Örnek uygulama: $Z=30$ dişlisini yapmak için çevirme oranını hesaplayınız.

Çözüm:

$N(\text{Çevirme Oranı}) = \frac{K(40 \text{ tur})}{Z} = \frac{40}{30} = 1,333$ olduğundan ondalıklı sayı ile bölme yapılamaz. Bu yüzden delikli ayna kullanılması gerekmektedir. Başka bir ifadeyle Z ile bölümden tur cinsinden tamsayı elde edilememektedir. Sisteme delikli ayna ekleyerek 1 turu temsil eden payı aralık sayısı birimine dönüştürmek için delikli ayna kullanılmaktadır. 15 aralıklı ayna takıldığında yeni formül;

$N(\text{Çevirme Oranı}) = \frac{K(40 \text{ tur}) * 15 (\text{aralık})}{Z} = \frac{40 * 15}{30} = \frac{600 \text{ aralık}}{30} = 20$ aralık olacaktır. Böylece 15 aralıklı aynada 20 aralık atlatıldığında $Z=30$ dişlisi yapılabilir. Başka bir ifadeyle 15 aralıklı aynada 1 tam tur ve 5 aralık atlatılmaktadır. Şekil 5'te 15, 16, 17, 18 aralıklı bölüntülerine sahip delikli ayna görülmektedir.



Şekil 5. 15, 16, 17 ve 18 aralıklı delikli ayna

Kısa çözümde, formül sadeleştirildikten sonra payda değerini delikli aynalardan birine yükselten çarpan ile kesir pay ve paydası çarpılır.

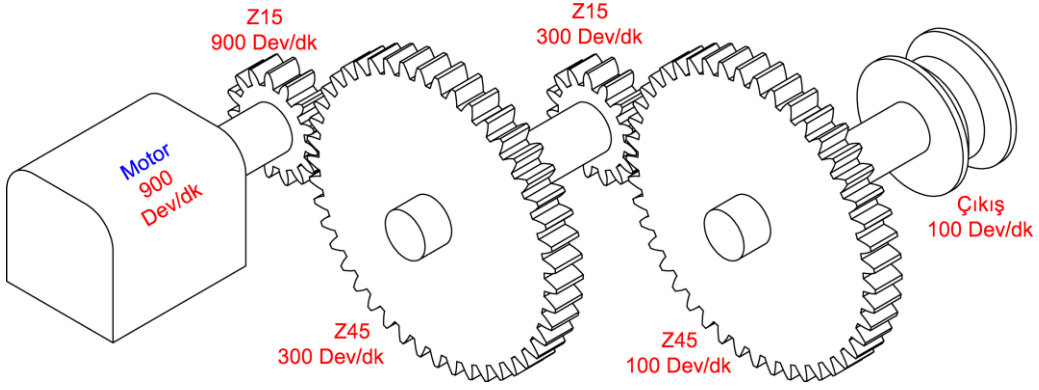
$$N = \frac{K}{Z} = \frac{40}{30} = \frac{4}{3} = \frac{4*5}{3*5} = \frac{20}{15} \quad (15 \text{ aralıklı aynada 1 tam tur ve 5 aralık atlatılacaktır.})$$

Birden fazla çözüm olabilmektedir. Divizör üzerinde takılı olan ayna aralık sayısı çözümlerde varsa değişim yapılmasına gerek kalmamaktadır.

IV. DÜZ DİŞLİ ÇARKLARLA UYGULAMALAR

Taşıma tezgâhlarında çok yüksek devirler gerekmektedir. Torna veya freze tezgâhlarında büyük çaplı iş parçaları veya takımlar ile çalışırken düşük devirler gerekmektedir. Motor devir sayıları çeşitli dişli sistemleri tasarımları ile düzenlenebilmektedir. Düz dişlilerle devir sayısı düşürme Şekil 6' da ve düz dişlilerle devir sayısı artırma Şekil 7' de verilmektedir.

A. Devir Sayısı Düşürme



Şekil 6. Düz dişlilerle devir sayısı düşürme

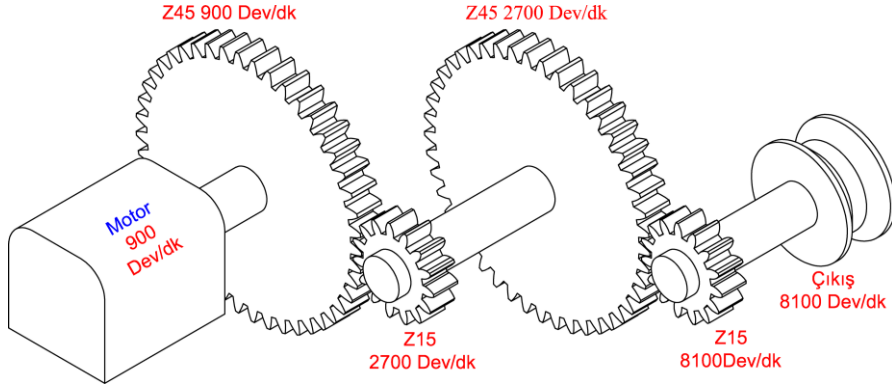
Devir hesaplama formülü denklem 12' de verilmektedir.

$$\frac{N1}{N2} = \frac{Z2}{Z1} \quad (12)$$

$$\frac{N1}{N2} = \frac{Z2}{Z1} \Rightarrow \frac{900}{N2} = \frac{45}{15} \Rightarrow N2 = \frac{900 * 15}{45} = 300 \text{ dev/dk}$$

$$\frac{N1}{N2} = \frac{Z2}{Z1} \Rightarrow \frac{300}{N2} = \frac{45}{15} \Rightarrow N2 = \frac{300 * 15}{45} = 100 \text{ dev/dk}$$

B. Devir Sayısı Arttırma



Şekil 7. Düz dişlilerle devir sayısı arttırma

$$\frac{N1}{N2} = \frac{Z2}{Z1} \Rightarrow \frac{900}{N2} = \frac{15}{45} \Rightarrow N2 = \frac{900 * 45}{15} = 2700 \text{ dev/dk}$$

$$\frac{N1}{N2} = \frac{Z2}{Z1} \Rightarrow \frac{2700}{N2} = \frac{15}{45} \Rightarrow N2 = \frac{2700 * 15}{45} = 8100 \text{ dev/dk}$$

V. GELİŞTİRİLEN PROGRAMIN TANITILMASI

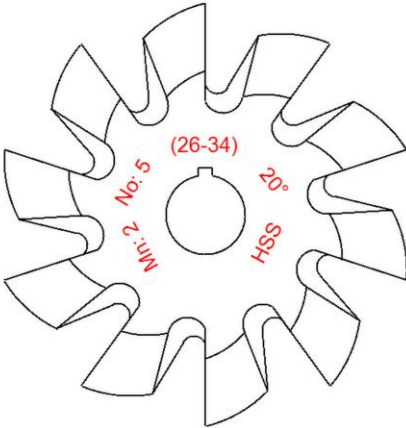
Bu bölümde geliştirilen yeni program ekranları hakkında bilgi verilmektedir.

A. Modül Çakıları Bilgi Sayfası

DÜZ DIŞI HESAPLAMA SİSTEMİ-(17/08/2022)

MODÜL ÇAKI NO DELİKLİ AYNALAR ÇİZİM HESAPLAMA YAZDIR BİLGİ SAYFALARI HAKKINDA

ZMin	ÇAKI NO	ZMax
12	1	13
14	2	16
17	3	20
21	4	25
26	5	34
35	6	54
55	7	134
135	8	Kremayer



Şekil 8. Program modül çakısı bilgi sayfası

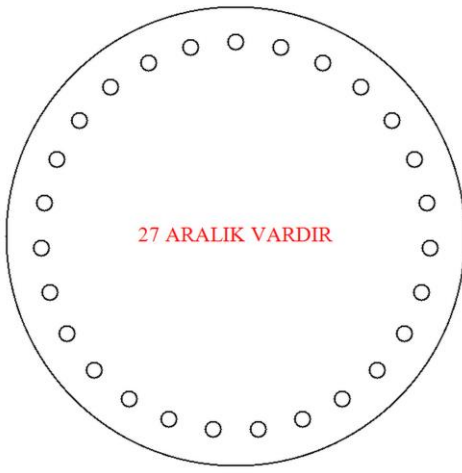
Şekil 8’ de program modül çakısı sayfasında 8’li takım olan çakıların numarasının dış sayısına bağlı olduğu yapılan seçimle gösterilmektedir.

B. Delikli Aynalar Bilgi Sayfası

DÜZ DIŞI HESAPLAMA SİSTEMİ-(17/08/2022)

MODÜL ÇAKI NO DELİKLİ AYNALAR ÇİZİM HESAPLAMA YAZDIR BİLGİ SAYFALARI HAKKINDA

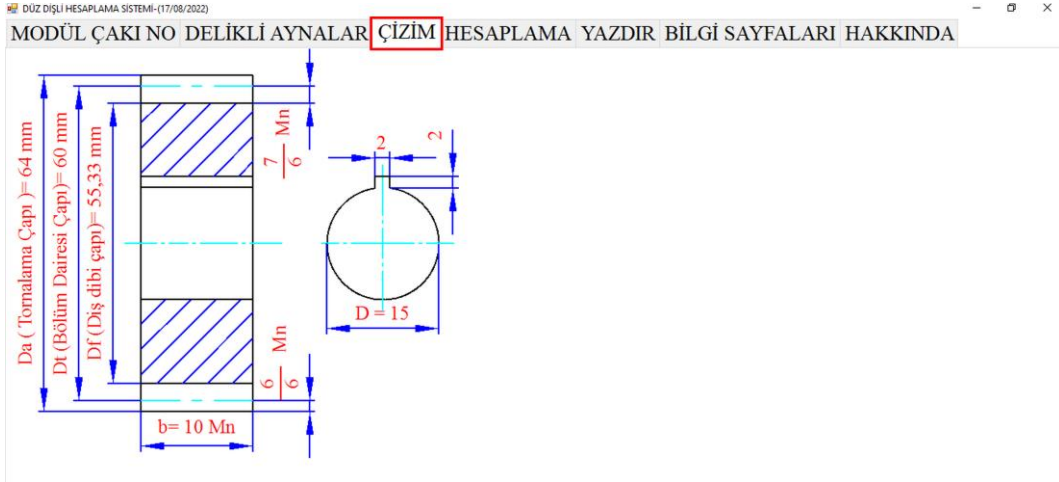
DELİKLİ AYNALAR
15
16
17
18
19
20
21
23
27
29
31
33
37
39
41
43
47
49



Şekil 9. Program Delikli aynalar bilgi sayfası

Şekil 9’ da delikle aynalarda çevirme oranları yapısı yapılan seçimle gösterilmektedir.

C. Çizim Sayfası



Şekil 10. Program çizim sayfası

Şekil 10' da programın çizim ekranında yapılan hesaplamalar çizim üzerinde gösterilmektedir.

D. Hesaplama Sayfası

Delikli Aynalar: 15,16,17,18,19,20,21,23,27,29,31,33,37,39,41,43,47,49
No=>1=12-13 2=14-16 3=17-20 4=21-25 5=26-34 6=35-54 7=55-134 8=135-kram.

Mn Z

Parameter	Formula	Value	Unit
Dt(mm)	Mn * Z	2*30	60
Da(mm)	Mn*Z+2*Mn	2*30+2*2	64
Df(mm)	Mn*Z - 2*(7/6*Mn)	2*30-2*(7/6*2)	55,333
h(mm)	13/6*Mn	13/6*2	4,333
t(mm)	Pi * Mn	3,142*2	6,283
b(mm)	10 * Mn	10*2	20
N	K/Z	40/30	4/3

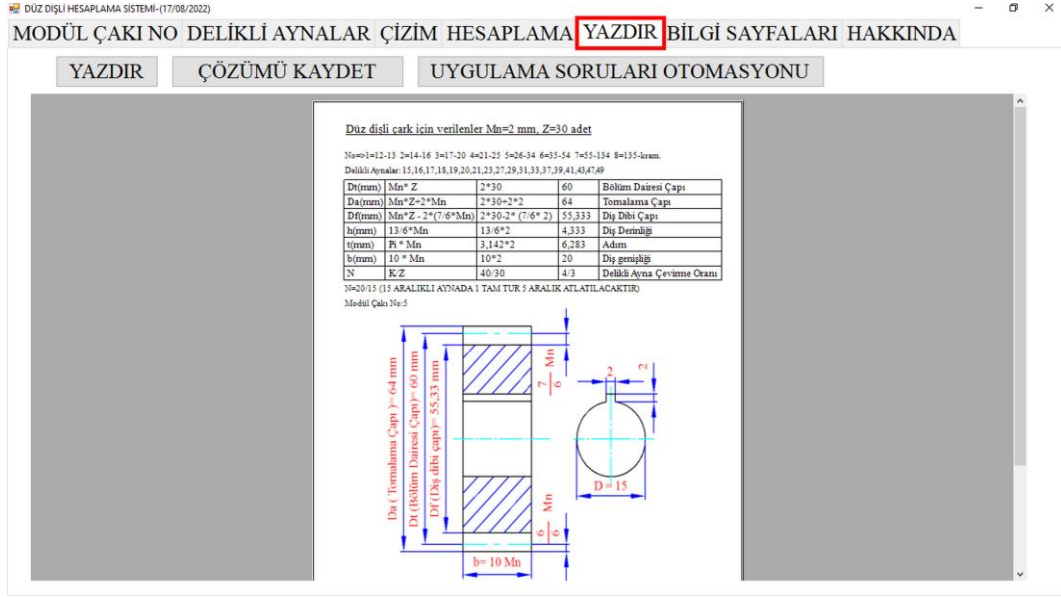
Modül Çakı No:5

- N=20/15 (15 ARALIKLI AYNADA 1 TAM TUR 5 ARALIK ATLATILACAKTIR)
- N=20/15 (15 ARALIKLI AYNADA 1 TAM TUR 5 ARALIK ATLATILACAKTIR)
- N=24/18 (18 ARALIKLI AYNADA 1 TAM TUR 6 ARALIK ATLATILACAKTIR)
- N=28/21 (21 ARALIKLI AYNADA 1 TAM TUR 7 ARALIK ATLATILACAKTIR)
- N=36/27 (27 ARALIKLI AYNADA 1 TAM TUR 9 ARALIK ATLATILACAKTIR)
- N=44/33 (33 ARALIKLI AYNADA 1 TAM TUR 11 ARALIK ATLATILACAKTIR)
- N=52/39 (39 ARALIKLI AYNADA 1 TAM TUR 13 ARALIK ATLATILACAKTIR)

Şekil 11. Program hesaplama ekranı

Şekil 11' de program hesaplama ekranında Mn ve Z bilgileri kullanıcıdan alınarak tüm hesaplama ve çizimler otomatik olarak yapılmaktadır.

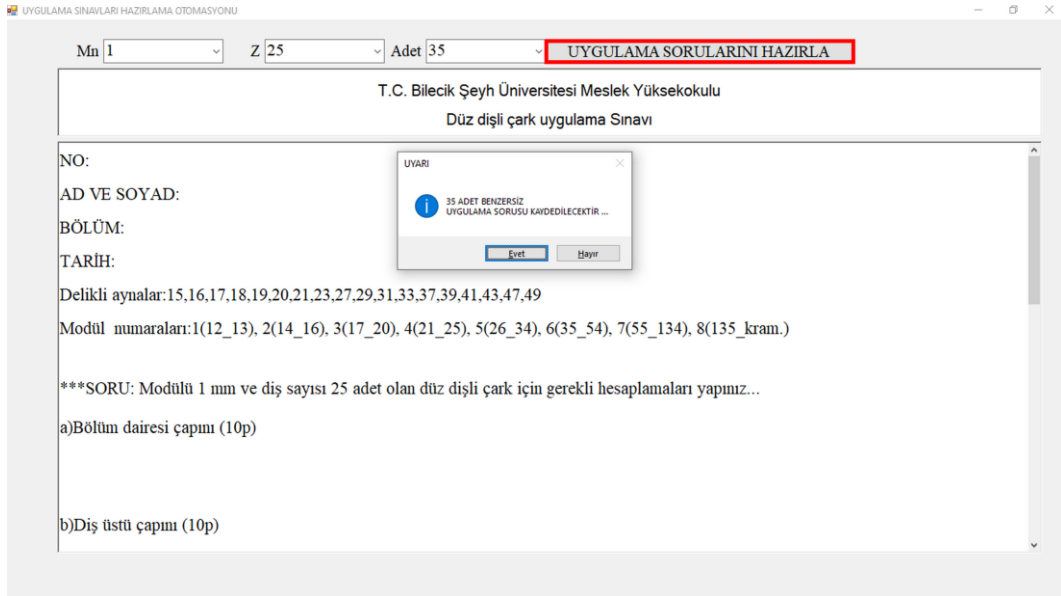
E. Yazdırma Sayfası



Şekil 12. Program çıktı ekranı

Şekil 12’ de program çıktı ekranında yapılan hesaplamaların çıktısı alınabilmekte ve Word formatında kaydedilebilmektedir.

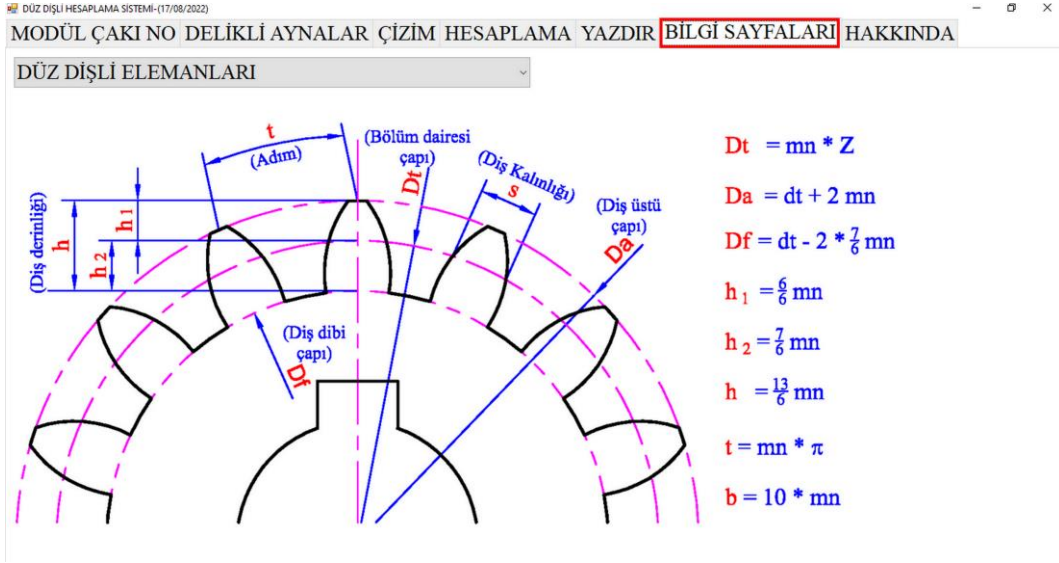
F. Uygulama Soruları Otomasyonu



Şekil 13. Program uygulama soruları hazırlama sayfası

Şekil 13’ de program uygulama soruları hazırlama sayfasında istenen sayıda benzersiz sorular hazırlanmakta ve çıktısı alınabilmektedir.

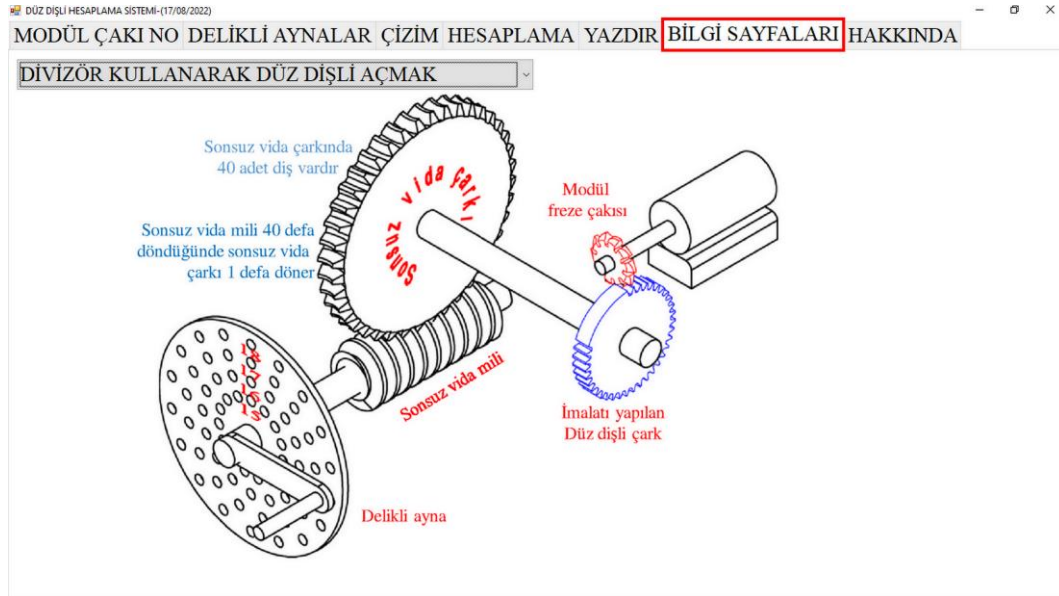
G. Düz Dişli Elemanları Bilgi Sayfası



Şekil 14. Düz dişli çark elemanları

Şekil 14' de programın bu sayfasında düz dişli çark elemanları ve formülleri gösterilmektedir.

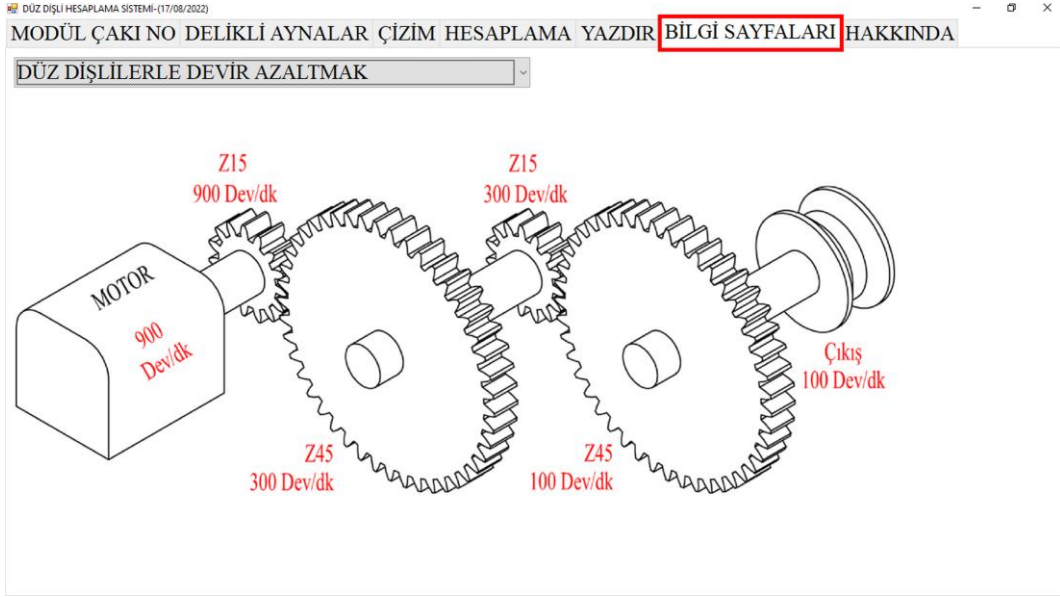
H. Divizör Bilgi Sayfası



Şekil 15. Divizör yapısı ve delikli ayna kullanımı

Şekil 15' de programın divizör bilgi sayfasında delikli ayna kullanımı, divizör iç yapısı ve dişli çark imalatı gösterilmektedir.

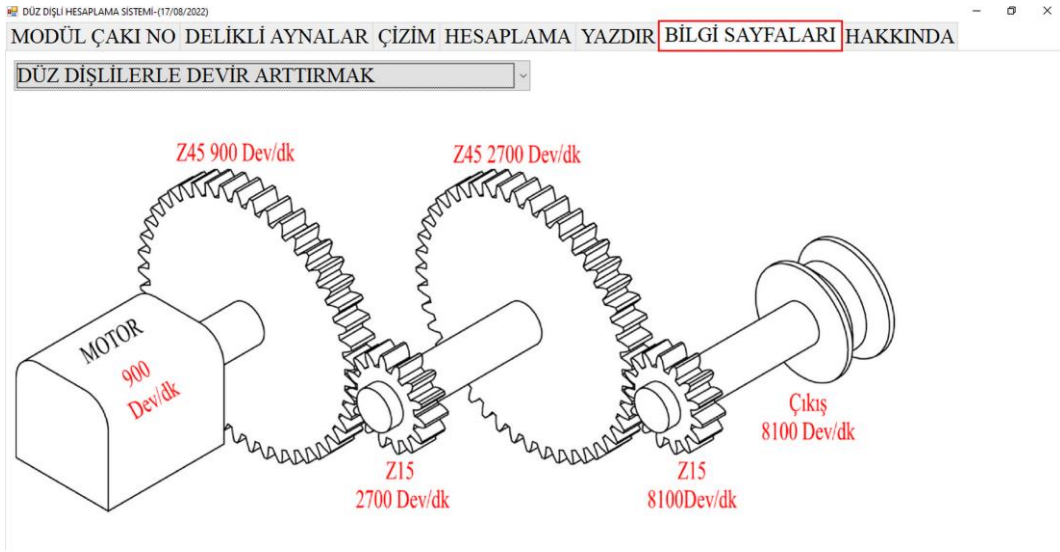
İ. Devir Azaltma Bilgi Sayfası



Şekil 16. Düz dişlilerle devir azaltma

Şekil 16' da programın devir azaltma sayfasında motor devrini düz dişlilerle azaltılması gösterilmektedir.

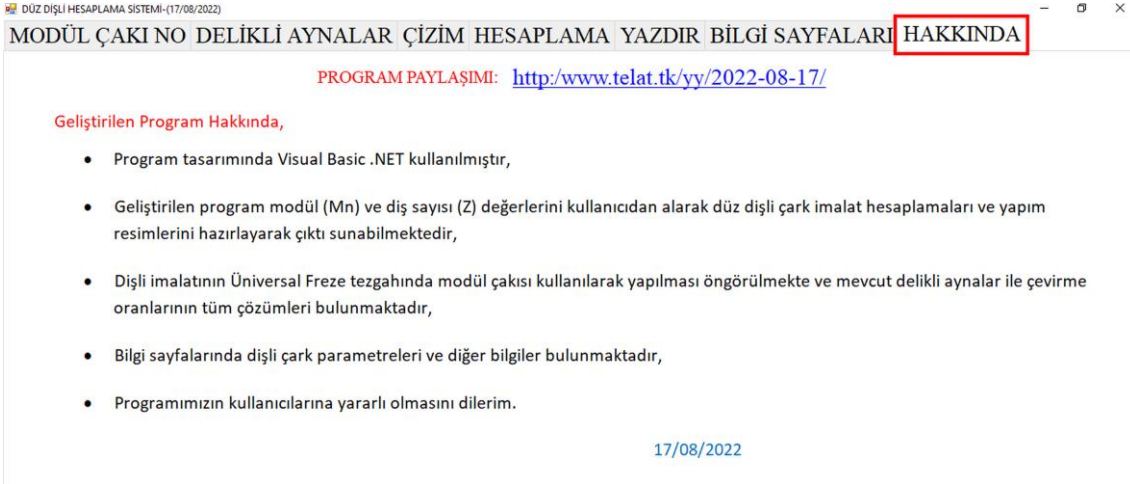
J. Devir Arttırma Bilgi Sayfası



Şekil 17. Düz dişlilerle devir arttırma

Şekil 17' de programın devir arttırma sayfasında motor devrini düz dişlilerle arttırılması gösterilmektedir.

K. Hakkında Sayfası



Şekil 18. Program hakkında sayfası

Şekil 18’ de programın hakkında sayfasında geliştirilen yazılımın tanıtımı yapılarak paylaşım bilgileri sunulmaktadır.

VI. SONUÇLAR

Teknik eğitimde uygulamalı yapılan talaşlı imalat dersinin derslerinde her detayı öğrenciye aktarmak mümkün olmamaktadır. Özellikle freze tezgâhlarında delikli aynanın öneminin aktarılması ve uygun freze çakısının kullanımı konusu da bunlardan birisidir. Bu amaçla yapılan çalışmada makine atölyelerinde torna ve freze tezgâhlarını kullanarak yapılan düz dişli çark üretimleri ve eğitimlerine destek olması amacıyla bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım gerekli hesaplamaları ve yapım resimlerini otomatik olarak hazırlayarak çıktı sunabilmektedir. Böylece uygulama öncesi kaybedilen hazırlık zamanları azaltılarak daha fazla üretim veya uygulama eğitimleri yapılması mümkün olmaktadır. Yazılım eğitim ve değerlendirme işlemlerinde kullanılmak amacıyla benzersiz uygulama soruları da üretebilmektedir. Ayrıca yazılımda bilgilerin görsel olarak sunulması ile öğrenmenin kalıcı olması sağlanmaktadır. Yazılım “hakkında” sayfasında verilen “<http://www.telat.tk/yy/2022-08-17/>”internet adresinden kullanıma sunulmaktadır. Bu çalışma ile uygulayıcıların konuyu daha iyi anlaması sağlanmakla birlikte yanlış gereçler kullanılarak yapılan malzeme, emek ve zaman kayıplarının da önüne geçilmesi mümkün olacaktır. Sonuç olarak geliştirilen yeni yazılımın makine alanında yapılan makine tasarımlarına, üretimlere teknik elemanlara ve öğrencilere katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Avcıl, Ö. A. (2006). *Dişli Çarkların Standartlara Göre Hesaplanması ve Bilgisayar Destekli Tasarımla Kontrolü*. (Y. Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- [2] Ayyıldız, M., Çiçek, A., & Fuat, K. (2010). Bilgisayar Destekli Tasarımda Parametrik Dişli Çark Uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3), 643-651.
- [3] Çiçek, A. (2008). Dişlilerin Uzman Sistem Tabanlı Tanımlanması ve Detaylı Boyutlarının Çıkarılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3),709-717.
- [4] Doğan, O., & Kamer, M. S. (2021). Eklemeli İmalat Yöntemi ile Optimum Düz Dişli Çark Tasarımı ve Üretimi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 1093-1103.
- [5] Güllü, A., Kaya, S., & Pınar, M. (2009). Freze Tezgâhı için Geliştirilen PLC Tabanlı Divizör. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 311-316.
- [6] İpekçioğlu, N. (1984). Frezecilik. Milli Eğitim Basımevi, Ankara, 546.
- [7] Kaymaz, A. (2011). VB.NET (Visual Basic) Programlama Dili. Papatya Yayıncılık, İstanbul, 408.
- [8] MEGEP. (2011). Düz ve Kremayer Dişli Açma. MEB, Ankara, 30.
- [9] Özcan, Ş. & Bulut, H. (1991). Atelye ve Teknoloji II. Yayınlar ve Basılı Malzemeler Genel Müdürlüğü, Ankara, 120.
- [10] Radzevich, S. P. (2012). Practical Gear Design and Manufacture. CRC Press. London, New York, 878.
- [11] Şahin, N. (2008). Talaşlı Üretim II. Kozan Ofset. Ankara, 208.
- [12] Türkeli, Y.(2011). Visual Basic.NET Eğitmenim. Nirvana Yayınları, Ankara, 433.



Araştırma Makalesi–Research Article

Manisa İçin Farklı Tipteki Trombe Duvarlarının Enerji, Ekonomi ve Çevresel Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması

Comparison of Energy, Economy, and Environmental Analysis Results of Different Types of Trombe Walls for Manisa

Erdem Ersayın^{1*}

Geliş / Received: 31/08/2022

Revize / Revised: 31/01/2023

Kabul / Accepted: 31/01/2023

ÖZ

Dünya genelinde artan enerji talebi ve bu talebin fosil kaynaklı yakıtlardan karşılanması küresel ısınma gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu sonuçların etkisini azaltmak için yenilenebilir kaynakların kullanımı önem kazanmaktadır. Binaların ısıtılması da enerjiye bağımlılığı fazla olan bir alandır, bu alanda güneş enerjisinden yararlanmak güneşlenme süresi fazla olan konumlar için avantajlıdır. Manisa da güneşlenme süresi bakımından avantajlıdır. Güneş ile ısıtma uygulamalarından bir tanesi Trombe duvarıdır. Bu çalışma kapsamında klasik bir Trombe duvarı (Tip-1) ve farklı yapıda bir Trombe duvarı (Tip-2) tasarımı yapılmıştır ve bu iki tip duvarın enerji, ekonomik ve çevresel analizleri karşılaştırılmıştır. Analizlerde Trombe duvarları için önemli birer parametre olan hava boşluğu genişliği ve toplam güneş ışınım miktarı değişimi ele alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Ocak ayı için ideal çalışma parametrelerinde (500 W/m² toplam güneş ışınım miktarı ve 0,35 m hava boşluğu genişliği için) Tip-1 ve Tip-2 duvarlar için enerji verimliliği sırasıyla 0,37 ve 0,46 olarak bulunmuştur. Yine bu parametrelerde iç ortam sıcaklığının saat 15.00'te Tip-1 ve Tip-2 duvarlar için 19,6 °C ve 21,8 °C'lik maksimum değerlere çıktığı hesaplanmıştır. Ekonomik analize göre Tip-1 ve Tip-2 duvarların geri ödeme süreleri sırasıyla 7,3 ve 6,9 yıl olarak bulunmuştur. Tip-1 ve Tip-2 duvarların kullanımı aynı zamanda karbon salımında da toplamda sırasıyla 5985,5 kg ve 6405 kg azalma sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler- Trombe Duvarı, Pasif Isıtma, Güneş Enerjisi, Güneş Işınımı Yoğunluğu

ABSTRACT

Increasing energy demand around the world and meeting this demand from fossil fuels cause negative consequences such as global warming. For reducing the impact of these results, the use of renewable resources is gaining importance. Heating of buildings is a high energy dependent process, thus benefiting from solar energy is advantageous for locations with a long hours of sunshine. Manisa is also advantageous in terms of sunshine duration. One of the solar heating applications is the Trombe wall. In this study, a classical Trombe wall (Type-1) and a different type of Trombe wall (Type-2) were designed and these two types of walls were compared in terms of energy, economic and environmental aspects. During analyzes, the air channel depth and the variation of solar radiation intensity, which are important parameters for Trombe walls, are discussed. As a result of the calculations, the energy efficiency for Type-1 and Type-2 walls was found to be 0,37 and 0,46, respectively, at the optimized operating parameters for January (for 500 W/m² solar radiation intensity and 0,35 m air duct depth). Again with these parameters, it has been calculated that the indoor temperature rises to the maximum values of 19,6 °C and

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: erdem.ersayin@cbu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7900-0916>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Manisa, Türkiye

21,8 °C for Type-1 and Type-2 walls at 15.00. Economic analysis indicated that payback period of the Type-1 and Type-2 walls are 7,3 and 6,9 years, respectively. It has been calculated that the use of Type-1 and Type-2 walls provides a reduction of 5985,5 kg and 6405 kg in total carbon emissions, respectively

Keywords- Trombe Wall, Passive Heating, Solar Energy, Solar Radiation Intensity

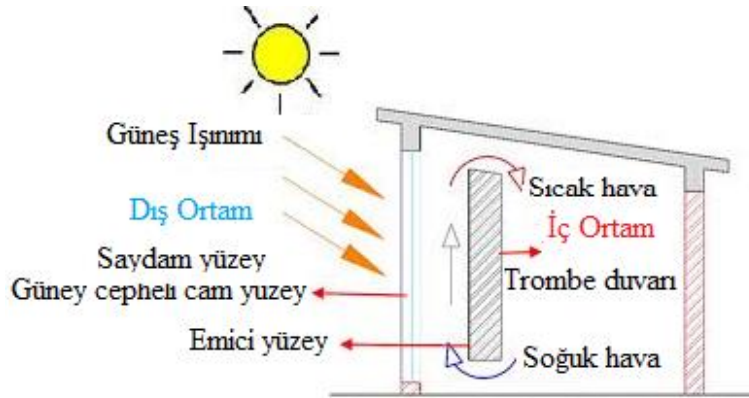
I. GİRİŞ

2040 yılına kadar dünya genelindeki enerji ihtiyacının 2015 yılındaki enerji ihtiyacına göre % 37 oranında fazla olacağı araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur [1]. Bunun yanı sıra dünyadaki ortalama sıcaklığın 2030 yılına kadar 1.5°C artacağı ve bunun da beraberinde iklim kaynaklı birçok sorunu getireceği bilinmektedir [2]. Tüm bu sebeplerden dolayı enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak bahsedilen iklim sorunlarını azaltmak için önemli bir adım olacağı gibi aynı zamanda fosil yakıt kaynaklarının kullanımından doğan sera gazı salımlarını azaltma konusunda da yardımcı olacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan güneş, günümüzde birçok gelişmiş ülkenin enerji politikasında kendine önemli bir yer bulmaktadır. Güneş enerjisinin güneş gibi tükenmeyen bir kaynağa sahip olması, birçok coğrafi bölgede yüksek seviyede güneşlenme süresinin olması, güneşten yararlanma teknolojilerinin gittikçe olgunlaşması ve de üretim sonucunda herhangi bir sera gazı salımı olmaması gibi avantajları mevcuttur [3].

Güneşten yararlanarak elektrik veya ısı enerji elde etmek için geliştirilen teknikler aktif veya pasif sistemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Aktif sistemler genel anlamda güneş enerjisi kaynaklı çalışan güç üretim sistemleridir ve bu sistemler geniş alana yayılan güneş toplayıcılarını, enerji depolama ünitelerini, yardımcı çalışma akışkanlarını, pompaları, fanları içerisinde barındırmaktadır [4]. Pasif sistemler ise doğal veya zorlanmış taşınım vasıtasıyla güneş enerjisinden yararlanıp mahal ısıtma-soğutmasını ve su ısıtmasını yapmayı hedefleyen sistemlerdir. Pasif sistemler, aktif sistemlere göre kurulum ve işletme maliyeti olarak oldukça avantajlıdır ancak kullanım amaçlarının da farklı olduğu göz ardı edilmemelidir.

Trombe duvarı diğer pasif sistemler arasında en sık uygulama alanı bulan sistemdir [5]. Trombe duvarı imalatı ile ilgili ilk çalışmalar 19.yüzyılın sonlarına dayanmaktadır, Edward Morse isimli bilim insanı 1881 yılında Trombe duvarı çalışma mantığına benzer bir sistemi tasarlamıştır [6]. Daha sonra 1940 ve 1946 yıllarında Fred Keck ve Arthur Brown isimli bilim insanları bu sistemi farklı eklentilerle geliştirmişlerdir. Son olarak da 1967 yılında Felix Trombe ve Jacques Michel günümüzde Trombe duvarı olarak adlandırılan sistemin patentini almışlar ve bina içerisindeki uygulamasını gerçekleştirmişlerdir [7].

Şekil 1’de standart bir Trombe duvarı gösterilmiştir. Trombe duvarı, binaların güney cephesine bakacak şekilde inşa edilen, ışıma etkisinden maksimum oranda yararlanmak için koyu renk boyanan ve de masif bir duvar ile genellikle camdan yapılan saydam bir yüzey arasında hava boşluğu barındıran bir yapı olarak tanımlanabilir.



Şekil 1. Standart bir Trombe duvarı

Trombe duvarı inşası için tuğla, farklı tiplerde taşlar, güçlendirilmiş beton gibi yapı elemanları kullanılabilir. Duvar ile cam yüzey arasında ise havanın yanı sıra farklı tipte akışkanlar da kullanılabilir [8]. Güneş ışınımının masif duvar yüzeyini ısıtması Trombe duvarının temel çalışma prensibini oluşturur. Sıcaklığı artan masif duvar, mahal içerisindeki havayı ışınım ve de taşınım ısı transferi mekanizmalarıyla ısıtırken, duvar yüzeyinin alt ve üst kısımlarında bulunan havalandırma kanalları gerekli hava dolaşımının gerçekleşmesini sağlar [9].

Trombe duvarı kullanımı esnasında elde edilen ısı verime etkiyen farklı parametreler vardır. Bu parametreler kullanılan cam sayısı, hava boşluğu, masif duvar, ısı yalıtım, havalandırma kanalları ve masif

duvardaki pencere kullanımı olarak sınıflandırılabilir [2]. Ilıman iklim şeklinde kış koşullarına sahip yerlerde tek cam ve tuğladan yapılmış masif duvar gerekli performansı vermektedir. Kışları soğuk geçen yerlerde ise çift cam ve masif duvar kullanımı daha iyi sonuç vermektedir, çünkü bu tarz bir sistemin ısı direnci yüksek olmaktadır [10]. Helenice ve ark., çeşitli cam malzemelerinin etkisini incelemiştir ve diament tipi malzemenin daha iyi ısı performans gösterdiğini belirlemiştir [11]. Stazi ve ark., çalışmalarında tek ve çift cam kullanımının karşılaştırmasını yapmışlardır ve çift cam kullanımının ısı performansının daha yüksek olduğunu belirlemiştir [12,13]. Zalewski ve ark., tek, çift ve düşük yayımlı çift camlı sistemleri inceledikleri araştırmalarında düşük yayımlı sistemlerin daha çok enerji depolayabildiğini ortaya koymuşlardır [14]. Blotny ve ark., ise üç camlı ve camlar arasında argon bulunan bir Trombe duvarının Polonya'nın Wroclaw kentindeki uygulamasını analiz etmişler ve bu tip bir tasarım ile oda sıcaklığında 1.52 °C artış gözlemlemiştir [15]. Hava boşluğunun kalınlığı Trombe duvarındaki taşınım ısı transferi mekanizmasını etkilediği için çok önemli bir parametredir. Hava boşluğu kalınlığının hem masif duvar hem de iç ortam hava sıcaklığı üzerinde etkisi vardır. Yapılan çalışmalara göre soğuk iklim koşulları için 29 ile 35 cm değerindeki hava kalınlığı tercih edilmelidir [16]. Literatürde ayrıca bu hava boşluğundaki ısı kaybını azaltmak için ısı perde kullanımı, hava boşluğunun iç dolaşıma sokulması gibi iyileştirme önerileri de sunulmuştur [2]. Masif duvar, güneş enerjisinden gelen ışınım enerjisini ısı enerji olarak depolayan eleman olduğu için bu kısımda kullanılan malzeme seçimi ve duvar kalınlığı depolanan enerjinin miktarı için önemlidir. Masif duvarın temel olarak yeterli ısı kütleyle sahip olması istenmektedir. Masif duvarın kalınlığı bölgenin coğrafi konumuna, güneşlenme süresine ve yardımcı ısı enerji kaynaklarının enerji üretim maliyetine göre seçilmektedir. Bojic ve ark., Fransa'da yaptıkları çalışmalarında ısıtma için sırasıyla elektrik ve doğalgaz kullanılırsa 35 ve 25 cm'lik duvar kalınlıklarının yeterli olacağını belirlemiştir [17]. Farklı coğrafi bölgeler için masif duvar kalınlığının ısı performans üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalarda literatürde sıklıkla rastlanırken [18-22] faz değiştiren malzemelerin duvar içerisinde kullanılıp ısı kütleli artırması yönündeki çalışmalar ile de karşılaşılmaktadır. Fiorito, yaptığı çalışmada beş farklı iklim bölgesi için faz değiştiren malzemenin ısı performans üzerindeki etkisini incelemiştir [23]. Trombe duvarının özellikle gece periyodu boyunca yüksek ısı kaybına sahip olması önemli bir dezavantajdır [8]. Çünkü gündüz periyodu boyunca yüksek miktarda ısı enerji depolayan duvar gece periyodunda bu enerjisini hızlı biçimde kaybedebilmektedir. Bu kaybı azaltmak için ısı yalıtım malzemelerinin kullanımı araştırmacılar tarafından incelenmiştir ve ısı yalıtım malzemesinin kompozit tipteki Trombe duvarlarında kullanımının verimi arttıracaklarını belirlemiştir [24]. Klasik bir Trombe duvarında yalıtım malzemesinin kullanımı gündüz periyodundaki ısı depolama miktarını düşürebileceği için özellikle soğuk iklim koşullarındaki uygulamalarda yeni tip ısı yalıtım malzemelerinin kullanımı araştırılmalıdır. Masif duvarın alt ve üst kısımlarında bulunan havalandırma kanallarından iç mekân ile Trombe duvarında bulunan hava boşluğu arasındaki ısı ve kütle transferi gerçekleşir. Bu kanalların açık kalma süreleri ve açılma zamanları duvarın bulunduğu coğrafi konum ile bağlantılıdır ve otomasyon sistemiyle kontrol edilirse duvardan elde edilen verimin artacağı belirlenmiştir. Havalandırma kanallarının boyutlarının ve kanal toplam alanının masif duvar alanına oranının da Trombe duvarının ısı verimi üzerinde etkisi olan geometrik parametrelerden olduğu bilinmektedir. Liu ve ark., yaptıkları çalışmada havalandırma kanallarının gün doğumundan iki veya üç saat sonra açılmasının ve de gün batımından bir saat sonra kapatılmasının verim üzerinde optimum etkiye sahip olduğunu belirlemiştir [25]. Briga ve ark., Portekiz 'deki bir yapı için havalandırma kanalının oda içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini incelemiştir [18]. Kaya ve ark., havalandırma kanal sayısının ısı verim üzerine etkisini inceleyen çalışmalarında sekiz adet havalandırma kanalına sahip olan ve toplam duvar alanının %8'i kadar havalandırma kanal alanı olan tasarımın en yüksek ısı verimi verdiğini bulmuşlardır [26]. Trombe duvarında pencere kullanımı da araştırmacıların ilgisini çeken bir konudur. Pencere kullanımıyla gündüz periyodunda iç mekânın daha hızlı güneş ışınımı etkisine girmesi sağlanabilir ve de insan yaşantısı için gerekli olan güneş ışığından verimli şekilde yararlanılabilir. Öte yandan pencere kullanımının özellikle soğuk iklim kuşağına sahip konumlar için depolanan ısı miktarı üzerinde olumsuz etkisi de bulunmaktadır. Ancak sıcak geçen kış mevsimine sahip konumlarda pencere kullanımının olumsuz etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Bellos ve ark., Yunanistan'ın Atina kentinde yaptıkları çalışmada pencere ve penceresiz Trombe duvarının karşılaştırmalı analizini yapmışlar ve iki durum arasındaki sıcaklık farkını yalnızca 0.5 K olarak belirlemiştir [27].

Günümüzde klasik Trombe duvarının yanı sıra geliştirilmiş Trombe duvarı, kompozit Trombe duvarı, fotovoltaik Trombe duvarı, faz değiştiren malzemeli Trombe duvarı, girintili-çıkıntılı Trombe duvarı, güneş enerjisi destekli Trombe duvarı ve akışkan malzemeli Trombe duvarı gibi farklı alternatifler de mevcuttur [2,8]. Geliştirilmiş Trombe duvarı, klasik Trombe duvarına ısı verimi arttırmak için otomasyonla çalışan hava girişleri, havalandırma perdeleri veya koruyucu yalıtım kaplamaları ilave edilmesiyle inşa edilir [2]. Kompozit Trombe duvarında ise ilave olarak havalandırma kanalı içeren ısı yalıtımlı duvar mevcuttur [24]. Bu duvar tipinde nem oluşumu gözlenmemekte ve bu da duvarın yapısına zarar verebilmektedir, bu sebeple kullanılan malzemenin tipi ve kalınlığının dikkatli biçimde seçilmesi gerekmektedir. Faz değiştiren malzemeli Trombe duvarında organik veya inorganik yapıdaki faz değiştiren malzemeler kullanılabilir. Yapılan araştırmalarda iklim koşullarına bağlı olarak faz değiştiren malzemenin kullanıldığı duvarların yıllık enerji tüketiminin %10-30 arasında düşebileceği gözlenmiştir [28]. Fotovoltaik Trombe duvarında masif duvardaki hava boşluğuna yerleştirilmiş

fotovoltaik paneller yer almaktadır. Bu sayede güneş ışınımı hem elektrik hem de ısı enerjisine dönüştürülebilmektedir [29]. Güneş enerjisi destekli Trombe duvarında ise gelen güneş ışınımının enerjisini depolamak için su tankları kullanılmaktadır [30]. Girintili-çıkıntılı Trombe duvarında pencere açıklıkları güneydoğu yönünde, duvar yüzeyleri ise güneybatı yönünde konumlandırılacak şekilde bir tasarım yapılır fakat bu tipteki bir duvarın soğuk iklim kuşağında kullanılması verimsizdir [2]. Akışkan malzemeli Trombe duvarında, düşük yoğunlukta ve yüksek ısı absorbe etme değerinde akışkan hava boşluğunda kullanılır. Bu tarz bir duvarın veriminin klasik Trombe duvarına göre daha fazla olduğu gözlenmiş olsa da [31] henüz ticarileşmemiş bir teknolojidir

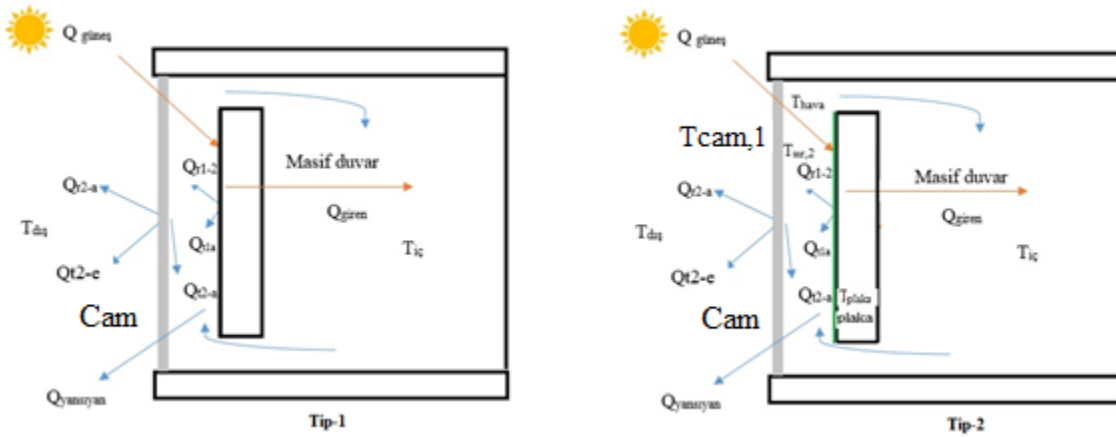
Literatür incelendiği zaman farklı tipte Trombe duvarı yapıları ile ilgili çeşitli çalışmalara rastlanmış olsa da bu çalışma kapsamında ele alınan duvar tiplerinin kullanımının Manisa ili için enerji verimleri ve iç ortam sıcaklıkları karşılaştırılmasını gösteren parametrik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında Tip-1 olarak adlandırılan klasik bir Trombe duvarı ve de Tip-2 olarak adlandırılan absorber plakalı bir Trombe duvarı ele alınmıştır. Ayrıca Trombe duvarının hava boşluğu genişliği ve güneş yoğunluğu değişimi gibi parametrelerin de sistem verimi üzerine etkisi irdelenmiştir. Yine aynı şekilde bu duvar tiplerinin ekonomik ve çevresel analizinin enerji analiziyle beraber alındığı bir çalışmanın Manisa ili için yapılmadığı görülmüştür, bu açıdan da özellikle artan enerji maliyetlerinin ve çevresel etkilerin göz önüne alındığı bir uygulamanın literatürdeki boşluğu doldurması hedeflenmiştir.

II. ANALİZ

Çalışma kapsamında incelenen Trombe duvarlarının enerji, ekonomik ve çevresel analizleri yapılmıştır.

A. Enerji Analizi

Enerji analizi için iki farklı yapıdaki Trombe duvarının Manisa ilinde Ocak ayı kullanımının termodinamik yönden incelenmesi yapılmıştır. Ele alınan ilk Trombe duvarı klasik yapıdaki duvarken (Tip-1), ikinci Trombe duvarı masif duvar kısmına absorber plaka ilave edilmiş (Tip-2) tasarımıdır. Masif duvar malzemesi olarak siyah renk boyalı beton kullanılmıştır. Duvar için ısı iletim katsayısı, soğurganlık ve yayıcılık değerleri sırasıyla 0,5 W/m.K, 0,64 ve 0,9 olarak alınmıştır. Absorber plaka malzemesi olarak bakır seçilmiştir. Bakır için ısı iletim katsayısı, soğurganlık ve yayıcılık değerleri sırasıyla 398 W/m.K, 0,4 ve 0,2 olarak alınmıştır. İncelenen duvar tiplerinin şematik gösterimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekillerde “r” alt indisi ışınımla olan ısı transferini, “t” alt indisi taşınım ile olan ısı transferini, “e” alt indisi çevresel ortamı, “a” alt indisi havayı göstermektedir.



Şekil 2. Tip-1 ve Tip-2 Trombe duvarlarının şematik gösterimi

Trombe duvarının her iki tipinin de eklendiği odanın temel tasarım parametreleri olarak Tablo 1’de verilen değerler ele alınmıştır.

Tablo 1. Trombe duvarının bulunduğu odanın tasarım parametreleri

Oda boyutları (m)	3 x 3 x 3
Cam boyutları (m)	3 x 3
Cam tabaka kalınlığı (m)	0,005
Hava tabakası kalınlığı (m)	0,012
Havalandırma kanalı (m)	0,2 x 0,2
Hava boşluğu genişliği (m)	0,15-0,35

Analizin yapıldığı Manisa ili için hesaplamalarda gerekli olacak güneş ışınımı ve diğer değerler ise Tablo 2’de sunulmuştur [32].

Tablo 2. Manisa iline ait güneş ışınımı ve ilgili veriler

Enlem – Boylam	27 08' ve 29 05' doğu boylamları ile 38 04' ve 39 58' kuzey enlemleri arası
Dikey ışınım miktarı (kWh/m ²)	1761,6
Toplam ışınım miktarı (kWh/m ²)	1718,3
Yagın ışınım miktarı (kWh/m ²)	629,8

Trombe duvarı ile ilgili hesaplamalar yapılırken bazı kabuller yapılmıştır ve bunlar aşağıda sunulmuştur.

- Hava boşluğundaki sıcaklık değişimi akış hareketinin olduğu yöndedir.
- Sistem bileşenlerindeki ısı transferi tek boyutludur.

Klasik Trombe duvarı için hesaplamalar yapılırken Piotrowski ve ark.’nın kullandığı yaklaşım temel alınmıştır [33].

Masif duvar ve cam yüzeyi enerji dengesi denklemleri aşağıda verilmiştir. 1 numaralı denklem masif duvar için 2 numaralı denklem ise cam yüzey için uygulanmıştır [33]. 1-7 numaralı denklemlerde zamana bağlı değişim olmadığı kabulü yapılmıştır. Bu denklemlerde Q ısı geçişini (W/m²), z güneş soğurganlık (yutma) katsayısını, h ısı taşınım katsayısını (W/m²°C), T sıcaklığı (°C), ε yayıcılığı, σ Stefan-Boltzmann sabitini (Wm²K⁻⁴), b hava boşluğu genişliğini (m), c özgül ısıyı (W/m³°C), m kütsel debiyi (kg/s), f geçirgenliği, L uzunluğu (m), ρ yoğunluğu (kg/m³), ξ yerel direnç faktörünü, λ sürtünme faktörünü, v ortalama hızı (m/s) D_h hidrolik çapı (m) göstermektedir. t alt indisi taşınım ile olan ısı transferini, a alt indisi havayı, r alt indisi ışınım ile olan ısı transferini, dış alt indisi ise dış ortamı temsil etmektedir. Tablo 3’te denklemlerdeki sembollerin sayısal değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Denklemlerdeki sembollerin sayısal değerleri

Sembol	Değer
z(-)	0,64
ε(-)	0,89
b (m)	0,35
λ(-)	0,4
D _h (m)	0,62
L (m)	3

$$Q_{\text{güneş}} - Q_{\text{yansıtılan}} = Q_{r1-2} + Q_{t1-a} + Q_{\text{giren}} \quad (1)$$

$$Q_{r1-2} \pm Q_{t2-dış} = Q_{t2-dış} + Q_{r2-a} \quad (2)$$

$$z_p \cdot Q_{\text{güneş}} \cdot f = \varepsilon_{1-2} \sigma \left[\left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right] + h_{t1}(T_1 - T_{\text{hava1}}) + h_{iç}(T_1 - T_{iç}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{1-2} \sigma \left[\left(\frac{T_{1(x)} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{2(x)} + 273}{100} \right)^4 \right] \pm h_{t2}(T_2 - T_{a2}) \\ & = h_{dış}(T_{2(x)} - T_e) + \varepsilon_1 \sigma \left[\left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{dış} + 273}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$h_{t1}(T_1 - T_{a1})b = cm_1 \frac{dT_{a1}}{dx} \quad (5)$$

$$h_{t2}(T_2 - T_{a2})b = \dot{m}_2 \frac{dT_{a2}}{dX} \quad (6)$$

$$Lg(\rho_{iç} - \rho_{kanal}) = \left(\Sigma\xi + \lambda \frac{L}{D_h} \right) \frac{v_{kanal}^2}{2} \rho_{kanal} \quad (7)$$

Masif duvar kısmına absorber plaka ilave edilen Trombe duvarı tasarımı için Duan ve ark.'nın kullandığı matematiksel model ele alınmıştır [5]. 8-12 numaralı denklemlerde zamana bağlı değişim olmadığı kabulü yapılmıştır. Bu denklemlerdeki semboller ve indisler 1-7 denklemlerdekilerle aynıdır. A sembolü yüzey alanını (m²), d sembolü kalınlığı (m), U sembolü toplam ısı transfer katsayısını (W/m²°C), k sembolü iletimle olan ısı transfer katsayısını (W/m°C), z simgesi ise soğurganlık değerini göstermektedir.

$$h_{dış,ortam}A_{cam}(T_{cam,1} - T_{hava}) + h_{r,cam-dış\ ortam}A_{cam}(T_{cam,1} - T_{hava}) + \frac{k_{cam}}{d_{cam}}A_{cam}(T_{cam,1} - T_{cam,2}) = z_{cam}A_{cam}Q_{güneş} \quad (8)$$

$$\left(h_{r,cam-dış\ ortam} + \frac{k_{cam}}{d_{cam}} \right) A_{cam}(T_{cam,2} - T_{duvar}) + \frac{k_{cam}}{d_{cam}} A_{sır}(T_{cam,2} - T_{cam,1}) = 0 \quad (9)$$

$$h_{t,plaka}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{hava}) + \left(h_{r,plaka-cam} + \frac{k_{hava-plaka}}{d_{plaka-hava}} \right) A_{plaka}(T_{plaka} - T_{cam,2}) + U_{plaka}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{iç}) + h_{r,plaka-duvar}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{duvar}) = z_{plaka}z_{cam}A_{plaka}Q_{güneş} \quad (10)$$

$$h_{t,plaka}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{hava}) + h_{t,cam}A_{cam}(T_{cam,2} - T_{hava}) + h_{t,duvar}A_{duvar}(T_{duvar} - T_{hava}) = \rho_{hava}\dot{V}c_p(T_{dış} - T_{iç}) \quad (11)$$

$$U_{plaka} = \frac{1}{\frac{d_{duvar}}{k_{duvar}} + \frac{1}{h_{iç}}} \quad (12)$$

Oda içi sıcaklığının zamana bağlı değişimini hesaplayabilmek içinse aşağıdaki denklemden yararlanılabilir. Buradaki “t” zamanı göstermektedir.

$$T_{oda} - T_{oda}^i = \frac{Q}{c\rho V_{oda}} t \quad (13)$$

B. Ekonomik Analiz

Küresel ölçekte ortaya çıkan güncel gelişmeler sebebiyle enerji girdilerinin maliyeti artış eğilimi göstermektedir, bunun yanı sıra enerji arzındaki sürekliliğin de kesintiye uğraması gibi olası olumsuz senaryolar da beklenmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir ve dışa bağımlı olmayan kaynaklarla çalışabilen bir sistemin ekonomik anlamda da incelenmesi önem taşımaktadır.

İncelenen Trombe duvarı sistemlerinin ekonomik analizi ısıtma koşulları için yapılmıştır ve ısıtma periyodu olarak 15 Kasım ile 15 Nisan arası seçilmiştir ve yaz mevsiminde sistemin etkili bir gölgelendirmeye birlikte fazladan bir soğutma yükü getirmediği varsayımı yapılmıştır. Ekonomik analiz esnasında gerekli olan çevre sıcaklığı, toplam ışınlam miktarı gibi değerler incelenen zaman periyodu için Avrupa Birliği'ne bağlı ilgili birimin sunduğu verilerden alınmıştır [34]. Ekonomik analiz esnasında sistemin çalışma döngüsündeki anapara tasarrufu ve bu tip bir duvarın üretilmesinin ne kadar sürede kendini amorti edeceğini hesaplanmıştır.

Anapara tasarrufu için S simgesi seçilmiştir ve birimi TL'dir. Hesaplaması içinse kullanılan formül aşağıdaki gibi verilmiştir [35]. S değeri sıfırdan büyük oldukça Trombe duvarı uygulamasının ekonomik açıdan avantajlı olduğunu söylelenebilir.

$$S = \dot{I}O * (Q_{tasarruf} * Y\ddot{U} - F * BMK) - F \quad (14)$$

Formülde $Y\ddot{U}$, yakıt ücretini temsil etmektedir. Analizde yakıt olarak doğalgaz seçilmiştir ve yakıt ücretinin birimi TL/kJ olarak alınmıştır. F, Trombe duvarı imalatı için gerekli olan sermaye girdisini gösterir, birimi TL/m²'dir. $\dot{I}O$ ise indirim oranını göstermektedir, hesaplanması şu şekilde gösterilmiştir [35].

$$\dot{I}O = \frac{1}{d - e} * \left[1 - \left(\frac{1 + e}{1 + d} \right)^{\dot{C}D} \right] \quad (15)$$

15 numaralı formüldeki “d” kredi faizini, “e” yakıt ücretinin yıllık artış oranını, $\dot{C}D$ ise sistemin çalışma döngüsünün yıl sayısını göstermektedir $\dot{C}D$ değeri literatürde 20-50 yıl arası olarak verilmektedir, bu analizde ise ek maliyet gerektirecek herhangi bir tadilat işlemi gerektirmeyecek ortalama bir yapı ömrü olması açısından 30 yıl olarak seçilmiştir

14 numaralı formüldeki “BMK” bakım maliyet katsayısını göstermektedir. Hesaplanması için aşağıda gösterilen formül kullanılabilir [35].

$$BMK = \frac{Y\ddot{U}'}{ID * IV} \quad (16)$$

$Y\ddot{U}'$ incelenen sistem için doğalgazın ücretidir, birimi TL/m³ dür. ID ısı değeri gösterir, doğalgaz için 8250 kcal/m³ değerindedir. IV ise incelenen yakıt için kullanılan kazanın ısı verimini gösterir ve doğalgaz kazanı için 0,92 alınmıştır [36].

Trombe duvarı sisteminin kendini ne kadar sürede amorti edeceğini belirlemek içinse 17 numaralı denklem kullanılabilir. Bu denklemdeki $\dot{I}O$ değeri ise 14 numaralı denklemde S değerinin sifıra eşitlenmesi ile bulunur. Amorti süresi AS ile gösterilirse denklem aşağıdaki gibi yazılabilir [35].

$$AS = \frac{\ln[1 - \dot{I}O * (d - e)]}{\ln\left(\frac{1+e}{1+d}\right)} \quad (17)$$

C. Çevresel Analiz

Trombe duvarının çevresel analizinde, sistemin kullanılmasıyla birlikte CO₂ salımının ne kadar düştüğü hesaplanmaktadır. Salım düşüşü SD ile gösterilirse, bu değer kg cinsinden aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir, formüldeki F_{CO_2} , karbon salım faktörü olup yakıtın cinsine göre değişmektedir ve doğalgaz için 0,404 olarak alınır [35].

$$SD = \frac{Q_{tasarruf} * \dot{C}D}{ID * IV} * F_{CO_2} * \frac{44}{12} \quad (18)$$

III. BULGULAR

A. Enerji Analizi

Trombe duvarı için hesaplamalarda kullanılan modellerden elde edilen iç ortam sıcaklığı değişiminin sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu karşılaştırma zamana bağlı değişim formülü göz önüne alınarak yapılmıştır. Deneysel verilerle karşılaştırma yapabilmek için ele alınan modeller deneylerin yapıldığı coğrafik şartlardaki ve geometrideki odaya uyarlanmıştır [37]. Deneyin gerçekleştirildiği yer ve oda ile ilgili veriler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Model ve deney karşılaştırılmasında kullanılan oda ile ilgili bilgiler

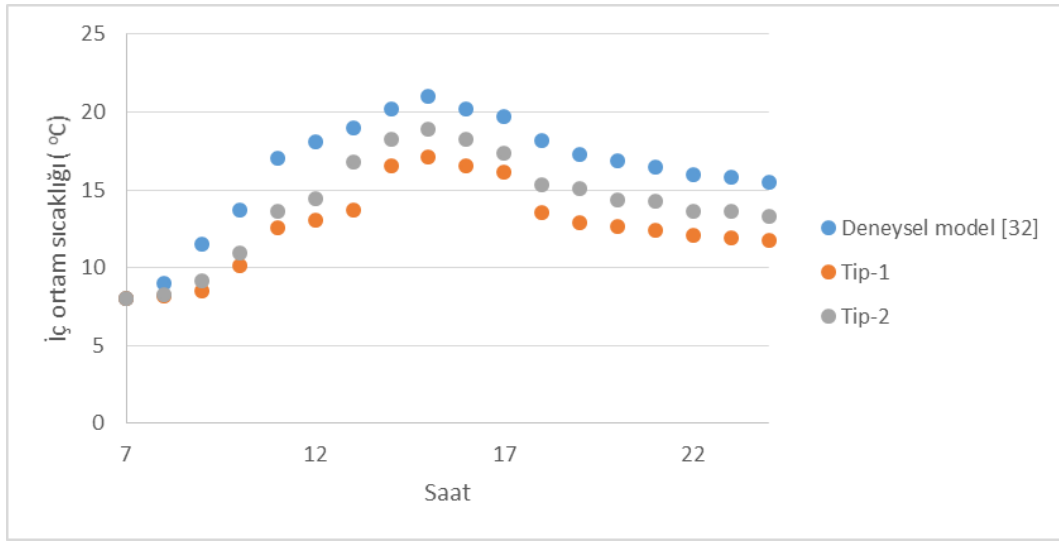
Enlem – Boylam –Konum	31°C53'50"/K - 54°C 22'3"/D – Yazd, İran
Test odası boyutları (m)	3x2x3
Masif duvar kalınlığı (m)	0,20
Masif duvar genişliği (m)	1
Hava boşluğu genişliği (m)	0,3
Havalandırma kanalı (m x m)	0,3 x 0,5
Deneyin gerçekleştirildiği tarih	6 Şubat 2014

Model ve deney sonuçları ile edilen oda sıcaklıkları arasındaki uyum ise Tablo 5’te sunulmaktadır. İncelenen zaman periyodundaki sıcaklık değerlerinin ortalamasından yararlanılarak ortalama bağıl ve yüzde hataları hesaplanmıştır.

Tablo 5. Model ve deney sonuçları arasındaki hata oranları

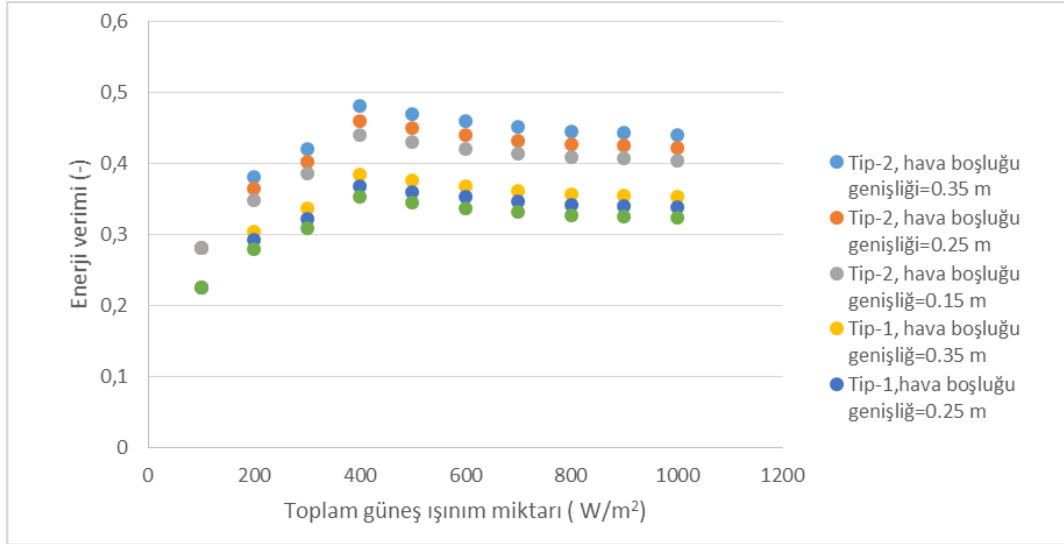
Duvar tipi	Ortalama Bağıl Hata	Ortalama Yüzde Hata
Tip-1	0,223	%22,4
Tip-2	0,156	%15,6

Bu hata değerlerinin oluşmasında deney şartlarındaki ısı taşınım katsayısı gibi değerlerin modelde kullanılan değerlerden farklı olmasının etkin olduğu söylenebilir. Tip-2 duvarın deney sonuçlarıyla daha uyumlu olmasının sebebi ise deneyde inşa edilen duvarın yapısının Tip-2’deki duvarın yapısına daha yakın olmasıdır. Ayrıca her iki duvar tipi için de sıcaklık değerinin saate bağlı değişimi deneysel sonuçtaki değişimle uyumludur.



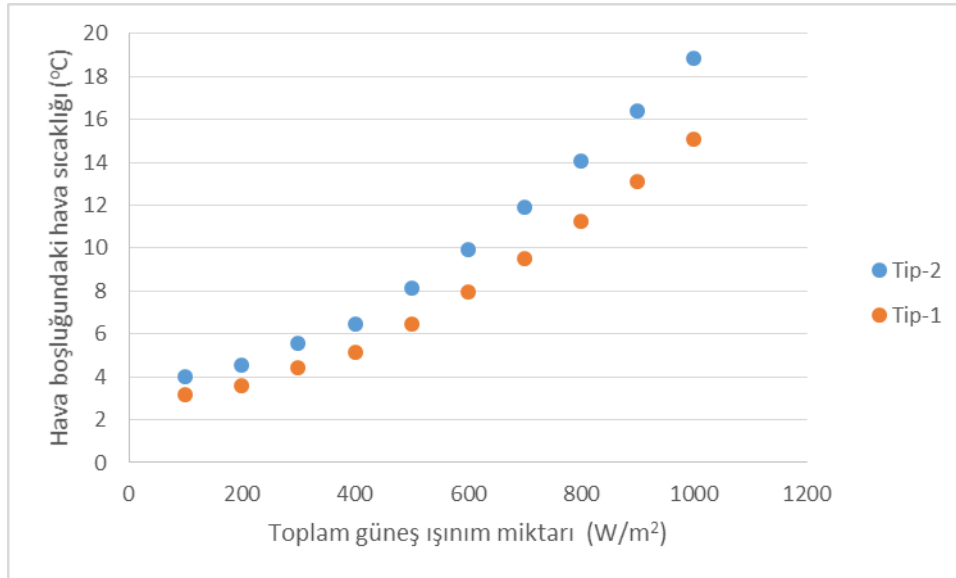
Şekil 3. Deneysel sonuçlar ve Tip-1 Tip-2 model karşılaştırması

Şekil 4’ ten görülebileceği gibi kararlı hal koşullarında enerji verimliliği her iki tipteki duvar için de hava boşluğu genişliğinin artmasıyla artmaktadır. Bu hesaplama için enerji verimliliği, güneşten gelen ısı enerjisinin odanın sıcaklığını arttıran ısı enerjisiye olan oranı olarak tanımlanmıştır. Bu grafik çizilirken toplam güneş ışınım miktarı ve hava boşluğu genişliği değerleri değiştirilmiştir. Kanal derinlik değerleri olarak 0,15, 0,25 ve 0,35 metre alınmıştır. Hava boşluğu genişliği arttıkça kesit alanı da artar, bu artış doğrultusunda kaldırma kuvvetleri sürtünme kuvvetlerinden baskın olmaya başlar ve boşluk içindeki kütleli debi artar. Kütleli debinin artmasıyla hava hızında ve ısı transfer hızında artış gözlemlenir bu da hava ile duvar arasındaki taşınım yoluyla olan ısı transferi miktarında iyileşme sağlar. Bunun sonucunda da enerji verimliliği ve hava çıkış sıcaklığı yükselir. İncelenen aralık içerisinde en yüksek enerji verimi değerine güneş enerjisi yoğunluğu 500 W/m² ve kanal derinliği 0,35metre iken ulaşılmıştır. Enerji verimleri Tip-1 ve Tip-2 duvarlar için sırasıyla 0,37 ve 0,46 olarak elde edilmiştir.

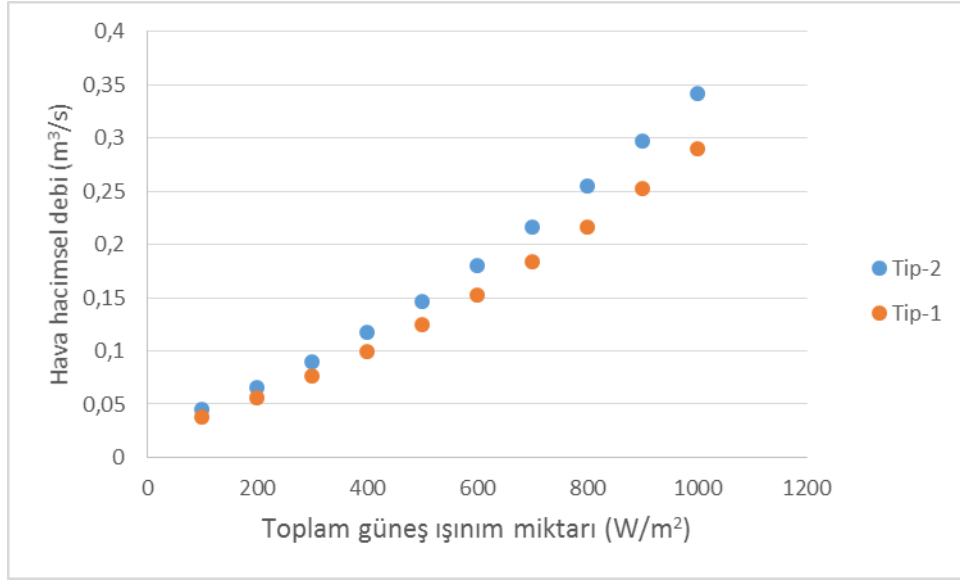


Şekil 4. Enerji veriminin hava boşluğu genişliği ve toplam güneş ışınım miktarı ile değişimi

Şekil 5 ve 6 'da kararlı hal koşulları geçerliken toplam güneş ışınım miktarı değişimi ile hava kütleli debisinin ve çıkış sıcaklığının değişimi gösterilmiştir. Grafiklerde gösterilen hesaplamalar yapılırken hava boşluğunun genişliği 0,35 metre olarak sabit tutulmuştur. Toplam güneş ışınım miktarı arttıkça hem kütleli debi hem de çıkış sıcaklığı artmaktadır, bunun sebebi de artan ışınım miktarı ile birlikte taşınım yoluyla olan ısı transfer miktarında olan iyileşmedir.

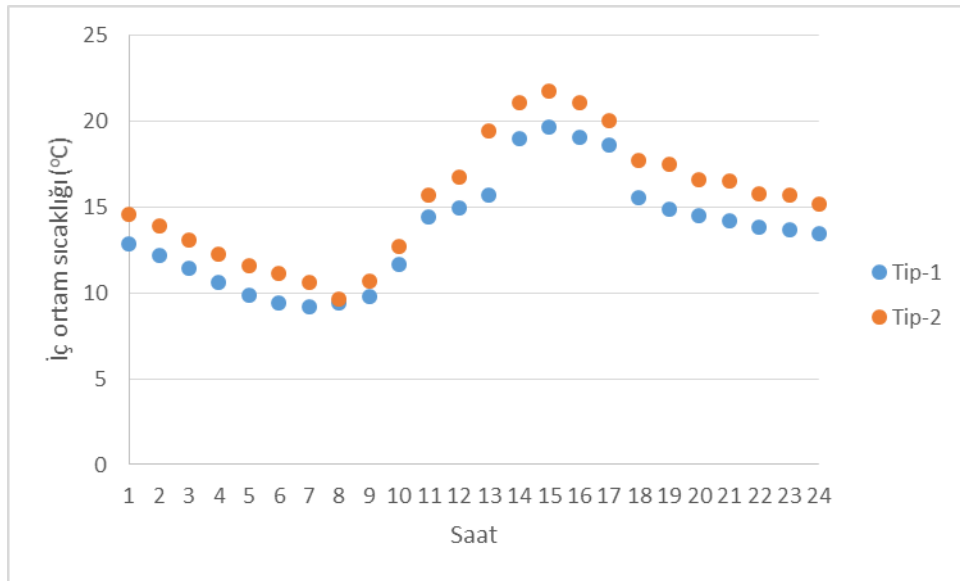


Şekil 5. Hava boşluğundaki sıcaklığın toplam güneş ışınım miktarı ile değişimi



Şekil 6. Hava hacimsel debisinin toplam güneş ışınım miktarı ile değişimi

Oda sıcaklığının gün içindeki saatlik değişimi Şekil 7' de verilmiştir. Hesaplama yapılırken 20 Ocak 2020 günü ele alınmış ve hava boşluğu genişliği 0,35 metre olarak sabit alınmıştır. Şekilde 01.00 ile 24.00 saatleri arasında saatlik değişim şeklinde bir gösterim sunulmuştur. Grafığe göre saat 15'de oda sıcaklıkları Tip-2 ve Tip-1 duvarlar için sırasıyla 21,8 ve 19,6 °C'lik maksimum değerlerine ulaşır ve daha sonra azalma eğilimi gözükür, bu azalmanın değeri ve hızı 01.00-08.00 arası gözlenen azalmaya göre daha düşüktür. Bunun sebebi ise Trombe duvarında depolanan ısının güneş etkisi geçtikten sonra üzerindeki ısı yükü yavaş yavaş bırakmasıdır. Trombe duvarında depolanan ısı yükü azaldıktan sonra odanın sıcaklığındaki düşüş hızı artmaktadır



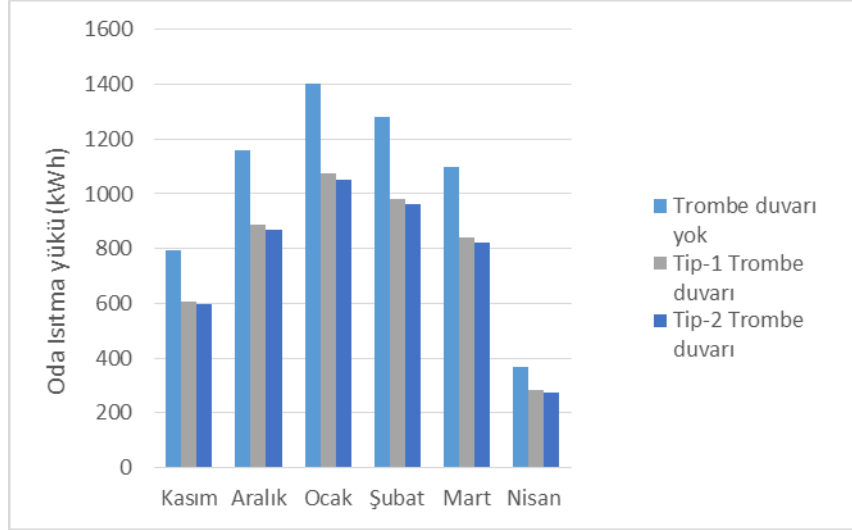
Şekil 7. Oda sıcaklığının zamana bağlı değişimi

B. Ekonomik Analiz

Bölüm 2.2'deki ekonomik analiz formülleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur. Şekil 8'de ise incelenen odanın analiz yapılan zaman aralığındaki ısı yükleri hem Trombe duvarı yokken hem de Tip-1 ve Tip-2 Trombe duvarları varken gösterilmiştir.

Tablo 6. Ekonomik Analiz Sonuçları

	Q _{tasarruf} (kWh)	Yıllık Tasarruf (%)	S (TL)	AS (yıl)
Tip-1	1425	23,3	12780	7,3
Tip-2	1525	24,9	13550	6,9



Şekil 8. Oda ısıtma yükünün değişimi

Analizin yapıldığı sıradaki enerji maliyetlerine göre iki tipteki duvarın da yaklaşık yedi yıl içerisinde kendini amorti edeceği görülmüştür. Tip-2 duvar genel enerji verimliliği bakımından Tip-1'e göre daha yüksek değere sahip olduğu için de amorti süresi daha kısa olmuştur

C. Çevresel Analiz

Bölüm 2.3 kısmında verilen çevresel analiz formülüne göre yapılan hesaplamalar ile CO₂ salımında Tip-1 Trombe duvarı için toplam 5985,5 kg ve Tip-2 Trombe duvarı için toplam 6405,5 kg azalma bulunmuştur. Bu değerler de günümüzde çok ciddi bir sorun olan küresel ısınmanın olumsuz etkilerini azaltma konusunda önemli bir adım teşkil etmektedir.

IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında pasif ısıtma uygulaması ile enerji tasarrufu yapılabilmesi için kullanılan alternatiflerden biri olan Trombe duvarı sisteminin Manisa ilinde kış mevsiminde uygunluğu araştırılmıştır. Trombe duvarı olarak klasik tip ve absorber plakalı tip olarak iki alternatif ele alınmıştır. Trombe duvarının verimi üzerinde birçok farklı parametrenin etkisi söz konusudur, bu makalenin içeriğinde toplam güneş ışınım miktarının değişimi ve hava boşluğu genişliğinin değişimi ele alınmıştır. İlerdeki çalışmalar için duvar malzemesinin değişimi, duvar kalınlığının değişimi, absorber plaka malzemesinin değişimi gibi parametreler de alternatif olarak incelenebilir.

Farklı güneş ışınım yoğunlukları ve hava boşluğu genişliği alternatiflerinde sırasıyla 500 W/m² ve 0,35 m değerleri için Trombe duvarı veriminin %46'ya ulaştığı görülmüştür. Bu değerler için de ısıtılması istenen iç ortamın sıcaklığının 21,8 °C olduğu görülmüştür. Hesaplamaların sonucuna göre iç ortamın sıcaklığının uzun süre muhafaza edilebildiği görülmüştür. Bu sonuç ortam ısıtmasında doğalgaz, kömür veya elektrik gibi fosil kaynaklara bağımlılığın azalacağını söylemektedir, bu sayede ısıtma maliyetlerinde teorik olarak %24'lük bir tasarruf da öngörülmektedir. Fosil yakıtla ısıtılan ortamlarda otomasyon eşliğinde kullanılan açılır kapanır havalandırma kanallı Trombe duvarı uygulamalarının enerji tasarrufuna olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi de ayrı bir çalışma konusu olabilir.

Trombe duvarının uygulanmasının yalnızca enerji verimliliği açısından değil aynı zamanda ekonomik ve çevresel açılardan da bir katma değer yaratmaktadır. Her iki tipteki duvar için de sistemin amorti süreleri sistemin çalışma dönemi göz önüne alındığında oldukça düşüktür. Bu durum bu tip sistemlerin ekonomik açıdan da avantajlı olduğunu göstermektedir. Çevresel analiz sonucunda elde edilen değerler de bu sistemlerin karbon salımını azaltıcı ve de dolayısıyla sera etkisini azaltıcı yönde etkisi olduğunu göstermektedir. Bu sebeple incelenen

üç farklı analiz açısından da Trombe duvarları yalnızca bugüne dair değil geleceğe yönelik de bir yatırım olarak düşünülebilir.

Trombe duvarında karşılaşılan sorunlardan en önemlilerinden birisi ise iç ortam sıcaklığının ilkbahar ve yaz mevsimlerinde konfor sınırının üzerindeki değerlere çıkmasıdır. Bu durumun önüne geçmek için tasarımda farklı gölgelendirme sistemlerinin uygulanması, havalandırma kanallarının konumlandırılması gibi değişiklikler yapılabilir ve bu yapılan değişikliklerin etkisi yaz mevsimi için analiz edilebilir. Ayrıca tüm bu değişimler mümkünse deneysel çalışmalarla desteklenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] IEA World. Energy outlook special report (2015): *energy and climate change*. France: OECD/IEA; 2015. (2015). IEA World. Energy outlook special report 2015: *energy and climate change*. France: OECD/IEA; 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00561-7>
- [2] Sergei, K., Shen, C., & Jiang, Y. (2020). A review of the current work potential of a trombe wall. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130(October 2019) . <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109947>
- [3] Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289–296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)
- [4] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894–900. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.094>
- [5] Duan, S., Jing, C., & Zhao, Z. (2016). Energy and exergy analysis of different Trombe walls. *Energy and Buildings*, 126, 517–523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.052>
- [6] Review, B., & Koehler, K. (2014). The Solar House: Pioneering Sustainable Design. By Anthony Denzer. New York: Rizzoli, 2013. *Arts 2014*, Vol. 3, Pages 303-306, 3(3), 303–306. <https://doi.org/10.3390/ARTS3030303>
- [7] Hu, Z., He, W., Ji, J., & Zhang, S. (2017). A review on the application of Trombe wall system in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 976–987. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.12.003>
- [8] Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6340–6351. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.06.032>
- [9] Randjelovic, D., Vasov, M., Ignjatovic, M., Bogdanovic-Protic, I., & Kostic, D. (2018). Impact of trombe wall construction on thermal comfort and building energy consumption. *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 16(2), 279–292. <https://doi.org/10.2298/fuace180302008r>
- [10] Hernández-López, I., Xamán, J., Chávez, Y., Hernández-Pérez, I., & Alvarado-Juárez, R. (2016). Thermal energy storage and losses in a room-Trombe wall system located in Mexico. *Energy*, 109, 512–524. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.04.122>
- [11] Modulated Facade System: Trombe Wall And Glazing Study For Different Portuguese Climates Sistema De Fachada Modular: Estudos De Muro Trombe Y Doble | Semantic Scholar. (n.d.). Retrieved March 1, 2022, from <https://www.semanticscholar.org/paper/Modulated-Facade-System%3A-Trombe-Wall-And-Glazing-De-Diferentes-Portugueses/5b595045b56103372e1767a0573514b5acac1880>
- [12] Stazi, F., Mastrucci, A., & Di Perna, C. (2012). The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study. *Energy and Buildings*, 47, 217–229. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.11.039>
- [13] Stazi, F., Mastrucci, A., & Munafò, P. (2012). Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: An application on solar wall systems. *Building and Environment*, 58, 278–288. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.08.003>
- [14] Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B., & Butez, M. (2002). Study of solar walls — validating a simulation model. *Building and Environment*, 37(1), 109–121. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00072-X)
- [15] Błotny, J., & Nem's, M. N. (2019). Analysis of the Impact of the Construction of a Trombe Wall on the Thermal Comfort in a Building Located in Wrocław, Poland. <https://doi.org/10.3390/atmos10120761>
- [16] Olenets, M., Piotrowski, J. Z., & Stroy, A. (2015). Heat transfer and air movement in the ventilated air gap of passive solar heating systems with regulation of the heat supply. *Energy and Buildings*, 103, 198–205. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.05.051>
- [17] Bojić, M., Johannes, K., & Kuznik, F. (2014). Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall. *Energy and Buildings*, 70, 279–286. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.11.062>
- [18] Briga Sá, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, J. C., & Paiva, A. (2017). An experimental analysis of the Trombe wall temperature fluctuations for high range climate conditions: Influence of ventilation openings and shading devices. *Energy and Buildings*, 138, 546–558. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.085>
- [19] Dabaieh, M., & Elbably, A. (2015). Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates. *Solar Energy*, 122, 820–833. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.10.005>

- [20] Özbalta, T. G., & Kartal, S. (2010). Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey. *Scientific Research and Essays*, 5(18), 2768–2778. Retrieved from <http://www.academicjournals.org/SRE>
- [21] Abbassi, F., Dimassi, N., & Dehmani, L. (2014). Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations. *Energy and Buildings*, 80, 302–308. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.05.036>
- [22] Hami, K., Draoui, B., & Hami, O. (2012). The thermal performances of a solar wall. *Energy*, 39(1), 11–6. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.10.017>
- [23] Fiorito, F. (2012). Trombe Walls for Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates. Exploring the Use of Phase-change Materials for Performances Improvement. *Energy Procedia*, 30, 1110–1119. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.11.124>
- [24] Zalewski, L., Chantant, M., Lassue, S., & Duthoit, B. (1997). Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy and Buildings*, 25(1), 7–18. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00974-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00974-7)
- [25] Liu, Yanfeng, Wang, D., Ma, C., & Liu, J. (2013). A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of a trombe wall. *Solar Energy*, 91, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2013.01.016>
- [26] Kaya, E. S., Aksel, M., Yigit, S., & Acikara, T. (2021). A numerical study on the effect of vent/wall area ratio on Trombe wall thermal performance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 174(5), 224–234. <https://doi.org/10.1680/jensu.20.00064>
- [27] Bellos, E., Tzivanidis, C., Zisopoulou, E., Mitsopoulos, G., & Antonopoulos, K. A. (2016). An innovative Trombe wall as a passive heating system for a building in Athens—A comparison with the conventional Trombe wall and the insulated wall. *Energy and Buildings*, 133, 754–769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.035>
- [28] Guarino, F., Athienitis, A., Cellura, M., & Bastien, D. (2017). PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates. *Applied Energy*, 185, 95–106. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.10.046>
- [29] Chow, T. T., Hand, J. W., & Strachan, P. A. (2003). Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building. *Applied Thermal Engineering*, 23(16), 2035–2049. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00183-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00183-2)
- [30] Liu, Yiwei, & Feng, W. (2012). Integrating Passive Cooling and Solar Techniques into the Existing Building in South China. *Advanced Materials Research*, 368–373, 3717–3720. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.368-373.3717>
- [31] Tunç, M., & Uysal, M. (1991). Passive solar heating of buildings using a fluidized bed plus Trombe wall system. *Applied Energy*, 38(3), 199–213. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(91\)90033-T](https://doi.org/10.1016/0306-2619(91)90033-T)
- [32] Global Solar Atlas. (n.d.). Retrieved March 2, 2022, from <https://globalsolaratlas.info/map?c=38.612579,27.433397,11&s=38.612579,27.433397&m=site>
- [33] Piotrowski, J. Z., Stroy, A., & Olenets, M. (2013). Mathematical modelling of the steady state heat transfer processes in the convectional elements of passive solar heating systems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(3), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.02.002>
- [34] JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. (n.d.). Retrieved December 25, 2022, from https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#HR
- [35] Zhang, H., & Shu, H. (2019). A Comprehensive Evaluation on Energy, Economic and Environmental Performance of the Trombe Wall during the Heating Season. *Journal of Thermal Science*, 28(6), 1141–1149. <https://doi.org/10.1007/s11630-019-1176-7>
- [36] Kanoğlu, M., & Üniversitesi, G. (n.d.). Enerji Verimliliği Örnek Projeleri.
- [37] Rabani, M., Kalantar, V., Dehghan, A. A., & Faghieh, A. K. (2015). Experimental study of the heating performance of a Trombe wall with a new design. *Solar Energy*, 118, 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.002>



Araştırma Makalesi - Research Article

Bitki Bazlı Adsorbent Üzerine Boyar Madde Adsorpsiyonu: Bir Optimizasyon Çalışması

Adsorption of a Dye on Plant Based Adsorbent: An Optimization Study

Erbil Kavcı^{1*}

Geliş / Received: 23/09/2022

Revize / Revised: 24/12/2022

Kabul / Accepted: 30/01/2023

ÖZ

Bu çalışmada Rumex Crispus L. bitki gövdelerinden elde edilen adsorbent üzerine metilen mavisi adsorbe edilmiştir. Adsorpsiyon şartlarını optimize edebilmek için Taguchi Deney tasarımı kullanılmıştır. Çalışmada optimize edilen şartlar: sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve tanecik boyutudur. Parametrelerin ne ölçüde etkin olduğunu belirlemek için ise ANOVA analizi yapılmıştır. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlardan optimum şartlar; sıcaklık, 20 °C, başlangıç boya konsantrasyonu, 120 mg/L, pH=6.5 ve tanecik boyutu 0.425 mm olarak tespit edilmiştir. Optimum şartlarda tahmin edilen q_t miktarı 65.58 mg/g olarak hesaplanmıştır. ANOVA analizi ile adsorpsiyon prosesine en önemli katkıyı %62.8 ile pH, %29.6 ile başlangıç boya konsantrasyonu, %5.4 ile sıcaklık ve %2.3 ile tanecik boyutu sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler- Adsorpsiyon, Metil Mavisi, Optimizasyon, Taguchi Metodu, ANOVA

ABSTRACT

In this study, methylene blue was adsorbed using the adsorbent obtained from Rumex Crispus L. plant stems. Taguchi Experiment design was used to optimize the adsorption conditions. The optimized conditions in the study are temperature, initial concentration, pH, and particle size. ANOVA analysis was performed to determine the effectiveness of the parameters. From the results, optimum levels were determined as 20 °C for temperature, 120 mg/L for concentration, pH=6.5, 0.425 mm for particle size. The estimated amount of q_t under optimum conditions was calculated as 65.58 mg/g. The most important contribution to the adsorption process by ANOVA analysis was pH with 62.8%, initial concentration with 29.6%, temperature with 5.4%, and particle size with 2.3%.

Keywords- Adsorption, Methylene Blue, Optimization, Taguchi Methodology, ANOVA

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: erbilkavci@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6519-9901>)
Kimya Mühendisliği Bölümü, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kars, Türkiye

I. GİRİŞ

Suların kirlenmesi çağımızın en önemli sorunlarından biridir. Hızlı modernleşme, endüstrileşme, nüfus artışı ve tüketimin beraberinde getirdiği problemler ile çevremizde artan kirlilik suyumuzu da hızlı bir şekilde kirliletmektedir. Bunlardan biride boyama endüstrilerinden kaynaklanmaktadır [1]. Boyamadan sonra atık sularda kalan kirlilikler ve boyalar giderilmez ise ekosisteme ciddi zarar vermektedir. Mutajenik, kanserojen ve zehirli olan bu boyar maddeler ciddi sağlık problemlerine, deri hastalıklarına, organ yetmezliğine, kalp hastalıklarına ve alerjilere sebep olmaktadır [2]. Çalışmada kullanılan metilen mavisi, katyonik bir boya olup tekstil, pamuk, kâğıt ve yün endüstrilerinde kullanılmaktadır. Metilen mavisinin suda ki çözünürlüğü oldukça fazla ve zehirli olan bir boyar maddedir [3].

Boyar maddelerin atık sulardan giderilmesinde çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında çöktürme, kuagülasyon, flokülasyon membran ayırma, iyon değiştirme ve adsorpsiyon metotları sayılabilir. Kuagülasyon, flokülasyon ile çöktürme metotlarının çok etkili ve verimli olmaması, membran ayırma ve iyon değiştirme yöntemlerinin de pahalı ve atık sularda uygulanabilirliğinin az olması, bu yöntemlerin adsorpsiyon ile kıyaslandığında dezavantajlarının fazla olduğunu göstermektedir [4]. Çünkü adsorpsiyon işlemi kolayca uygulanabilen, ekonomik ve oldukça basit bir yöntemdir. Adsorpsiyon proseslerinde adsorbent olarak ticari aktif karbon kullanılsa da pahalı olması nedeniyle özellikle son zamanlarda alternatif adsorbentlerin araştırılması oldukça tercih edilmektedir [5]. Özellikle zirai ve bitkisel atıkların adsorbent olarak denendiği birçok araştırma yapılmaktadır. Bu adsorbentlerden bazıları arasında çörek otu tozu [6], Cocos nucifera [7], Eucalyptus sheathiana bark [8], mısır sapları [9], Abelmoschus esculentus seedpods [10] örnek olarak verilebilir.

Adsorpsiyon prosesinin performansına tesir eden birçok parametre olabilir. Bunlar sıcaklık, başlangıç konsantrasyonu, pH, adsorbent miktarı, adsorbent karakteristiği gibi birçok parametre sayılabilir. Dolayısıyla maksimum bir giderim elde edebilmek için parametrelerin optimize edilmesi gerekir [11]. İstatistiksel tekniklere dayalı bir deney tasarımı, performansa etki eden parametrelerin katkısını değerlendiren ve deneysel sonuçları analiz eden etkili bir metottur [12]. Taguchi metodu da kuvvetli bir deney tasarımı metodudur. Bu metot robust deney tasarımının yanı sıra maliyeti azaltmayı ve kaliteyi artırmayı sağlar [13].

Bu çalışmada Rumex. Crispus L. (RCL) bitki gövdeleri adsorbent, metilen mavisi ise adsorbat olarak kullanılmıştır. Çalışmada sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve tanecik boyutu parametrelerinin adsorpsiyon üzerine etkisi Taguchi metodu ile optimize edilerek belirlenmiştir. ANOVA analizi ile parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Adsorbent, Adsorbat

Rumex. Crispus L. (RCL) bitkisi Kafkas Üniversitesi yerleşkesinden toplanmış, üzerindeki kirlilikler, safsızlıklar saf suyla temizlenmiş güneşte doğal olarak kuruması beklendikten sonra etüvde 24 saat 105 °C’de kurutulmuştur. Daha sonra bir öğütücü yardımıyla öğütülmüş ve elenmiştir. 0.425 mm altında kalan kısımları adsorpsiyon deneylerinde kullanılmak üzere kapalı kaplarda saklanmıştır. Metilen mavisinin molekül ağırlığı 320 g/mol, kimyasal formülü C₁₆H₁₈ClN₃S’dir. Aşağıda Tablo 2’deki deney planına göre hazırlanan metilen mavisi çözeltisine yine deney planına göre RCL miktarları eklenmiştir. Daha sonra sıcaklık ayarlanarak 1 saat 180 rpm de adsorpsiyon çalışmaları yürütülmüştür. 1 saatin sonunda 5000 rpm’ de santrifüj işlemi yapılmış, spektrofotometre (MAPADA – V1100D UV) kullanılarak, metilen mavisi konsantrasyonları 665 nm’ de ölçülmüştür. Eşitlik (1) ve (2)’ den %Giderim ve qt değerleri hesaplanmıştır.

$$\%Giderim = \frac{c_o - c_e}{c_o} \times 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(c_o - c_t) \times V}{m} \quad (2)$$

B. Taguchi Metodolojisi

Taguchi metodu tasarım sürecinde parametrelerin çalışma seviyelerini belirlememizi sağlar. Bunu yaparken parametrelerin etkileşimlerinin etkilerini ve istatistiksel önemini dikkate alarak deney sayısında azaltmaya gider. Bu sayede süreci optimize eden en iyi seviyeler belirlenmiş olur. Ortogonal dizi, ANOVA ve S/N analizi parametre tasarımının en önemli araçlarıdır [14]. Bir deney tasarımı, en uygun ortogonal diziyi seçerek ve ilgili parametreleri uygun sütunlara atayarak yapılır. Optimum koşullar her bir parametrenin ana etkilerini analiz ederek belirlenir [15].

Burada hem ham verilerin etkisi ANOVA analiz yapılarak belirlenmiş, hem de daha sonra S/N veri analizleri yapılmıştır.

Deneyel tasarım da amaç, adsorbent üzerine adsorplanan boyar madde miktarını maksimize etmek üzerine kurulmuştur. Taguchi metodu ile minimum deney sayısı ile en uygun ve optimize edilmiş parametrelerin kombinasyonları belirlenir [16]. Bu çalışmada dört parametre ve her bir parametre için 3 seviye seçildi. 3 seviyeli 4 parametre için mümkün olan toplam deney sayısı $3^4=81$ iken L_9 (3^4) ortogonal dizisi seçilerek 9 deney ile yapılabilir hale gelmiştir.

Bu deney tasarımına göre parametreler ve seviyeleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Ön denemeler ve tecrübelerle dayanarak adsorpsiyonu etkileyebilecek parametreler, sıcaklık (A), başlangıç boya konsantrasyonu(B), pH(C) ve tanecik boyutu(D) olarak seçilmiştir.

Parametrelerin ve seviyelerin bulunduğu ortogonal olarak dizilmiş deney tasarımı Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Parametre seviyeleri

Simge/Parametre	Seviyeler		
	1	2	3
(A) Sıcaklık (°C)	20	28	36
(B) Başlangıç boya konsantrasyonu (mg/L)	40	80	120
(C) pH	3	6.5	10.5
(D)Tanecik boyutu (mm)	(-0.425)	(-0.600+0.425)	(-2+0.600)

Tablo 2. L_9 Ortogonal deney planı

Deney No	Parametreler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Deneylerden elde edilen sonuçlar Taguchi metodunda S/N oranlarına dönüşür. S/N oranı ortalama karakteristiğın kalitesini ve ortalama civarındaki varyansı bir arada ifade eden bir orandır. S/N oranı kontrol edilemeyen faktörlerin varyasyonlarını azaltır. Bu oranı üç şarta göre hesaplayan S/N oranı vardır. Bu çalışmada kullanılan “en büyük en iyi” değerine ait hesaplama Eşitlik (3)’ de verilmiştir [17].

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (3)$$

C. ANOVA Analizi

ANOVA analizi kalite karakteristiğini önemli ölçüde etkileyen parametreyi belirlemektir. Taguchi yönteminde parametrelerin birbirine bağlı karşılaştırmalı olarak kaliteyi ya da cevap değişkenini etkilediğinden her bir parametrenin katkısı ayrı ayrı görülemez. ANOVA analizi ile hangi parametrenin kaliteyi ne kadar etkilediği hesaplanabilir [18].

Optimum şartların belirlenmesinden sonra optimum şartlarda ortalama değer (μ_{opt}) tahmin edilebilir. ANOVA analizi ile optimize edilen parametrelerin önem düzeyi belirlenir. Buradaki ortalama değer yalnızca deneylerden elde edilen sonuçların ortalamasına dayalı bir nokta tahminidir [19]. μ_{opt} aşağıdaki Eşitlik (4)’ den hesaplanır.

$$\mu_{opt} = \bar{T} + \sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{T}) \quad (4)$$

\bar{T} : tüm yanıtların ortalaması, μ_i ; optimum şartlarda parametrelerin tekil olarak adsorpladığı boya miktarıdır. Optimize edilen sonuçlar güven aralığında kontrol edilir. Güven aralığı gerçek ortalamanın bulunduğu aralığı yani maksimum ve minimum değerleri verir. Güven aralığını hesaplamak için aşağıdaki Eşitlik (5) kullanılmıştır.

$$CI = \sqrt{\frac{F_{\alpha}(1-f_e) * V_e}{n_e}} \quad (5)$$

Burada $F_{\alpha}(1-f_e)$, serbestlik derecesi 1' e karşı $(1-\alpha)$ güven seviyesinde F oranıdır. f_e hatanın serbestlik derecesi V_e ise hata varyansdır ve her ikisinde ANOVA tablosundan elde edilir. n_e , Eşitlik (6)' dan hesaplanır.

$$n_e = \frac{N}{1 + \text{ortalamanın tahmini ile ilgili toplam S.D}} \quad (6)$$

N, toplam deney sayısını ifade eder.

III. HESAPLAMALAR VE TARTIŞMA

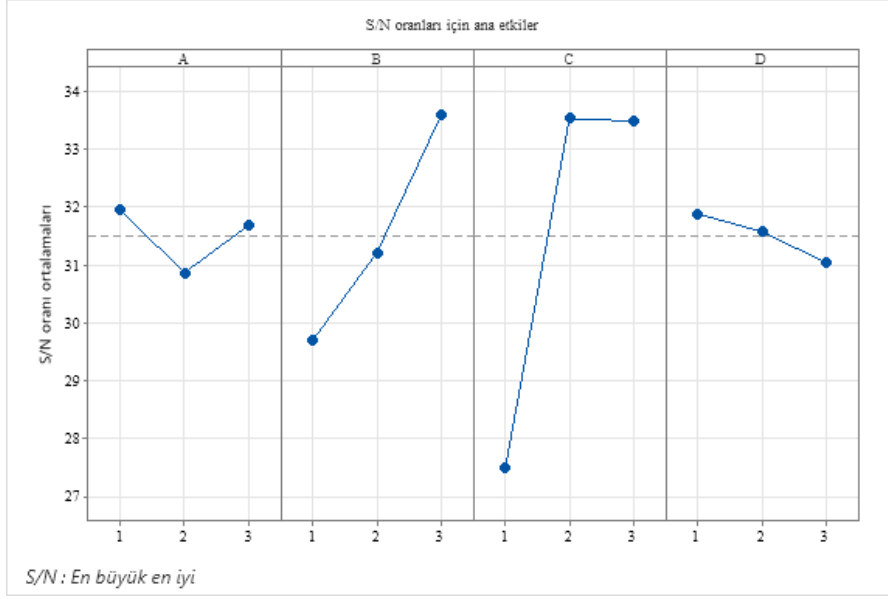
A. Deneysel Sonuçlar

Yapılan deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar ve S/N oranları Tablo 3' de verilmiştir. Şekil 1 ve 2' de ise ham verilerde parametrelerin S/N oranları ve ortalamalar üzerine ana etkileri görülmektedir. Tablo 4 ve 5' de ise S/N oranları ve ortalamalar için etkinlik değerleri yer almaktadır. Şekil 1 ve 2 incelendiğinde, A parametresi sıcaklık, 1. seviyede (20 °C), B parametresi başlangıç boya konsantrasyonu, 3. seviyede (120 mg/L), C parametresi pH, 2. seviyede (pH=6.5) ve D parametresi tanecik boyutu, 1. seviyede (-0.425 mm) performansı en yüksek ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla parametreler ve optimum seviyeleri gösteren ifade $A_1B_3C_2D_1$ şeklindedir.

Tablo 3. Deney sonuçları

Deney No	Parametreler				q _e	q _e	%Giderim	%Giderim	S/ N oranı
	A	B	C	D	1.Tek.	2.Tek.	1.Tek.	2.Tek.	
1	1	1	1	1	20.69	21.73	3.48	8.69	26.52
2	1	2	2	2	49.61	47.92	97.40	96.98	33.76
3	1	3	3	3	60.30	59.45	67.17	65.76	35.54
4	2	1	2	3	34.56	33.50	72.84	67.50	30.63
5	2	2	3	1	44.48	44.27	83.46	82.83	32.94
6	2	3	1	2	28.08	28.42	13.47	14.04	29.02
7	3	1	3	2	39.54	39.52	97.73	97.62	31.94
8	3	2	1	3	22.29	22.15	5.40	5.38	26.93
9	3	3	2	1	64.94	63.73	74.91	72.89	36.16

Şekil 1 ve 2 incelendiğinde q_t değerini en çok etkileyen parametre pH olarak görülmektedir. Birinci pH seviyesinde pH değeri 3 olduğundan ortam asidiktir. Asidik ortamda adsorbent yüzeyi H^+ iyonları fazlalığından dolayı pozitif yüklüdür. Bu sebeple katyonik metilen mavisi adsorbent yüzeyi tarafından itilecektir. pH' ın artması ile OH^- iyonları ortamda artacak ve adsorbent yüzeyi negatif yüklenecektir. Dolayısıyla katyonik bir boya olan metilen mavisinin elektriksel etkileşimden dolayı tutulumu artacaktır. pH değerinin ikinci seviyesi optimum noktadır. İkinci seviyeden sonra pH artışı ile adsorplanan metilen mavisi miktarında değişiklik olmamıştır [20]. q_t değerini etkileyen bir diğer parametre ise başlangıç boya konsantrasyonudur. Başlangıç boya konsantrasyonu için optimum nokta, en yüksek konsantrasyon olan 3 seviyedir. Konsantrasyon arttıkça, kütle transferi için gerekli olan sürüklenme gücü artar ve aynı zamanda sınır tabaka direncini azaltır. Böylelikle daha fazla metilen mavisinin adsorplanması sağlanır[21]. Tanecik boyutu için optimum nokta en düşük seviye olan 1. seviye olarak görülmektedir. Tanecik boyutu arttıkça adsorplanan metilen mavisi miktarında azalma görülmektedir [22]. Çünkü tanecik boyutunun artması ile adsorbent daha az aktif merkez alanına sahip olacak ve adsorbent ile metil mavisinin tutulumu azalacaktır [23]. Sıcaklığın ise 1. seviyesi q_t değerini maksimum yapmak için en iyi seviyedir.



Şekil 1. Faktörlerin q_1 değerinin etkileri ve S/N oranları

Tablo 4. Parametrelerin S/N cinsinden etki değerleri

Seviyeler	(A) Sıcaklık (°C)	(B) Başlangıç boya konsantrasyonu (mg/L)	(C) pH	(D) Tanecik boyutu (mm)
1	31.94	29.70	27.50	31.88
2	30.87	31.21	33.52	31.57
3	31.68	33.58	33.47	31.04



Şekil 2. Faktörlerin q_1 değerine etkileri ve ortalamalar cinsinden gösterimi

Tablo 5. Parametrelerin ortalamalar cinsinden etki değerleri

Seviyeler	(A) Sıcaklık (°C)	(B) Başlangıç boya konsantrasyonu (mg/L)	(C) pH	(D) Tanecik boyutu (mm)
1	43.29	31.59	23.90	43.31
2	35.55	38.46	49.05	38.85
3	42.03	50.83	47.93	38.71

B. ANOVA Analizi, Ortalama Tahmini ve Güven Aralığı

Tablo 6' da ANOVA analizine ait veriler gösterilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde metilen mavisinin, RCL üzerine adsorpsiyonunda en önemli katkıyı %62.8 lik oranla pH yapmıştır. Sonra ikinci en büyük katkı %29.6 ile başlangıç boya konsantrasyonundan gelmektedir. Ardından %5.4 ile sıcaklık ve en az katkıyı ise %2.13 ile tanecik boyutu yapmıştır. $P < 0,05$ ise seçilen parametrenin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir. Tüm parametrelerin olasılık değerinin (P) sıfır çıkması tüm parametrelerin istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermiştir.

Tablo 6. ANOVA tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F değeri	P	Yüzdesel Parametre Katkısı(%)
Sıcaklık	2	206.64	103.32	250.22	0.000	5.4
Başlangıç boyakons.	2	1139.63	569.82	1379.98	0.000	29.6
pH	2	2422.82	1211.41	2933.80	0.000	62.8
Tanecik boyutu	2	82.15	41.08	99.48	0.000	2.13
Hata	9	3.72	0.41	1		0.07
Toplam	17	3854.95				

Tablo 5 ve 6'dan elde edilen verilerle parametrelerin optimum seviyeleri için ortalama q_1 değeri Eşitlik (4) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

Tüm sonuçların toplamı $T=725,30$ ve toplam deney sayısı $N=9*2=18$

$$\bar{T} = \frac{T}{N} = 725.30/18 = 40,29$$

$$\mu_{opt} = 40.29 + (43.29 - 40.29) + (50.82 + 40.29) + (49.04 - 40.29) + (43.31 - 40.29) = 65.58 \text{ mg/g bulundu.}$$

$$n_e = \frac{N}{1 + \text{ortalamanın tahmini ile ilgili toplam S.D}} = 2$$

$$CI = \sqrt{\frac{F_{\alpha}(1-f_e) * V_e}{n_{eff}}} = \pm 1.02$$

ANOVA tablosundan $f_e = 17 - 8 = 9$ ve $V_e = 0.41$ olarak hesaplanır. F tablosundan %95 güven aralığında, F değeri 5.12 olarak okunmuştur. Böylece güven aralığı ± 1.02 olarak bulunur. Daha sonra optimum seviyelerde doğrulama deneyi yapılmıştır.

Optimum seviyelerde yapılan doğrulama deneyinde adsorplanan boyar madde miktarı 66.02 mg/g olarak bulunmuştur. Bu hesaplamalar ve sonuçlar Tablo 7' de sunulmuştur.

Tablo 7. Tahmin edilen optimum q_t , güven aralığı ve doğrulama deneyi

Adsorbent	Adsorbat	Optimum Tahmin edilen Değer	Güven Aralığı %95	Doğrulama Deneyi
RCL	Metilen mavisi	65.58	64.56<CI<66.6	66.02

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, metilen mavisinin RCL ile adsorpsiyonunda sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve tanecik boyutu parametreleri Taguchi metoduyla başarılı bir şekilde optimize edilmiştir. 81 tam deney seti gerekirken sadece 9 deney yapılarak parametreler optimize edilmiştir. Seçilen parametre ve seviyelerinde Sıcaklık 20 °C, başlangıç boya konsantrasyonu 120 mg/L, pH=6.5 ve tanecik boyutu (-0.425mm) dir. Ayrıca ANOVA analizinden en önemli parametrenin % 62.8 ile pH olduğu ve bunu %29.6 ile başlangıç boya konsantrasyonu, %5.4 ile sıcaklık ve %2.13 le tanecik boyutunun takip ettiği bulunmuştur. Daha sonra Taguchi optimizasyonu ile tahmin edilen q_t miktarı 65.58 mg/g olarak hesaplanmıştır. Bu değer % 95 güven düzeyinde hesaplanan güven aralığına düşmüştür. Yapılan doğrulama deneyinde adsorplanan metilen mavisi miktarı 66.02 olarak bulunmuştur. Böylece metil mavisinin RCL ile optimizasyonunda kullanılan Taguchi optimizasyon metodunun başarılı bir şekilde uygulanabilir olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Volkan, N., & Ozmetin, E. (2022). Maxilon Blue GRL Boyar Maddesinin İllit Kil Minerali İle Gideriminin Optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1), 216-232. <https://doi.org/10.29130/dubited.863992>
- [2] Namal, O. O., & Kalıpcı, E. (2019). Adsorption kinetics of methylene blue using alkali and microwave-modified apricot stones. *Separation Science and Technology*, 54(11), 1722-1738. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1541469>
- [3] Boughrara, L., Zaoui, F., Guezoul, M., Sebba, F. Z., Bounaceur, B., & Kada, S. O. (2022). New alginic acid derivatives ester for methylene blue dye adsorption: Kinetic, isotherm, thermodynamic, and mechanism study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 205, 651-663. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.087>
- [4] Katheresan, V., Kandedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676-4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- [5] Özdemir, Ç. S. (2019). Equilibrium, kinetic, diffusion and thermodynamic applications for dye adsorption with pinecone. *Separation Science and Technology*, 0(0), 1-9. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1565769>
- [6] Siddiqui, S. I., Rathi, G., & Chaudhry, S. A. (2018). Acid washed black cumin seed powder preparation for adsorption of methylene blue dye from aqueous solution: Thermodynamic, kinetic and isotherm studies. *Journal of Molecular Liquids*, 264, 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.065>
- [7] Jawad, A. H., Abdulhameed, A. S., & Mastuli, M. S. (2020). Acid-fractionalized biomass material for methylene blue dye removal: A comprehensive adsorption and mechanism study. *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 305-313. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1736767>
- [8] Afroze, S., Sen, T. K., Ang, M., & Nishioka, H. (2016). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by novel biomass Eucalyptus sheathiana bark: Equilibrium, kinetics, thermodynamics and mechanism. *Desalination and Water Treatment*, 57(13), 5858-5878. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1004115>
- [9] Tang, Y., Zhao, Y., Lin, T., Li, Y., Zhou, R., & Peng, Y. (2019). Adsorption performance and mechanism of methylene blue by H₃PO₄- modified corn stalks. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(6), 103398. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103398>
- [10] Nayak, A. K., & Pal, A. (2020). Utilization of Lignocellulosic Waste for Acridine Orange Uptake: Insights into Multiparameter Isotherms Modeling with ANN-Aimed Formulation. *Journal of Environmental Engineering*, 146(9), 04020096. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001762](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001762)
- [11] Khare, P., & Kumar, A. (2012). Removal of phenol from aqueous solution using carbonized Terminalia chebula-activated carbon: Process parametric optimization using conventional method and Taguchi's experimental design, adsorption kinetic, equilibrium and thermodynamic study. *Applied Water Science*, 2(4), 317-326. <https://doi.org/10.1007/s13201-012-0047-0>

- [12] Rezaei, H., Haghshenasfard, M., & Moheb, A. (2017). Optimization of dye adsorption using Fe₃O₄ nanoparticles encapsulated with alginate beads by Taguchi method. *Adsorption Science & Technology*, 35(1-2), 55-71. <https://doi.org/10.1177/0263617416667508>
- [13] Yılmaz, C. E., Aslani, M. A. A., & Aslani, C. K. (2019). Helianthus Annuus Çekirdeği Kabuklarında Toryum Sorpsiyonunun Taguchi Metodu Kullanılarak İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(63), 741-747.
- [14] Sohrabi, M. R., Khavaran, A., Shariati, S., & Shariati, S. (2017). Removal of Carmoisine edible dye by Fenton and photo Fenton processes using Taguchi orthogonal array design. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3523-S3531. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.02.019>
- [15] Durán-Jiménez, G., Hernández-Montoya, V., Montes-Morán, M. A., Bonilla-Petriciolet, A., & Rangel-Vázquez, N. A. (2014). Adsorption of dyes with different molecular properties on activated carbons prepared from lignocellulosic wastes by Taguchi method. *Microporous and Mesoporous Materials*, 199, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.08.013>
- [16] Pundir, R., Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2018). Application of Taguchi method for optimizing the process parameters for the removal of copper and nickel by growing *Aspergillus* sp. *Water Resources and Industry*, 20, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.05.001>
- [17] Bayrak, B., Laçın, O., & Saraç, H. (2015). Ham Manyezit Cevherinin Glukonik Asit Çözeltilerinde çözüldürülmeisinin Optimizasyonu. *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi A - Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 16(2), 195-202. <https://doi.org/10.18038/btd-a.35162>
- [18] Zolgharnein, J., & Rastgordani, M. (2018). Optimization of simultaneous removal of binary mixture of indigo carmine and methyl orange dyes by cobalt hydroxide nano-particles through Taguchi method. *Journal of Molecular Liquids*, 262, 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.038>
- [19] Santra, D., Joarder, R., & Sarkar, M. (2014). Taguchi design and equilibrium modeling for fluoride adsorption on cerium loaded cellulose nanocomposite bead. *Carbohydrate Polymers*, 111, 813-821. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.040>
- [20] Benkaddour, S., Slimani, R., Hiyane, H., El Ouahabi, I., Hachoumi, I., El Antri, S., & Lazar, S. (2018). Removal of reactive yellow 145 by adsorption onto treated watermelon seeds: Kinetic and isotherm studies. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.08.003>
- [21] Mashkoo, F., & Nasar, A. (2019). Preparation, characterization and adsorption studies of the chemically modified *Luffa aegyptica* peel as a potential adsorbent for the removal of malachite green from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, 274, 315-327. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.119>
- [22] Kavcı, E. (2021). Malahit yeşili boyar maddesinin çam kozalağı ile adsorpsiyonunun Taguchi metodu ile incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 129-135. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236711>
- [23] Kazemi, S. Y., Biparva, P., & Ashtiani, E. (2016). *Cerastoderma lamarcki* shell as a natural, low cost and new adsorbent to removal of dye pollutant from aqueous solutions: Equilibrium and kinetic studies. *Ecological Engineering*, 88, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.020>



Araştırma Makalesi - Research Article

Effects of Different Irrigation Intervals and Irrigation Levels on Yield and Quality Components of Processing Tomatoes and Economical Analysis

Farklı Sulama Aralıkları ve Düzeylerinin Salçalık Domatesin Verim ve Kalite Bileşenlerine Etkileri ve Ekonomik Analizi

İlker Elmas^{1*}, Ali Kaan Yetik², Hayrettin Kuşçu³

Geliş / Received: 13/10/2022

Reviz / Revised: 17/02/2023

Kabul / Accepted: 24/02/2023

ABSTRACT

This study was carried out to determine the effects of different irrigation intervals (II) and irrigation levels (IL) on yield, quality and net income values of processing tomato cultivation in a sub-humid climatic zone in 2019. A split-plot randomized complete block design with three replicates was used for the field experiments. The II4-days (A) and 8-days (B) were determined as main-plot factor and different IL were established according to 100% (T₁), 80% (T₂) and 60% (T₃) of the cumulative evaporation occurring in the Class A pan were determined as the sub-plot factor. Seasonal crop evapotranspiration (ET) values varied between 419 and 527 mm. The effects of different irrigation strategies on fruit yield, average fruit weight, brix and water productivity values of processing tomato were significant at the p<0.01 level. The greatest fruit yield was obtained in AT₁ treatment with 111.65 t ha⁻¹. The highest water and irrigation water productivity values were obtained from AT₂ as 22.4 kg m⁻³ and 31.4 kg m⁻³ and the lowest values from BT₃ treatment as 16.1 kg m⁻³ and 26.0 kg m⁻³ respectively. The yield response factor (ky) was determined as 1.7 for the growing season. The net income values of different treatments ranged from 213.49 to 5557.54 \$ ha⁻¹ and the net income increased with the augmentation in the irrigation water applied. Based on the study results, AT₁ treatment was recommended to obtain maximum fruit yield and net income. However, in locations with limited water resources, AT₂ treatment which provides a reasonable balance between quality components and water requirements can also be evaluated.

Keywords- Water Productivity, Brix, Yield Response Factor, Net Income

ÖZ

Bu çalışma yarı nemli iklim koşulları altında salçalık domates yetiştiriciliğinde farklı sulama aralıkları ve seviyelerinin; verim, kalite ve net gelir değerleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla 2019 yılında yürütülmüştür. Arazi denemeleri tesadüf bloklarında bölünmüş parseller deneme desenine göre gerçekleştirilmiştir. 4 günlük (A) ve 8 günlük (B) sulama aralıkları ana parselleri, A sınıfı buharlaşma kabından ölçülen buharlaşmanın % 100 (T₁),

^{1*}Corresponding author contact: ilkerelmas16@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-6306-0065>)

Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bursa Uludag University, Bursa, Turkey

²Contact: alikaanyetik@ohu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-1372-8407>)

Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Sciences and Technology, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde, Turkey

³Contact: kuscu@uludag.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9600-7685>)

Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bursa Uludag University, Bursa, Turkey

%80 (T2) ve %60'nın (T3) uygulandığı sulama düzeyi ise alt parselleri belirlemiştir. Sezonluk bitki su tüketimi (ET) değerleri 419 ile 527 mm arasında değişmiştir. Farklı sulama programlarının salçalık domateste meyve verimi, tek meyve ağırlığı, briks ve su verimliliği değerlerine etkileri $p < 0.01$ düzeyinde önemli bulunmuştur. En yüksek meyve verimi değeri 111.65 t ha^{-1} ile AT₁konusundan elde edilmiştir. En yüksek su ve sulama suyu üretkenliği değerleri sırasıyla 22.4 kg m^{-3} ve 31.4 kg m^{-3} ile AT₂'den, en düşük değerler ise 16.1 kg m^{-3} ve 26.0 kg m^{-3} ile BT₃konusundan elde edilmiştir. Sezonluk verim tepki faktörü (ky) 1.7 olarak belirlenmiştir. Farklı konulara ait net gelir değerleri 213.49 ile $5557.54 \text{ \$ ha}^{-1}$ arasında değişmiş, uygulanan sulama suyunun artmasıyla net gelir yükselmiştir. Çalışma sonuçlarına dayanarak, maksimum meyve verimi ve net gelir elde etmek için AT₁konusu önerilmiştir. Sınırlı su kaynaklarına sahip yerlerde, kalite parametreleri ve su ihtiyacı arasında makul bir denge sağlayan AT₂konusu da değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler- Su Üretkenliği, Briks, Verim Tepki Faktörü, Net Gelir

I. INTRODUCTION

Despite the fact that tomato is grown in several locations throughout the world, its homeland is Central and South America. Tomatoes hold a special place among vegetables as an essential component of human nutrition and have a wide range of uses such as frozen, bottled, sauce and pickles in the foodservice industry [1]. According to FAO, 186 million tons (Mt) of 1.1 billion tons of world fresh vegetable production was the tomato in the year of 2020 [2]. China was the leading tomato producing country in 2020 with 64.8 Mt; India was the second with 20.5 Mt and Turkey was the third with 13.2 Mt production [2]. The main reason for Turkey's being an important tomato producer is the abundance of regions with suitable climatic conditions for tomato cultivation [3]. Tomato is one of the vegetables with the highest production and consumption values in Turkey, and its importance in the food sector is growing by the day. TUIK data shows that tomatoes were cultivated in 1 652 035 da of land in Turkey in 2021, with a total yield of 13 095 258 tons [4]. Since tomato is a seasonal vegetable, keeping it fresh is very difficult and shipping expenses are considerable, it is preferable to be processed into other products such as tomato paste. Processing tomatoes are among the most important product categories in the food exports of Turkey [5]. In Turkey, processing tomatoes were cultivated in 35.2% (581 954 da) of the total tomato production area in 2021 and the total production amount was 4 514 736 tons [4].

The yield and quality components of tomato may differ under the effects of both genetic and environmental factors. One of the most essential environmental aspects of tomato production is water. Irregular and insufficient precipitation caused by the effects of climate change creates a risk in tomato farming and makes irrigation a critical input. Efforts should be made to increase productivity in agricultural production by eliminating the problems caused by climate change [6]. Irrigation and irrigation techniques are becoming increasingly important in agricultural production; however, many regions of the world are faced with a shortage of water for agricultural purposes. Water must be used as efficiently as possible in order to produce a high quality agricultural product [7]. Modern water techniques should be used to deal with the threat of water shortage [8]. The drip irrigation method is commonly used for irrigation of field crops as well as horticulture [9]. Drip irrigation methods save significant quantities of water since only a certain area is wetted [10]. In addition, due to the direct penetration of the applied water into the root zone, prevents the use of excess water and increases irrigation efficiency.

Increasing the irrigation water used in processing tomato cultivation increases the yield but remarkably decreases the brix, lycopene, and total polyphenol content [11]. In this context, optimizing the amount of irrigation water is of great importance in terms of both yield and quality parameters. In previous studies, the seasonal water requirements of processing tomatoes were reported as between 89.3-436.9 mm by [12], 503.7-811.7 mm by [13], 248-512 mm by [14] and 96.0-312.0 mm by [15]. Brix, pH, color, and fruit firmness are all key aspects to consider to determine the important quality standards of processing tomatoes [16]. Yavuz et al. stated that quality parameters such as brix, fruit firmness, titratable acidity and pH decrease with the higher irrigation water amount [17]. Favati et al. reported the highest quality values for the processing tomato in the deficit irrigation treatment under Mediterranean climatic conditions [18]. An irrigation strategy was recommended by Patané et al. that applied 50% of the evaporation amount to increase water use efficiency and quality in processing tomatoes [19]. Kamal and El-Shazly stated that the highest fruit quality values were obtained in the treatment that least irrigation water applied under Egyptian conditions [20]. The effects of different irrigation strategies on net income and yield and quality components in processing tomato cultivation in sub-humid climatic zone have not been clearly explained in the literature.

The main objectives of this study are: (i) to examine the effects of different irrigation levels and intervals on the yield and quality; (ii) to determine the most suitable irrigation schedule; (iii) to assess the economic feasibility in relation to irrigation scheduling of processing tomato cultivated under sub-humid climate conditions.

II. MATERIAL AND METHODS

A. Study Site

The study was conducted at Bursa Uludag University Faculty of Agriculture (latitude 40° 11' N, longitude 29° 04' E, altitude 110 m). Table 1 summarizes the physical and chemical features of the soil of the study site. Water holding capacity of experimental soils was 163.3 mm and the soil salinity level was between 0.45-0.79 dS m⁻¹. The irrigation water utilized in the study was classified as C₂S₁ (medium salt and low sodium).

Table 1. Soil characteristic of experimental area

Soil Depth (cm)	Clay	Sand	Silt	Texture	Field Capacity (%)	Wilting Point (%)	Bulk Density (g cm ⁻³)	EC (dS m ⁻¹)	pH	Lime (%)
0-30	49.5	24.32	26.18	Clay	38.17	27.07	1.35	0.45	6.1	0.0
30-60	50.5	23.28	26.22	Clay	40.01	27.03	1.36	0.45	6.4	0.0
60-90	53.5	21.88	24.62	Clay	43.01	26.75	1.34	0.79	7.1	1.3
90-120	40.5	21.64	37.86	Clay	40.05	23.18	1.38	0.64	8.0	43.7

^{EC} electrical conductivity, ^{dS} deciSiemens

The sub-humid climate is dominant in the study site. The average annual precipitation of Bursa Province is 707.6 mm and the month with the most precipitation is December with 101.4 mm. The long-term annual average relative humidity is 66.2% and wind speed is 2.2 m s⁻¹. On the other hand, during the growing season of 2019 the monthly average temperature was 19.6 °C in May, it increased in the following months and the highest average temperature was seen as 24.5 °C in August. The climatic data of 2019 and long-term period are given in Table 2.

Table 2. Climatic properties of study site

Climatic factors	Years	Months				Total / Average
		May	June	July	August	
Precipitation (mm)	2019	40.4	51.2	37.9	39.1	168.6
	LT	50.1	34.1	21.4	16.3	121.9
Min. Temperature (°C)	2019	12.9	17.4	16.6	17.5	16.1
	LT	11.4	14.9	17.2	17.2	15.2
Max. Temperature (°C)	2019	26.3	29.9	30.5	31.5	29.5
	LT	23.8	28.3	30.8	31.0	28.5
Relative Humidity (%)	2019	67.3	68.2	64.9	64.7	66.2
	LT	67.3	68.6	64.6	64.3	66.2
Wind Speed ^a (m s ⁻¹)	2019	2.3	2.9	2.8	3.2	2.8
	LT	2.0	2.0	2.3	2.3	2.2

LT: long-term averages, ^a:Average wind speed (at 2 m height)

B. Experimental Details

A split-plot randomized complete block design with three replicates was used for the field experiments. The irrigation intervals were determined as main-plot factor and different irrigation levels as sub-plot factor. The treatments of the sub-plots were randomly distributed within the blocks. Different treatments of study are summarized in Table 3. Processing tomato variety (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. Heinz 1015) was used as plant material. The seedlings were planted on 3 May 2019 with 140 cm row spacing and 30 cm on-row plant spacing. Each plot was a total 21 m² (4.2 m wide and 5 m long) with 3 rows. The distance between all plots and blocks was set to 2 m. Plants were irrigated by drip irrigation method. A lateral line (16 mm in diameter) was located through each row and emitter spacing was 20 cm. Two days before the planting, soil samples were taken at a soil depth of 0.16, 0.45, and 0.75 m by the gravimetric method, and the difference between the field capacity and the soil moisture was determined. First half of the determined difference (30 mm) was applied as irrigation water to the experimental plots the day before planting, and the other half after planting. Experimental plots were fertilized before planting with nitrogen in the form of ammonium nitrate (33% N, 90 kg ha⁻¹) and phosphorus in the form of triple super phosphate (44% P₂O₅, 120 kg ha⁻¹) was given to all plots [21]. Afterwards, 90 kg ha⁻¹ nitrogen in the form of ammonium sulfate (21% N) was applied on 11 May 2019.

Table 3. Experimental treatments of the study

Main Plots	Sub Plots
Irrigation interval (II)	Irrigation levels (IL)
4 days interval (A)	$K_{pc} = 1.0$ (T ₁)
8 days interval (B)	$K_{pc} = 0.8$ (T ₂)
	$K_{pc} = 0.6$ (T ₃)

K_{pc}: coefficients of Class A pan evaporation

C. Measurements

The amount of irrigation water applied was determined using the evaporation equation from the open water surface [22].

$$I = A \times E_{pan} \times K_{pc} \times P \quad (1)$$

Where I is the irrigation water (L), A is plot area (m²), E_{pan} is the amount of water evaporated from the Class A pan (mm), K_{pc} is the coefficient of Class A pan (determined as 0.6, 0.8 and 1.0 for different treatments) and P is the percentage of wetted area (was determined before each irrigation application so as to be equal to the canopy cover and was never taken below 30%).

Crop evapotranspiration (ET, mm) values of different irrigation treatments were calculated on the basis of soil water budget equation (Equation 2) [23, 24].

$$ET = I + P - R - D \pm \Delta S \quad (2)$$

Where I is the applied irrigation water amount (mm), P is the precipitation, R is the is runoff (mm), D is the drainage below the effective root depth (mm) and ΔS is the soil water content difference between two measurements (mm 90 cm⁻¹). The amount of irrigation water was measured by a water meter for each plot. The changes of soil water content between different measurements were calculated by the gravimetric method. In determining the ET, the water content in the 0-60 cm layer of the soil was taken into account [25]. A possible water content increase in the layer of 60-90 cm was considered as deep percolation and neglected. The runoff is not taken into consideration in the computation for the soil water budget since irrigation water was administered in a regulated manner using the drip irrigation method.

Processing tomato plants from each plot were harvested by hand 7th of August. The fruit yield (t ha⁻¹) was determined by converting the total weight of plants harvested from each treatment to hectare yield. Average fruit weight (g) was determined in fruit samples taken from 10 randomly selected plants in each plot. Afterwards, the quality components of processing tomato were determined on three randomly selected healthy fruits for each plot. The degree of brix, pH value, the color values (L, a, b, C and h) and the fruit firmness (kg cm⁻²) of tomato fruits were determined by using a digital refractometer (HI 96800, Hanna Instruments), pH-meter (Mettler Toledo), colorimeter (CR-10 Plus model, KONICA MINOLTA) and penetrometer, respectively.

D. Water and Irrigation Water Productivity

Water productivity (WP, kg m⁻³) and irrigation water productivity (IWP, kg m⁻³) values of different treatments were calculated by the Equation 3 and Equation 4 [26, 27].

$$WP = \frac{YLD}{ET_a} \quad (3)$$

$$IWP = \frac{YLD}{I} \quad (4)$$

Where YLD is yield of treatments (kg ha⁻¹), ET_a is the seasonal crop evapotranspiration of treatment (mm), I is the seasonal irrigation water amount of treatment (mm).

E. Yield Response Factor

The yield response factor (k_y) determined by the Stewart equation [28, 29]. The Stewart equation (Equation 5) was developed to determine the relationship between relative yield decrease ($1 - Y_a/Y_m$) and relative crop evapotranspiration deficit ($1 - ET_a/ET_m$).

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = k_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (5)$$

Where k_y is the yield response factor, Y_a is the yield obtained from treatment, Y_m is the maximum yield, ET_a is the seasonal crop evapotranspiration of treatment and ET_m is the maximum seasonal crop evapotranspiration.

F. Economic Analysis

The partial budgeting method was used in the economic evaluation of study results [30, 31]. The method is based on comparing the additional benefits and additional costs that will result from different techniques. In this method, net income per unit area ($\$ \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$) and gross income per unit area ($\$ \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$) values were calculated by using irrigation time (h), labor cost per irrigation application ($\$ \text{h}^{-1}$), total irrigation labor cost (assumed that irrigation applications were carried out with drip irrigation system, in 1 ha land and by one worker, $\$$), water fee ($\$$), tomato production expenses (fertilizer, pesticide, seeds, labor cost, fuel oil etc. $\$ \text{ha}^{-1}$), yield (t ha^{-1}) and tomato price ($\$ \text{t}^{-1}$). The prices of labor cost, water fee, tomato production expenses and tomato sales are obtained from Karacabey Tomato Producers Association, Bursa. Financial information provided in TL (Turkish liras) was converted to USD (US dollars) at the current exchange rate of 14 August 2019 (TL 5.59 = USD 1.00).

G. Statistical Analysis

Variance analysis was conducted different probability levels (0.05 and 0.01) to investigate the impacts of different irrigation intervals and levels on the yield and quality components and Duncan test was performed to compare the averages. All statistical values were calculated with the statistical package program IBM SPSS 23 (IBM Statistics for Windows, Version 23). In addition, water-yield relations were determined by regression analysis.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Irrigation Water Amount and Crop Evapotranspiration

The total irrigation water to the different experimental treatments and determined crop evapotranspiration values are given in Table 4. During the cultivation period, a total of 17 irrigation application were made in the treatments that were irrigated with 4-day intervals (A), and a total of 9 irrigation applications made in the treatments that were irrigated at 8-day intervals (B). Seasonal irrigation water amounts varied between 259 and 412 mm. The total amount of precipitation received was measured as 130 mm and differences were observed in crop evapotranspiration values of different treatments. The highest ET was calculated as 527 mm from AT₁, while the lowest ET was calculated as 419 mm from BT₃ (Table 4). [19] reported that the irrigation water requirements of processing tomato ranged between 325-464 mm and 254-386 mm for the first and second year of the study, respectively under Mediterranean climatic conditions. In another study conducted in Mediterranean climatic zone [27], reported irrigation water quantities applied of processing tomato as between 242-404 mm, and seasonal ET values as between 276-406 mm. [32] stated that seasonal irrigation amounts of processing tomato cultivated under semi-arid climatic conditions as between 167.8 mm and 507.12 mm. Seasonal ET values of processing tomato plant cultivated under sub-humid climatic conditions varied between 375 and 596 mm under the effects of different water regimes [14]. [33] reported that the ET values of tomato plant varied between 384 mm and 869 mm. The values of seasonal ET and I of the mentioned studies are similar to our findings. [13] reported highest irrigation water quantities and ET values of processing tomato respectively as 811.7 mm and 863.3mm, while the lowest as 503.7 mm and 516.1 mm, respectively in a semi-arid environment. [34] reported that the amount of irrigation water applied to processing tomato was between 151-208 mm, under greenhouse conditions. [15] stated that seasonal irrigation water amount of tomato ranged from 96 mm to 302 mm in arid climatic zone. The differences between the mentioned studies and current study were attributed to different climatic conditions, irrigation scheduling, soil characteristics and variety of plant material.

Table 4. Seasonal irrigation water amount (I), crop evapotranspiration (ET) and precipitation values (P)

Treatments		I (mm)	ET (mm)	P (mm)
A	T ₁	412	527	130
	T ₂	336	470	
	T ₃	259	422	
B	T ₁	412	524	
	T ₂	336	476	
	T ₃	259	419	

A, B: Irrigation intervals, T₁, T₂, T₃: Irrigation levels

B. Fruit Yield, Water and Irrigation Water Productivity

The mean values and results of ANOVA tests of fruit yield, water productivity (WP) and irrigation water productivity (IWP) are summarized in Table 5. For all parameters, the differences between the experimental treatments were determined to be statistically significant at the 0.01 level (Table 5).

Table 5 shows that more yield was obtained by more frequent irrigation, and total yield of treatment A is 3.4% higher compared to B. In addition, fruit yield increased as the IL increased. Considering the different irrigation levels, the highest average fruit yield with 111.24 t ha⁻¹ was obtained from T₁, followed by T₂ and T₃, respectively. The highest average fruit yields were obtained from treatments AT₁ and BT₁, while the lowest were obtained from AT₃ and BT₃. Besides, the effect of II was found to be statistically significant and higher fruit yield was obtained from the AT₂ than BT₂. [14] reported the similar findings for the highest fruit yield of processing tomato (obtained from the full irrigated treatments) as 100 t ha⁻¹ for the first and as 110 t ha⁻¹, for the second year of study. [27] stated that the highest fruit yield was achieved in full irrigation treatment with 128.7 t ha⁻¹. [33] reported a range between 22.7-72.2 t ha⁻¹ for the yield of tomato plant. In another study conducted in semi-arid climatic zone by [35], the highest yields reported as 72.56 t ha⁻¹ and 68.95 t ha⁻¹ for the first and second year of study.

The determined mean WP and IWP values of treatments are given in Table 5. Effects of irrigation intervals, irrigation levels and II*IL interaction on WP and IWP values were found to be significant at 0.01 level. WP values ranged from 16.1 to 22.4 kg m⁻³, while the highest WP value was seen in AT₂, and the lowest WP value was obtained from the BT₃. IWP values were varied between 26.0-31.4 kg m⁻³, and the highest IWP value determined was in AT₂ treatment, while the lowest IWP value was in treatment BT₃. It can be said that the WP and IWP values were increased with by more frequent irrigation applications. A similar range of WP and IWP values of processing tomato was reported by [36] as 13.1-21.6 kg m⁻³ (WP) and 19.6-30.3 kg m⁻³ (IWP) and by [35] as 12.0-25.7 kg m⁻³ (WP) and 13.5-30.6 kg m⁻³ (IWP). On the contrary, different ranges were determined for the WP and IWP respectively by [37] as 9.9-12.7 kg m⁻³ and 11.4-33 kg m⁻³, by [38] as 3.53-7.17 kg m⁻³ and 3.61-6.87 kg m⁻³ and by [39] as 28.0-29.4 kg m⁻³ (WP).

Table 5. Effects of treatments on fruit yield and water and water productivity

Treatments	Fruit Yield (t ha ⁻¹)	WP (kg m ⁻³)	IWP (kg m ⁻³)
AT ₁	111.65 a ¹	21.2 b	27.1 c
AT ₂	105.50 b	22.4 a	31.4 a
AT ₃	68.34 d	16.3 d	26.4 d
BT ₁	110.84 a	21.2 b	26.9 c
BT ₂	97.89 c	20.6 c	29.2 b
BT ₃	67.36 d	16.1 d	26.0 d
F-test	**	**	**
T ₁	111.24 A	21.2 A	27.0 B
T ₂	101.70 B	21.5 A	30.3 A
T ₃	67.85 C	16.2 B	26.2 C
F-test	**	**	**
A	95.16 a	20.0 a	28.2 a
B	92.03 b	19.3 b	27.3 b
F-test	**	**	**

A, B: Irrigation intervals, T₁, T₂, T₃: Irrigation levels

** Significant at the 1% probability level (P<0.01).

¹ Indicate significant differences at P<0.05 using least significant difference (LSD) test

C. Quality Components

The effects of II*IL interaction on the parameters of average fruit weight, brix, pH, fruit firmness and color were insignificant. On the other hand, both different irrigation levels and intervals had significant effects (p<0.01) on average fruit weight, and different irrigation levels had significant effects on brix values at p<0.01 level (Table 6). The average fruit weight was increased by decreasing water stress; and higher average fruit weight values (80.41 g, mean) were obtained from T₁ treatments. Average fruit weight values with respect to irrigation intervals varied from 71.76 to 73.80 g (Table 6). Present values on average fruit weight comply with the values found by [36] as a range between 56.62 and 71.71 g. The highest value of average fruit weight obtained from AT₁ treatment (81.89 g), while the lowest was from BT₃ (64.66 g). [19] found the highest fruit weight value in full-irrigated treatment as 72.6 g under Mediterranean climatic conditions. [40] obtained a fruit weight value of a maximum 118.32 from their study conducted in subtropical climatic zone. Soil characteristics, climatic factors and irrigation techniques can be shown as the reason for the differences in average fruit weight.

One of the most important quality parameters in processing tomato is brix. The highest brix values were obtained in least irrigated treatments. The brix values increased as water stress increased but did not significantly change with the frequency of irrigation applications (Table 6). [41] and [42] stated that brix values of tomato increase as the applied irrigation water decreases. [35] reported that irrigation levels*mulch interactions had significant effects on brix value at $p < 0.01$ level and determined the maximum brix value as 7.66, while the lowest value as 6.45. [43] found a range between 5.57 and 6.78 for the brix value of tomato under Mediterranean climate conditions.

The effect of both II and irrigation levels on pH was not found to be statistically significant. The highest pH value was obtained as 4.73 from the treatment BT₃, while the lowest pH value was obtained as 4.57 from AT₁ (Table 6). In another study with similar findings conducted by [44] was stated that the effect of trial subjects on pH value was not significant and reported that pH values varied between 4.12 and 4.15. The amount of irrigation water applied to the processing tomato had no significant effects on the pH value [36].

The fruit firmness values of processing tomato were not affected by II and IL (Table 6). Fruit firmness values varied between 1.38-1.13 kg cm⁻² and however, no statistical difference was determined between the applications. [37] stated that the different emitter spacing was not statistically significant on fruit firmness, while authors reported the highest fruit firmness values as 1.25-1.22 kg cm⁻² in full-irrigated treatment for both years, respectively. [36] reported that the effect of cutting time of irrigation on fruit firmness was statistically significant at $p < 0.05$ level and stated that the fruit firmness values of processing tomato varied between 0.86 and 1.13 kg cm⁻² under sub-humid climatic conditions. [25] reported two highest fruit yields as 4.64 kg cm⁻² and 4.03 kg cm⁻² for different locations in Mediterranean climatic zone. The fact that fruit firmness is found to be variable according to the applications in different studies may be due to the genetic characteristics of the variety being more dominant than the irrigation levels applied.

Another important quality parameter of processing tomato is color. According to the Table 6 the L (lightness) values ranged from 36.26 to 36.00, a (redness-greenness) values varied between 38.90 to 35.13, and b (yellowness-blueness) values were between 27.86 to 25.29. The ranges of Chroma (C) and hue angle (h) values were determined as 45.7 to 42.34 and 36.00 to 33.00, respectively. The fact that there is no statistical difference between the results obtained shows that the difference between II and IL have no effect on the color parameters in question. [35] stated that there are no statistically significant differences between L, a and b parameters under the effects of different irrigation level and reported a range of 40.61 to 38.47 for L, 37.39 to 32.16 for a and 30.36 to 27.29 for b. [18] stated that L values were measured between 40.40 to 40.11, a values between 29.94 to 29.62 and b values between 24.91 to 24.01 and reported that the effects of different water stress levels were not found to be statistically significant on tomato color parameters under Mediterranean climatic conditions. [45] reported that L values ranged from 43.58 to 42.99, a values ranged from 29.08 to 27.80, and b values ranged from 30.36 to 29.33, under humid climatic conditions.

Table 6. Effects of treatments on quality parameters

Treatments	Average fruit weight (g)	Brix	pH	Fruit firmness	Color parameters				
					L	a	b	C	h
AT ₁	81.89	5.54	4.57	1.13	36.00	35.13	25.38	44.00	35.83
AT ₂	73.17	6.04	4.64	1.24	36.00	38.90	25.55	42.34	33.00
AT ₃	66.34	6.28	4.63	1.38	36.21	37.00	26.46	45.51	35.49
BT ₁	78.92	5.63	4.67	1.20	36.26	35.71	25.95	44.14	36.00
BT ₂	71.71	6.04	4.66	1.23	36.07	36.49	25.29	44.31	34.81
BT ₃	64.66	6.33	4.73	1.26	36.05	36.80	27.89	45.75	35.71
F-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
T ₁	80.41 A ¹	5.58 C	4.62	1.16	36.13	35.42	25.66	44.02	35.88
T ₂	72.44 B	6.03 B	4.64	1.24	36.03	37.65	27.92	43.32	33.85
T ₃	65.50 C	6.30 A	4.68	1.32	36.13	36.90	27.16	45.63	35.60
F-test	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
A	73.80 a	5.95	4.61	1.25	36.06	37.00	27.46	44.00	34.74
B	71.76 b	6.00	4.69	1.23	36.13	36.33	26.36	44.73	35.47
F-test	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

A, B: Irrigation intervals, T₁, T₂, T₃: Irrigation levels

ns Non-significant

** Significant at the 1% probability level ($P < 0.01$).

¹ Indicate significant differences at $P < 0.05$ using least significant difference (LSD) test

D. Water-yield Relationships

The relationship between processing tomato fruit yield and the total irrigation water applied and crop evapotranspiration are given in Figure 1. It was observed that fruit yield increased in parallel with the increase in both parameters. Polynomial relationship ($R^2 = 0.9859$, $p < 0.01$) was found between the seasonal irrigation water

and the fruit yield values obtained and a linear relationship ($R^2=0.8826$, $p<0.01$) was found between seasonal crop evapotranspiration and fruit yield.

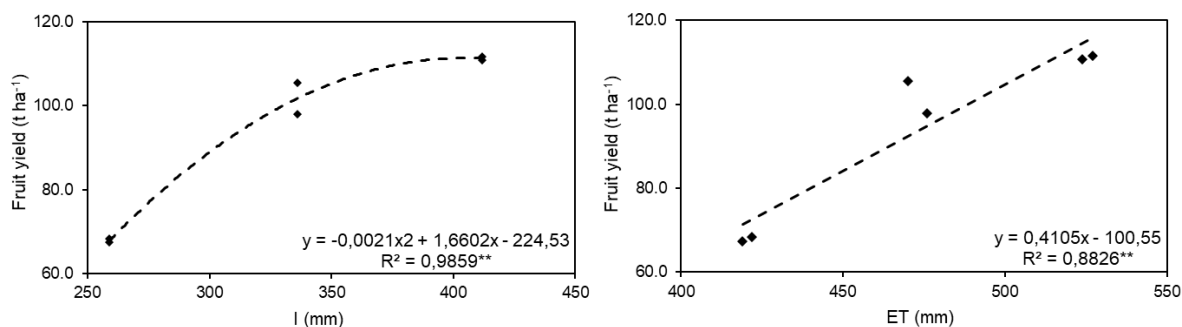


Figure 1. The relations of fruit yield and seasonal irrigation water amount applied (I) and seasonal crop evapotranspiration (ET)

When the results obtained were evaluated, since a linear relationship between fruit yield of processing tomato and seasonal ET values was observed, the yield response factor (k_y) was determined. The relationship of seasonal yield response factors of treatments is given in Figure 2. Seasonal k_y value was determined as 1.71. This value shows that processing tomato fruit yield will decrease by 1.7 units against a 1-unit decrease in ET. In previous studies with the similar findings, [14] reported the 2-yr average k_y value as 1.59 and [21] reported the 2-yr average k_y value as 1.65. In other studies, conducted under different climatic conditions k_y values reported as 1.05 by [29], as 0.55 by [46] and as 0.46 by [13]. The effect here does not only develop depending on the amount of irrigation, but can also change according to the soil structure, cultivation period and other cultural processes except irrigation.

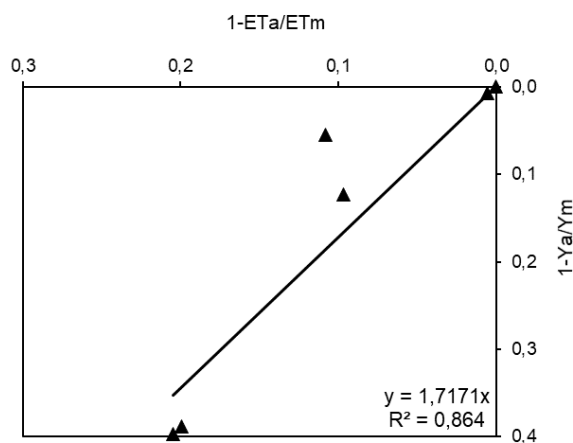


Figure 2. Yield response factor (k_y) of deficit irrigated processing tomato plant

E. Economic Analysis

The economic analysis of the different treatments is given in Table 7 in detail. The gross incomes determined with evaluating investment, operating and production expenses in the study ranged between 8487.36 and 14067.19 \$ ha⁻¹. The highest net income was calculated in AT₁ treatment with 5557.54 \$ ha⁻¹, followed by BT₁ with 5455.48 \$ ha⁻¹. The lowest net income values were determined in least irrigated treatments (AT₃ and BT₃). The net income values decreased with the decreasing of irrigation water amount applied. When the irrigation intervals are compared, lower net income was obtained in 8-day interval treatments (Table 7). [47] stated that net profits varied between 867 to 1493 \$ ha⁻¹. [48] reported the net profits of tomatoes as 1804 and 2513 \$ ha⁻¹ for different agricultural lands. [49] reported that the net income in tomato farming is 7710 \$ ha⁻¹ in Iğdır Province. [50] stated that tomato producers in Nigeria cultivate the tomatoes profitably but the farmers must constantly create different efficiency methods and future studies must be conducted about sustainable production.

Table 7. Economic analysis of different treatments

Trt.	I (m ³ ha ⁻¹) (1)	Irrigation duration (h) (2)	Labor cost per irrigation application (\$ h ⁻¹) (3)	Total irrigation labor cost (\$, 2x3) (4)
AT ₁	4120	35.6	4.1	145.96
AT ₂	3360	29.1	4.1	119.31
AT ₃	2590	22.7	4.1	93.07
BT ₁	4120	35.6	4.1	145.96
BT ₂	3360	29.1	4.1	119.31
BT ₃	2590	22.7	4.1	93.07
	Water fee (\$ m ⁻³) (5)	Water fee (\$ ha ⁻¹ , 1x5) (6)	Tomato production expenses (\$ ha ⁻¹) (7)	Total cost of production (\$ ha ⁻¹ , 4+6+7) (8)
AT ₁	0.12	494.4	7870	8510.36
AT ₂	0.12	403.2	7870	8392.51
AT ₃	0.12	310.8	7870	8273.87
BT ₁	0.12	494.4	7870	8510.36
BT ₂	0.12	403.2	7870	8392.51
BT ₃	0.12	310.8	7870	8273.87
	Yield (t ha ⁻¹) (9)	Processing tomato price (\$ t ⁻¹) (10)	Gross income (\$ ha ⁻¹ , 9x10) (11)	Net income (\$ ha ⁻¹ , 11-8) (12)
AT ₁	111.65	126	14067.9	5557.54
AT ₂	105.5	126	13293	4900.49
AT ₃	68.34	126	8610.84	336.97
BT ₁	110.84	126	13965.84	5455.48
BT ₂	97.89	126	12334.14	3941.63
BT ₃	67.36	126	8487.36	213.49

A, B: Irrigation intervals, T₁, T₂, T₃: Irrigation levels

IV. CONCLUSIONS

The seasonal irrigation water requirements and crop evapotranspiration values of the processing tomato varied between 259-412 mm and 527-419 mm, respectively. The effects of different irrigation intervals, irrigation levels and their interactions on fruit yield and water and water productivity values of processing tomato was significant at the $p < 0.01$ level. As for the quality parameters of processing tomatoes, while the significant effects of different irrigation levels were determined on average fruit weight and brix value ($p < 0.01$) and different irrigation intervals on average fruit weight ($p < 0.01$), the effects of their interactions were insignificant. Fruit yield values determined in the study ranged from 67.36 t ha⁻¹ (BT₃) to 111.65 t ha⁻¹ (AT₁). Fruit yield values decreased as a result of water deficiencies used in processing tomato farming in sub-humid climate conditions. The seasonal yield response factor (ky) was calculated as 1.71. The highest water and irrigation water productivity values were obtained from AT₂ as 22.4 kg m⁻³ and 31.4 kg m⁻³, respectively and the lowest values from BT₃ treatment as 16.1 kg m⁻³ and 26.0 kg m⁻³, respectively. As a result of the economic analysis, the highest net incomes were obtained from the full irrigation treatments for both irrigation intervals. Net income values varied between 156.38 \$ ha⁻¹ and 4394.50 \$ ha⁻¹ and decreased due to the decreasing amount of irrigation water applied.

As a result, since irrigation scheduling has significant effects on fruit yield, quality and net income, it should be planned very carefully. Full irrigation treatment with 4-day interval (AT₁) can be recommended to obtain the highest fruit yield and net income in drip-irrigated processing tomato farming in sub-humid climatic zone. For the locations of limited water resources, taking into account the brix, water and irrigation productivity values AT₂ treatment which provides an appropriate balance between yield, quality and water need can be suggested.

REFERENCES

- [1] Çay, A., & Aykas, E. (2012). Sanayi tipi domates üretiminde farklı toprak işleme ve dikim tekniklerinin ekonomik karşılaştırılması. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(4), 401-409.
- [2] FAO. (2022). *Stats of Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <http://www.fao.org/faostat/en/>
- [3] Keskin, G., & Gül, U. (2004). *Domates*. Tarımsal Ekonomi Araştırma Enstitüsü, Bakış.
- [4] Türkiye İstatistik Kurumu. (2022). *Bitkisel Üretim İstatistikleri* https://tuikweb.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001 (10.07.202).
- [5] Kaya, C., Kirkin, F., & Esin, Y. (2013). Ticari Domates Salçalarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri. *Academic Food Journal/Akademik Gıda*, 11(2).
- [6] Alkan, Ç., & Konukcu, F. (2022). Determination of the Effect of Climate Change on Wheat Yield in the Porsuk Creek Watershed. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 6(2), 318-330.
- [7] Qadir, M., Boers, T. M., Schubert, S., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2003). Agricultural water management in water-starved countries: challenges and opportunities. *Agricultural water management*, 62(3), 165-185.
- [8] Cai, X. (2008). Water stress, water transfer and social equity in Northern China—Implications for policy reforms. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 14-25.

- [9] Ertek, A., & Kanber, R. (2000). Pamukta uygun sulama dozu ve aralığının pan-evaporasyon yöntemiyle belirlenmesi. *Turk J Agric*, 24, 293–300.
- [10] Haynes, R. J. (1985). Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. *Fertilizer research*, 6(3), 235-255.
- [11] Helyes, L., Lugasi, A., & Pék, Z. (2012). Effect of irrigation on processing tomato yield and antioxidant components. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36, 702–709.
- [12] Yazgan, S., Değirmenci, & H., Demirtaş, Ç. (2000). Bursa Koşullarında Sanayi Domatesi Su Verim İlişkilerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(1), 1-9.
- [13] Ertek, A., Erdal, I., Yılmaz, H.I., & Şenyiğit, U. (2012). Water and nitrogen application levels for the optimum tomato yield and water use efficiency. *J. Agric. Sci. Technology*, 14, 889-902.
- [14] Kuşçu, H., Turhan, A., & Demir, A.O. (2014). The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment. *Agricultural Water Management*, 133, 92-103.
- [15] Sun, Q., Wang, Y., Chen, G., Yang, H., & Du, T. (2018). Water use efficiency was improved at leaf and yield levels of tomato plants by continuous irrigation using semipermeable membrane. *Agricultural Water Management*, 203, 430-437.
- [16] Vural, H., Özzambak, E., Eser, B., Eşiyok, B., Yoltaş, T., & Duman, I. (1993). Üstün verim ve teknolojik özelliklere sahip sanayi domatesi çeşitlerinin belirlenmesi. Sanayi Domatesi Üretimini Geliştirme Projesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1, 18.
- [17] Yavuz, M.Y., Yildirim, M., Camoglu, G., & Erken, O. (2007). Effect of different irrigation levels on yield, water use efficiency and some quality parameters on tomato. *The Philippine Agricultural Scientist*, 90(4), 283-288.
- [18] Favati, F., Lovelli, S., Galgano, F., Miccolis, V., Di Tommaso, T., & Candido, V. (2009). Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae*, 122(4), 562-571.
- [19] Patanè, C., Tringali, S., & Sortino, O. (2011). Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 129(4), 590-596.
- [20] Kamal, A. M., & El-Shazly, M.M. (2013). Maximizing the productivity and water use efficiency of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivated in the new reclaimed lands using different irrigation water quantities and some water saving substances. *Journal of Plant Production*, 4(9), 1399-1416.
- [21] Kuşçu, H., Turhan, A., Ozmen, N., Aydinol, P., & Demir, A.O. (2014). Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield, quality, and water productivity of processing tomato. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 55(2), 103-114.
- [22] Cetin, O., & Bilgel, L. (2002). Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton. *Agricultural Water Management*, 54(1), 1-15.
- [23] Garrity, P.D., Watts, D.G., Sullivan, C.Y., & Gilley, J.R. (1982). Moisture Deficits and Grain Sorghum Performance: Evapotranspiration-Yield Relationships. *Agron. J.*, 74, 815-820.
- [24] James, L.G. (1988). *Principles of farm irrigation systems design*. New York, USA, 543 pp.
- [25] Patanè, C., & Cosentino, S. L. (2010). Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agricultural water management*, 97(1), 131-138.
- [26] Bos, M.G. (1980). Irrigation efficiencies at crop production level. *ICID Bull*, 29(2), 18–25.
- [27] Tari, A.F., & Sapmaz, M. (2017). Farklı sulama düzeylerinin serada yetiştirilen domatesin verim ve kalitesine etkisi. *Toprak Su Dergisi*, 6(2), 11-17.
- [28] Stewart, J. I. (1976). Water production functions and predicted irrigation programs for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency. *PB-US National Technical Information Service (USA)*. no. 258051.
- [29] Doorenbos, J., & Kassam, A.H. (1979). *Yield Response to Water*. United Nations FAO. Publication no. 33, Rome.
- [30] Barker, R., Dawe, D., & Inocencio, A. (2003). *Economics of water productivity in managing water for agriculture. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. CABI Publishing, UK, 332-339.
- [31] Kadyampakeni, D. M., Kazombo-Phiri, S., Mati, B., & Fandika, I. R. (2014). Impacts of small-scale water management interventions on crop yield, water use and productivity in two agro-ecologies of Malawi. *Agricultural Sciences*, 5, 454-465.
- [32] Çelebi, M. (2014). The effect of water stress on tomato under different emitter discharges and semi-arid climate condition. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20(5), 1151-1157.
- [33] Çamoğlu, G., Demirel, K., Akçal, A., & Genç, L. (2019). Su stresinin sofralık domatesin verimi ve fizyolojik özellikleri üzerine etkileri. *Bursa Uludağ Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 33(1), 15-30.
- [34] Xiukang, W., & Yingying, X. (2016). Evaluation of the effect of irrigation and fertilization by drip fertigation on tomato yield and water use efficiency in greenhouse. *International Journal of Agronomy*, 3961903.

- [35] Karaer, M., Kuscü, H., & Gultas, H.T. (2021). The Effect of Different Irrigation Levels and Mulch Application On Some Quality Criteria in Table Tomatoes (*Lycopersicon esculentum* mill.). *Applied ecology and environmental research*, 18(4), 5437-5447.
- [36] Aşık, M., & Kuşçu, H. (2021). Hasat Öncesi Sulamayı Sonlandırma Zamanının Damla Yöntemiyle Sulanan Salçalık Domatesin Verim ve Kalitesi Üzerine Etkisi. *Toprak Su Dergisi*, 10(1), 51-59.
- [37] Özbahçe, A., & Tarı, A.F. (2009). Farklı Damlatıcı Aralıklarının ve Sulama Düzeylerinin Salçalık Domatesin Verim ve Kalite Bileşenleri Üzerine Etkisi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2, 63-70.
- [38] Çömlekçioğlu, N., & Şimşek, M. (2014). Yüksek sıcaklık koşullarında ve farklı su seviyesinde gibberellik asidin (GA3) sanayi domatesinde meyve tutumuna etkisi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 24(3), 270-279.
- [39] Zhang, H., Xiong, Y., Huang, G., Xu, X., & Huang, Q. (2017). Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the hetao irrigation district. *Agricultural Water Management*, 179, 205-214.
- [40] Biswas, S. K., Akanda, A. R., Rahman, M. S., & Hossain, M. A. (2016). Effect of drip irrigation and mulching on yield, water-use efficiency and economics of tomato. *Plant, Soil and Environment*, 61(3), 97-102.
- [41] Lopez, J., Ballesteros, R., Ruiz, R., & Ciruelos, A. (2001). Influence on tomato yield and brix of an irrigation cut-off fifteen days before the predicted harvest date in southwestern Spain. *Acta Horticulturae*, 542, 117-125.
- [42] Nas, Y., Duman, İ., & Ul, M.A. (2017). Farklı toprak tiplerinde yetiştirilen sanayi domatesinde son sulama uygulamalarının verim ve meyve kalite özelliklerine etkisi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 54(2), 223-230.
- [43] Giuliani, M.M., Nardella, E., Gagliardi, A., & Gatta, G. (2017). Deficit irrigation and partial root-zone drying techniques in processing tomato cultivated under Mediterranean climate conditions. *Sustainability*, 9(12), 21-97.
- [44] Turhan, A., Özmen, N., Serbeci, M.S., & Seniz, V. (2011). Effects of grafting on different rootstocks on tomato fruit yield and quality. *Hort. Sci.*, 4, 142-149.
- [45] Atikmen, N.Ç., & Kütük, C. (2014). Sakarya Akgöl organik toprağının domates bitkisinin kalite parametreleri üzerine etkisi. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 15(2), 89-94.
- [46] Gatta, G., Giuliani, M.M., Monteleone, M., Nardella, E., & De Caro, A. (2007). *Deficitirrigation scheduling inprocessing tomato. Water Saving in Mediterranean Agricultureand Future Research Needs*, CIHEAM, Bari, 277-289.
- [47] Hanson, B., & May, D. (2004). Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agricultural water management*, 68(1), 1-17.
- [48] Engindeniz, S. (2007). Economic analysis of processing tomato growing: the case study of Torbalı, west Turkey. *Spanish journal of agricultural research*, 5(1), 7-15.
- [49] Karadaş, K. K., & Güler, F. (2021). Iğdır İlinde Domates Üretim Maliyetinin Belirlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(3), 2350-2356.
- [50] Suleiman, N. J., Mani, J. R., Hudu, M. I., Baba, D., & Yusuf, M. (2019). Cost-Benefit Analysis of Tomato Production Among Small-scale Farmers in Kano River Irrigation Project Area of Kano State, Nigeria. *Journal of Agriprenurship and Sustainable Development*, 2(1), 39-46.



Araştırma Makalesi - Research Article

XGBoost Algoritması ile İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu Öznitelik Seçme Tabanlı Jar Kötü Amaçlı Yazılımlarının Tespiti

Jar Malware Detection with XGBoost Algorithm Based on Binary Particle Swarm Optimization Feature Selection

Mahmut Tokmak^{1*}

Geliş / Received: 25/10/2022

Reviz / Revised: 05/12/2022

Kabul / Accepted: 27/01/2023

ÖZ

Java dilini kullanan kötü amaçlı yazılımlarla gerçekleştirilen saldırılar, geçtiğimiz yıllarda hızla artış göstermeye başlamıştır. Bu artışlarla birlikte kötü amaçlı yazılımların kişilere ve kurumlara verebileceği zararlar araştırmacıları otomatik algılama sistemlerini geliştirerek güçlendirmek için farklı makine öğrenme teknikleri geliştirmeye ve test etmeye yöneltmiştir. Bu çalışmada kötü amaçlı Jar dosyalarının tespiti için ikili parçacık sürü optimizasyonu tabanlı öznitelik seçimi ve XGBoost algoritması ile sınıflandırma yapan hibrit bir sistem önerilmiştir. İkili parçacık sürü optimizasyonu algoritmasında minimizasyon sağlanırken kullanılan uygunluk fonksiyonunda rastgele orman algoritması kullanılmıştır. Öznitelik seçimi ile sınıflandırma algoritmasının üzerine düşen hesaplama yükü azaltılarak hız ve performans artırımı hedeflenmiştir. Önerilen modelde 10 kat çapraz doğrulama yapılarak eğitim ve testler gerçekleştirilmiştir. XGBoost algoritması ile yapılan tespit mekanizmasında doğruluk, kesinlik, F1-Skoru, duyarlılık metrikleri ile kurulan modelin performansı ortaya konulmuştur. Önerilen modelin performansının değerlendirilmesi amacıyla AdaBoost, Gradient Boosting, Destek Vektör Makineleri, Yapay Sinir Ağları, Naive Bayes yöntemleri ile testler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen ikili parçacık sürü optimizasyonu tabanlı öznitelik seçimi ve XGBoost algoritması ile sınıflandırma yapan hibrit modelin kötü amaçlı Jar yazılım tespitinde %98.04 doğruluk oranı ile karşılaştırılan modellere göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler- Jar Malware Tespiti, XGBoost, İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu, Öznitelik Seçme

ABSTRACT

Attacks with malware using the Java language have increased rapidly in recent years. With these increases, the damage that malware can cause to people and institutions has led researchers to develop and test different machine learning techniques to improve and strengthen automatic detection systems. In this study, a hybrid system is proposed for the detection of malicious Jar files, which uses binary particle swarm optimization based feature selection and classification with XGBoost algorithm. While minimizing is achieved in the binary particle swarm optimization algorithm, the random forest algorithm is used in the fitness function. With feature selection, it is

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mahmuttokmak@mehmetakif.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0632-4308>)

Yönetim Bilişim Sistemleri, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Zeliha Tolunay Uygulamalı Teknoloji ve İşletmecilik Yüksekokulu, Burdur, Türkiye

aimed to increase speed and performance by reducing computational load on classification algorithm. In proposed model, training and tests were carried out by performing 10-fold cross validation. In detection mechanism made with the XGBoost algorithm, the performance of the model established with Accuracy, Precision, F1-Score, Recall metrics has been demonstrated. In order to evaluate performance of the proposed model, tests were made with AdaBoost, Gradient Boosting, Support Vector Machines, Artificial Neural Networks, Naïve Bayes methods and the results were compared. Experimental results showed that the proposed binary particle swarm optimization-based feature selection and hybrid model classifying with the XGBoost algorithm was more successful in detecting Jar malware than the compared models with an accuracy rate of 98.04%.

Keywords- Jar Malware Detection, XGBoost, Binary Particle Swarm Optimization, Feature Selection

I. GİRİŞ

Java programlama dili, dünya çapında şirketler tarafından dahili ve ticari uygulamalar geliştirmek için en çok tercih edilen dillerden biridir [1]. TIOBE Index olarak da bilinen TIOBE programlama topluluğu endeksine göre, Mayıs 2022'de Java %10.99'luk bir derecelendirme ile en yüksek puan alan programlama dillerinden biri olarak değerlendirilmektedir [2]. Java teknolojisi, çeşitli işletim sistemlerinde ve bilgisayar kontrollü cihazlarda yürütülebilecek uygulamaların geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu nedenden dolayı Java uygulamaları işletim sisteminden bağımsızdır ve taşınabilir özelliktedir. Java uygulamaları JVM (Java Sanal Makinesi) içeren herhangi bir işletim sisteminde yürütülebilmektedirler [3]. Java'nın bu özellikleri kullanım oranını ve popülaritesini artırmaktadır. Java'nın kurumsal web sitesinde bildirdiğine göre; şirket masaüstü bilgisayarlarının %97'sinde bulunan Java'nın dünya genelinde 9 milyon geliştiricisi bulunmaktadır. Bunun yanı sıra 3 milyar cep telefonunda ve 125 milyon TV cihazında Java bulunmaktadır. Dizüstü bilgisayarlardan veri depolama merkezlerine, oyun konsollarından süper bilgisayarlara, cep telefonlarından internete kadar geniş bir yelpazede kullanılıyor olması popülaritesini destekleyen göstergeler olarak ifade edilebilmektedir [4].

Java'nın kullanım istatistiklerinden de gözlemlendiği üzere Java oldukça popüler bir programlama dilidir. Bu nedenle, diğer popüler programlama dilleri gibi, yazılım saldırganları tarafından kötü amaçlı yazılımlar oluşturmak için de yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Özellikle son yıllarda Java tabanlı kötü amaçlı yazılım kullanan saldırı olayları artış göstermektedir [2]. Java kötü amaçlı yazılımları genellikle teknik olarak uç nokta denilen kişisel bilgisayarları ve cihazları hedeflemektedirler. Enfekte olduğu uç noktada, internette gezinme veya yardımcı programları kullanma gibi günlük etkinliklerden kötü niyetli olarak yararlanabilmektedirler. Bu siber zararlılar nedeniyle banka şifreleri, sosyal ağlar, fotoğraflar veya özel videolar ele geçirilebilmektedir [2]. Bu saldırılara karşı koymak için kullanılacak güvenlik yazılımlarının kişisel olarak kullanımının yanında büyük şirketlerde konuşlandırıldığı dikkate alındığında, bu tür teknolojilerin çok hassas, yüksek algılama oranı ve sıfır hatalı pozitif olması gerekmektedir. Zira bu tür şirketlerde, zararlı olmayan bir dosyaya erişiminin kötü amaçlı olarak algılanarak engellenmesi, iş akışını veya üretimini kesintiye uğratabilir. Bunu bilen kötü amaçlı yazılım geliştiricileri, zararlı olmayan dosyalara çok benzeyen dosyalar geliştirerek bu tür saldırıların kesin olarak tespit edilmesinin zorluğunu artırmaktadırlar [1].

Son zamanlarda, Java tabanlı kötü amaçlı yazılımları içeren saldırılar, kötü amaçlı eklentiler veya oltalama e-postaları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir [1,3]. Bu kötü amaçlı yazılım dosyaları, virüslü sistemde çalıştırılabilen Jar (Java Arşivi) dosyalarıdır. Jar dosyaları, ZIP formatına dayalı çapraz platform paket dosya formatıdır. Jar formatı, farklı proje bileşenlerini (Java sınıfı dosyaları, kaynaklar ve ilişkili meta veriler) uygun dağıtım için tek bir arşivde toplamayı amaçlar. Bir Jar dosyası, o platformda Java Runtime Environment (JRE) kurulu olduğu sürece o platformda çalışabilir [1,3,4].

2020 gibi yakın bir geçmişte bilgisayar korsanları, bilgisayarlara Java tabanlı kötü amaçlı yazılımları bulaştırmak için en popüler etkileşimli COVID-19 güncelleme haritalarından birini kullanmışlardır [3]. Birkaç siber suç forumunun üyesi Java tabanlı bir kötü amaçlı yazılım dağıtım planının bir parçası olarak Hopkins etkileşimli haritasını kullanan dijital bir Koronavirüs enfeksiyon kiti satmaya başlamışlardı. Satıcı "Koronavirüs bulaşmış bölgelerin ve diğer verilerin tamamen çalışan çevrimiçi haritası" diye kullanıcıya açıklama getiriyordu [5]. Bu uygulamanın zararsız bir harita olduğunu düşünen kullanıcılar uygulamayı çalıştırdıklarında Jar dosyaları altındaki kötü niyetli Java uygulamaları kullanıcıların bilgisayarlarına yükleniyor ve viral olmuş oluyorlardı. Bu dosyalar, Koronavirüs için etkileşimli, gerçek zamanlı bir veri haritası ve virüslü sistemlerden hassas bilgileri çalmak için bir payload içermekteydi [3,5]. Bahse konu olan nedenlerden dolayı, kötü amaçlı bir Java derlenmiş örneğini tespit etmek için çeşitli yöntemler geliştirmek bir zorunluluk haline gelmiştir. Kötü amaçlı yazılımdan koruma endüstrisinde veya virüsten koruma yazılımlarında kötü amaçlı yazılım algılamaya yönelik geleneksel yaklaşımlar, kötü amaçlı yazılım dosyalarını algılamak için bilinen kötü amaçlı yazılım örneklerinin imzalarını kullanmaktadırlar [6,7]. Ancak günümüzde geleneksel yöntemlerin yerine, makine öğrenme (Machine Learning:

ML) yöntemlerinin kullanıldığı kötü amaçlı yazılım tespit mekanizmaları temel olarak statik analiz, dinamik analiz ve hibrit yöntemler başlıkları altında kategorize edilmektedir [3,8].

Statik analiz yöntemi, tersine mühendislik tekniklerine dayandığı yani kaynak kodların incelenmesi ilkesini benimsediği için herhangi bir gerçek cihaz ya da sanal cihazda çalıştırılmasına gerek duyulmamaktadır. Bu sayede zararlı bir uygulama incelemesi esnasında uygulamanın cihaza zarar verme durumu olmamaktadır. Bu statik analiz yönteminin bir avantajı olarak görülmektedir. Ancak uygulamada kodların anlaşılabilirliğini zorlaştırmak için kod gizleme (obfuscation) gibi yöntemler kullanılmış ise statik analiz yöntemi ile başarı elde edilememektedir ki bu da statik analiz yönteminin dezavantajı olarak görülmektedir [9,10]

Dinamik analiz yöntemi uygulamaların gerçek bir cihaz ya da bir sanal cihaz kullanılarak çalıştırılması ve uygulamanın çalışma zamanındaki davranışlarının takip edilmesi esasına dayanmaktadır. Uygulama çalıştırdıktan sonra uygulamanın sistem üzerindeki etkileri, ağ üzerindeki davranışları, API çağrıları, batarya kullanımı gibi hareketleri takip edilerek geliştirilen yazılımın analizi mümkün olabilmektedir. Statik analiz yönteminde analizi zorlaştırmak için kullanılan kod gizleme yöntemi dinamik analiz yöntemi ile etkisini yitirmiş olacak, analiz esnasında herhangi bir etkisi kalmayacaktır. Bu açıdan dinamik analiz yöntemi statik analiz yöntemine göre avantaj sağlamaktadır. Ancak dinamik analiz yönteminde uygulama çalıştırılarak analiz edildiğinden eğer uygulama zararlı bir uygulama ise gerçek cihazlarda çalıştırıldığında cihaz bundan etkilenecek, zarar görecektir. Bu nedenle uygulamalar sandbox (kum havuzu-sanal cihaz-emülatör) adı verilen sistemlerde çalıştırılması daha uygun görülmektedir. Sanal, izole edilmiş sistemlerin oluşturulması ise maliyet ve zahmet gerektiren bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda dinamik analiz yöntemi statik analize göre süre açısından uzun sürmektedir [9,11].

Hibrit analiz yöntemi, statik analiz yöntemi ve dinamik analiz yönteminin beraber kullanıldığı bir yöntemdir. Hibrit analiz yöntemi genel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, statik özelliklerin çıkarıldığı ilk aşama ve dinamik olarak çıkarılan özelliklerin elde edildiği ikinci aşama şeklindedir [12]. Literatürdeki çalışmalar ışığında örneklendirilecek olursa; izin ve API tabanlı bir çalışma, hibrit analiz yöntemi ile analiz yapacaksa; birinci aşamada manifest dosyasından izinleri statik olarak çıkarmakta ve ikinci aşamada emülatörde uygulama çalıştırılarak API çağrılarını dinamik olarak elde etmektedir. Hibrit analiz yöntemi ile hedeflenen ise statik analiz yöntemi ve dinamik analiz yönteminin dezavantajlarından kaçınarak doğru sonuçlara ulaşabilmektir.

Yapılan Java tabanlı kötü amaçlı yazılım tespit çalışmalarında, ML algoritmaları sıkça kullanılmıştır. Kumar ve Vaishakh [4] kod gizleme yöntemini kullanan Java kötü amaçlı yazılımlarının tespitinde statik analiz yöntemini benimseyerek Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine: SVM), Naive Bayes (NB), C4.5, Random Forest (RF) algoritmalarını kullanmışlardır. Balan ve Popescu [1] kötü amaçlı Jar dosyalarının tespiti için statik analiz yapmışlar ve hiyerarşik kümeleme algoritmasını kullanmışlardır. Obaidat vd. [3] statik analiz ile image tabanlı, derin öğrenme yöntemlerinden Evrimsel Sinir Ağlarını (ESA) kullanmışlardır. Pinheiro vd. [13] kötü amaçlı Jar dosyalarının tespiti için davranışsal yaklaşımla öznitelikleri elde etmişler ve En İyi Eşlenik Gradyan algoritmasıyla sınıflandırma yapmışlardır. Aynı zamanda kullanmış oldukları veri setini paylaşarak yaptıkları diğer çalışmada ise Aşırı Öğrenme Makinelerini kullanmışlardır [2]. Herrera ve Cheney [14], dinamik analize dayanan kötü amaçlı yazılım tespit sistemi önermişlerdir. Önerilen metodoloji, Java tabanlı kötü amaçlı yazılım tespiti için sembolik yürütme, enstrümantasyon ve dinamik analiz olmak üzere üç tekniği birleştirmiştir. Jha vd. [15] Deepmal4j adını verdikleri çalışmada derin öğrenme tabanlı tespit sistemi önermişlerdir. Uzun kısa süreli bellek (Long short-term memory: LSTM) ve geçitli tekrarlayan birim mimarisi (Gated Recurrent Units: GRU) kullanarak Java kötü amaçlı yazılımlarının tespit etmeye çalışmışlardır.

Öznitelik seçimi, bir uzman sistemin sınıflandırma kısmında önemli bir ön işleme yöntemidir [16]. Genel olarak, öznitelik seçimleri, orijinal veri kümesinin bir alt kümesinin optimizasyon probleminde bir çözümle temsil edildiği optimizasyon problemleri olarak kabul edilebilir ve bu problemler kapsamlı ve sezgisel arama yaklaşımları ile çözülebilir [17]. Bununla birlikte, özellikle yüksek veri boyutlarına sahip veri kümesi için kapsamlı arama yöntemleri kullanıldığında hesaplama maliyetleri genellikle kabul edilemez. Bu nedenle, öznitelik seçimi problemlerini çözmek için sezgisel yaklaşımlar daha makul yöntemler olarak kabul görmektedir. Sürü zekası (Swarm Intelligence: SI) algoritmaları, sarmalayıcı tabanlı öznitelik seçim problemleri için verimli buluşsal arama yöntemleridir [18]. ML yöntemlerinde, "değişkenler ne kadar fazlaysa, performans o kadar iyi" inancı bir süredir kabul edilebilir değildir; bu nedenle, öznitelik seçim tekniklerinin uygulanması veri madenciliği alanında hızla popülerlik kazanmaktadır. Makine öğreniminde farklı teknikler ve çeşitli yaklaşımlar (denetimli sınıflandırma veya regresyon, denetimsiz kümeleme, vb.) olmasına rağmen, bir dizi özneliğin (veya özelliğin) değerleriyle temsil edilen örnekler veri kümesi ortaktır. ML algoritmalarının asıl amacı, verideki örüntüleri arayarak özelliklerin değerleri ile istenen sonuç (sınıflandırma veya regresyon modeli, küme kümesi vb.) arasında mümkün olan en iyi eşleştirmeyi bulmaktır. Verinin boyutu arttığında, hesaplama maliyeti de genellikle üstel olarak artar.

Bu sorunun üstesinden gelmek için, dikkate alınan öznelik sayısını azaltmanın bir yolunu bulmak gerekir. Genellikle iki teknik sıklıkla kullanılır: öznelik seçimi ve öznelik çıkarma. Öznelik çıkarma, boyutluluğu azaltmak için diğerlerinin kombinasyonları olarak yeni değişkenler yaratır. Öznelik seçme ise ilgili olmayan veya gereksiz özellikleri kaldırarak çalışır. Bu şekilde, bilgiyi mümkün olduğunca koruyan ve genellikle ML algoritmalarının daha iyi işlemeleri daha verimli bulmasını sağlayan daha az özneliğin üzerine verilerin bir projeksiyonunu arar [17]. Son yıllarda popüler hale gelen sarmalayıcı algoritmaların bir sınıfı, SI algoritmalarıdır. SI algoritmaları arasında, parçacık sürü optimizasyonu (PSO), öznelik seçimi için en yaygın olarak kullanılan algoritmadır. Kötü amaçlı yazılım sınıflandırma alanında dikkate değer bir başarıyla uygulanmıştır [18–21].

Bu çalışmada, kötü amaçlı Jar zararlılarının tahmini için XGBoost algoritması seçilmiştir. Çünkü XGBoost, gradyan artırma makinesi algoritmaları içinde en popüler artırma ağacı algoritmalarından biridir. Problem çözmedeki yüksek performansı ve özellik mühendisliği için minimum gereksinimi nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde GPU kullanımına gereksinim duyabilen derin öğrenme algoritmalarıyla karşılaştırıldığında, XGBoost'un CPU üzerinde çalışan veri kümeleri için kullanımının daha kolay olduğu kabul görmüştür [22]. Modelleme çalışmasından gereksiz parametreleri filtreleyerek doğru matematiksel modeller oluşturmak için öznelik seçimi çok önemlidir [23]. Bu amaçla çalışma kapsamında İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu (İPSO) temelli öznelik seçimi uygulanmıştır. Algoritmada uygunluk fonksiyonunda belirleyici parametre olarak, RF algoritması kullanılarak elde edilen doğruluk değeri kullanılmıştır. Önerilen modelin performansının değerlendirilmesi amacıyla AdaBoost, Gradient Boosting, SVM, Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network: ANN), NB, XGBoost yöntemleri ile testler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

A. Veri Seti

Bu çalışmada UCI Machine Learning Repository'de yer alan REJAFADA veri seti kullanılmıştır [24]. REJAFADA isimli veri seti 998 kötü amaçlı Jar yazılım örneğinden ve 998 kötü amaçlı olmayan Jar yazılım örneğinden oluşmaktadır. REJAFADA veri setinde kötü amaçlı Jar dosyaları, kötü amaçlı yazılım örnekleri deposu olan VirusShare'den edinilmiştir. Kötü amaçlı olmayan Jar dosyaları ise Java2s.com ve findar.com gibi uygulama havuzlarından edinilmiştir. Daha sonra kötü amaçlı olmayan dosyaların tamamı VirusTotal tarafından taratılarak veri setine dahil edilmiştir. Veri setini oluşturan öznelikler Jar dosyalarının dinamik analizi sonucunda elde edilmiştir. Dinamik analizler, Windows 7 sistemi üzerine kurulan bir sanal makine vasıtasıyla Cuckoo kum havuzu (Cuckoo Sandbox) tarafından, Jar dosyalarının gerçek zamanlı olarak çalıştırılması yoluyla yapılmış ve toplamda 6284 öznelik çıkarılmıştır. Bu öznelikler kötü amaçlı yazılımların davranışlarını ortaya koymayı hedeflemektedir ve aşağıdaki kategorilerde başlıklandırılmıştır :[2]

- Sanal makinelerle ilgili öznelikler
- Kötü amaçlı yazılımlarla ilgili öznelikler
- Bitcoin ile ilgili öznelikler
- Botlarla ilgili öznelikler
- Tarayıcılarla ilgili öznelikler
- Güvenlik Duvarı ile ilgili öznelikler
- Bulut bilişim ile ilgili öznelikler
- Windows 7 işletim sistemi ve diğer yardımcı programları devre dışı bırakmaya çalışan öznelikler
- Ağ trafiğiyle ilişkili öznelikler
- Windows 7 İşletim Sistemi (Regedit) ile ilgili öznelikler
- Kum havuzu kullanımıyla ilgili öznelikler
- Fidye Yazılımı ile ilgili öznelikler
- Exploit ile ilgili öznelikler
- Bilgi hırsızlarıyla ilgili öznelikler

B. İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu

PSO sürü davranışlarını esas alan bir eniyileme algoritmasıdır. Algoritma sürüdeki bireylerin, zengin kaynaklara ulaşmak için hedefe en yakın bireyi takip ederek konum ve hız bilgilerini bu bireyi baz alarak

güncellemesi prensibine göre çalışmaktadır PSO'da her çözüm bir parçacık olarak temsil edilir ve her parçacığın bir konumu vardır [25]. Bir parçacığın uygunluk değeri, optimize edilecek olan uygunluk fonksiyonu tarafından değerlendirilir. 1997'de Kennedy ve Eberhart, ayrık ikili değişkenler üzerinde çalışmak için PSO algoritmasının ikili versiyonunu geliştirmiştir. İPSO'da her parçacık, ikili değerlerdeki konumunu temsil eder. Bir parçacığın hızı, parçacığın kendi deneyimine ve diğer parçacıkların deneyimine göre belirlenir. Spesifik olarak, her parçacığın hızı önceki hıza, parçacığın yerel en iyisine ($pBestPos$) ve global en iyisine ($gBestPos$) göre hesaplanır. Parçacığın yerel en iyi konumu, şimdiye kadar ziyaret ettiği en iyi konumdur, oysa global en iyi konum popülasyondaki herhangi bir parçacığın ziyaret ettiği en iyi konum olarak tanımlanmaktadır. Hız bir kayan nokta vektörü olarak temsil edildiğinden, konumları güncellemek için hız değerlerini olasılık değerlerine eşlemek için bir transfer fonksiyonu gereklidir. Hızlar, 0 veya 1 değerini alan bitin olasılığını temsil ederler. Eşitlik 4'teki sigmoid fonksiyon, hızların tüm gerçek değerlerini $[0, 1]$ aralığında olasılık değerlerine dönüştürmek için kullanılır. Hızları olasılık değerleriyle değiştirdikten sonra, konum vektörleri Eşitlik 5'teki gibi hızlarının olasılığı ile güncellenebilir. [16]

$$v_{ij}^{t+1} = wv_{ij}^t + c1 \times rand \times (pBestPos_{ij}^t - x_{ij}^t) + c2 \times rand \times (gBestPos^t - x_{ij}^t) \quad (1)$$

$$pBestPos_i^{t+1} = \begin{cases} pBestPos_i^t & \text{if } f(x_i^{t+1}) \geq f(pBestPos_i^t) \\ x_i^{t+1} & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$gBestPos^{t+1} = \begin{cases} gBestPos^t & \text{if } f(x_i^{t+1}) \geq f(gBestPos^t) \\ x_i^{t+1} & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$T(v_{ij}^t) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}^t}} \quad (4)$$

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } rand < T(v_{ij}^{t+1}) \\ 0 & \text{if } rand > T(v_{ij}^{t+1}) \end{cases} \quad (5)$$

Eşitlik 1'de v_i^t parçacığın t yinelemesindeki hızıdır, w bir eylemsizlik ağırlığıdır, $c1$ ve $c2$ hızlanma sabitleridir, $rand$ 0 ile 1 arasında bir rastgele sayıdır, x_i^t t yinelemesinde i parçacığının mevcut konumudur, f uygunluk fonksiyonudur, $pBestPos_i$, i . parçacığın şimdiye kadar elde ettiği en iyi çözümdür ve $gBestPos_i$, t yinelemesinde o ana kadar elde edilen en iyi çözümü gösterir. Ayrıca, maksimum hız (V_{max}) üzerinde bir sınıra izin verilerek, optimizasyon sürecinin yakınsama oranı kontrol edilebilir. İPSO prosedürü aşağıdaki gibidir:

1. Parçacıkları rastgele konum ve hızlarla başlat.
2. Popülasyondaki her parçacığın uygunluk değerini hesapla
3. i parçacığının uygunluk değeri $pBestPos$ değerinden küçükse, $pBestPos$ değerini i parçacığının konumuna ayarla (Eşitlik 2)
4. Herhangi bir $pBestPos$ güncellenirse ve uygunluk değeri mevcut $gBestPos$ değerinden küçükse, $gBestPos$ 'u i parçacığının mevcut $pBestPos$ 'u olarak ayarla (Eşitlik 3)
5. En iyi uygunluk değeri veya maksimum iterasyon şartı sağlanmışsa yinelemeyi durdur, aksi takdirde 2. adıma geri dön

C. XGBoost Algoritması

XGBoost, Chen ve Guestrin tarafından geliştirilen bir topluluk ağacı algoritmasıdır [26]. Friedman'ın gradyan artırma algoritmasına dayalı olarak geliştirilmiştir [27,28]. XGBoost, tahmin performansı tek başına kullanılan bireysel tekniklerden daha iyi olan, birleştirilmiş bir model üretmek için karar ağaçlarının verimli bir şekilde uygulanmasından oluşan kolektif bir modeldir. Model karmaşıklığını azaltmak, aşırı öğrenmeyi önlemek ve öğrenme sürecini daha hızlı hale getirmek için amaç fonksiyonunda normalizasyon kullanılmaktadır [29].

XGBoost algoritmasının açıklaması aşağıdaki gibidir:

$D_1 = \{(x_i, y_i)\}$ n örnek ve m özellikten ($|D_1| = n, x_i \in R^m, y_i \in R$) oluşan bir veri kümesi olsun. Kolektif ağaç modeli (Eşitlik 6), çıkışı tahmin etmek için K toplamsal fonksiyonunu kullanır [30].

$$\hat{y}_i = \phi(x_i) = \sum_{k=1}^K f_k(y_i), f_k \in \mathcal{F} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da F , regresyon ağaçlarının uzayıdır ve $F = \{f(x) = \omega_{q(x)}\}(q: R^m \rightarrow T, \omega \in R^T)$ şeklinde tanımlanır. Burada q ağaçların yapısını, w yaprağın ağırlığını ve T ağaçtaki yaprak sayısını gösterir. Ayrıca f_k terimi, bağımsız bir ağaçla ilgili q ve w 'ye karşılık gelen bir fonksiyondur. XGBoost'un amaç fonksiyonu şu şekilde minimize edilir:

$$\mathcal{L}(\phi) = \sum_l l(\hat{y}_i, y_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (7)$$

$$\Omega(f_k) = \gamma T + \frac{1}{2} \alpha \|\omega\|^2$$

Eşitlik 7'de l , ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki farkı hesaplamak için kullanılan dışbükey bir kayıp fonksiyonudur, \hat{y}_i tahmin edilen değer, y_i ölçülen değerdir, t hataları en aza indirmek için yineleme sayısıdır, Ω aşırı öğrenmeyi önlemek için modelin karmaşıklığını cezalandıran bir düzenleme terimidir [31].

Eşitlik 7'deki ağaç topluluğu modeli, parametre olarak fonksiyonları içerir ve Öklid uzayında geleneksel optimizasyon yöntemleri kullanılarak optimize edilememektedir. Bunun yerine, model eklemeli bir şekilde eğitilir. Biçimsel olarak, $\hat{y}_i^{(t)}$ t . yinelemede i . örneğin tahmini kabul edilirse, Eşitlik 8'deki amaç fonksiyonunu minimize etmek için Chen ve Guestrin f_i 'nin eklenmesini önermişlerdir [26].

$$\mathcal{L}^{(t)} = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(x_i)) + \Omega(f_t) \quad (8)$$

$$\mathcal{L}^{(t)} \cong \sum_{i=1}^n \left[l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) + g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t^2(x_i) \right] + \Omega(f_t) \quad (9)$$

Eşitlik 9'da $g_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}} l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)})$ ve $h_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}}^2 l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)})$ kayıp fonksiyonu üzerine birinci ve ikinci dereceden gradyan istatistikleridir. Adım t 'de Eşitlik 10'daki basitleştirilmiş hedefi elde etmek için sabit terimler kaldırılabilir.

$$\tilde{\mathcal{L}}^{(t)} = \sum_{i=1}^n \left[g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t^2(x_i) \right] + \Omega(f_t) \quad (10)$$

$I_j = \{i \mid q(x_i) = j\}$ yaprağının örnek kümesi olarak tanımlandığında; Eşitlik 10'daki Ω , Eşitlik 11'deki gibi genişletilerek yazılabilir.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{L}}^{(t)} &= \sum_{i=1}^n \left[g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t^2(x_i) \right] + \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T w_j^2 \\ &= \sum_{j=1}^T \left[\left(\sum_{i \in I_j} g_i \right) w_j + \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda \right) w_j^2 \right] + \gamma T \end{aligned} \quad (11)$$

Sabit bir $q(x)$ yapısı için, j yaprağının optimal w_j^* ağırlığı Eşitlik 12'de gösterildiği şekilde hesaplanabilir.

$$w_j^* = - \frac{\sum_{i \in I_j} g_i}{\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda} \quad (12)$$

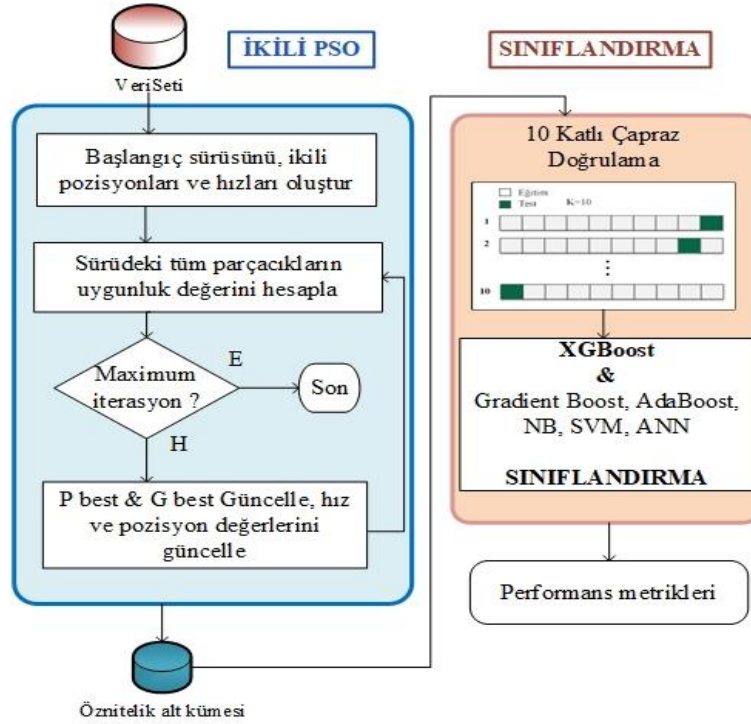
Optimal değer ise Eşitlik 13'e göre hesaplanabilir.

$$\tilde{\mathcal{L}}^{(t)}(q) = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^T \frac{\left(\sum_{i \in I_j} g_i \right)^2}{\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda} + \gamma T \quad (13)$$

Eşitlik 13, bir ağaç yapısının q kalitesini ölçmek için bir puanlama fonksiyonu olarak kullanılabilir. Bu puan, daha geniş bir amaç fonksiyonları yelpazesi için türetilmesi dışında, karar ağaçlarını değerlendirmek için kullanılan safsızlık puanına benzer. Normalde olası tüm q ağaç yapılarını saymak imkansızdır. Bunun yerine, tek bir yapraktan başlayan ve yinelenmeli olarak ağaca dallar ekleyen ağaçgözü bir algoritma kullanılır. I_L ve I_R 'nin bölünmeden sonra sol ve sağ düğümlerin örnek kümeleri olduğunu varsayıldığında, $I = I_L \cup I_R$ iken, bölmeden sonraki kayıp azalması Eşitlik 14'teki gibidir. Bu formül genellikle uygulamada bölünmüş adayları değerlendirmek için kullanılır.

$$\mathcal{L}_{\text{split}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\sum_{i \in I_L} g_i \right)^2}{\sum_{i \in I_L} h_i + \lambda} + \frac{\left(\sum_{i \in I_R} g_i \right)^2}{\sum_{i \in I_R} h_i + \lambda} - \frac{\left(\sum_{i \in I} g_i \right)^2}{\sum_{i \in I} h_i + \lambda} \right] - \gamma \quad (14)$$

III. UYGULAMA



Şekil 1. Önerilen Jar kötü amaçlı yazılım tespit modeli

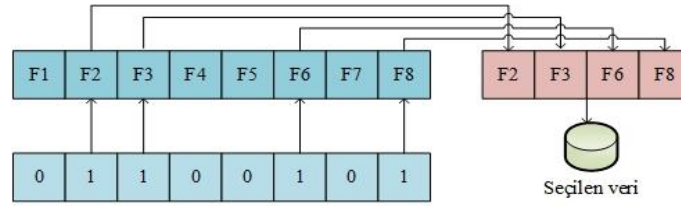
Şekil 1'de görselleştirilen bu çalışmada, modelleme kalitesini iyileştirmek amacıyla öznitelik seçimi kullanılmıştır. Çalışmadaki problem bir sınıflandırma problemidir. Hedefler, model performansının maksimize edilmesi ve kullanılan özniteliklerin sayısının minimize edilmesidir. İPSO algoritması, problemleri en az bilgi ile çözmek için kullanılan metasezgisel algoritmalarından biri olarak kabul edilmektedir [32,33]. Parçacıkların uygunluk değerlerinin hesaplanmasında Eşitlik 15'teki fonksiyon kullanılmıştır [34]. Önerilen yöntemde hedeflenen, uygunluk fonksiyonunun minimizasyonudur. Burada P sınıflandırıcısının performansı, N_f öznitelik alt kümesi yani seçilen özniteliklerin sayısı, N_t veri setindeki toplam öznitelik sayısıdır. α , $[0, 1]$ arasında değer alan, sınıflandırma performansının etkisini kontrol eden ve toplam öznitelik sayısına göre öznitelik alt kümesinin boyutu arasındaki oransal değere karar veren parametredir [34]. Sınıflandırma performansı bu çerçevede en önemli ölçü olduğundan α parametresi 0.99 olarak belirlenmiştir [35,36].

Uygunluk fonksiyonunda sınıflandırıcı olarak, geleneksel olarak kullanılan SVM, En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbours) algoritmaları yerine RF algoritması kullanılmıştır [16,32,34]. Karar ağacı modelleri algoritmadaki sadeleştirmelerinden ve farklı verilere ait öznitelik türlerini işlemede ki esnekliklerinden dolayı oldukça popülerdirler. Bununla birlikte, tek ağaç (single-tree) modeli belirli eğitim verilerine duyarlıdır ve aşırı

öğrenme problemi kolay olmaktadır. Topluluk yöntemleri, bireysel ağaçları birleştirerek bu sorunları çözebilmekte ve tek sınıflandırıcılardan daha doğru sonuçlar üretebilmektedir. Topluluk yöntemlerinden biri olan rastgele orman algoritması, her ağacın rastgele bağımsız bir veri kümesine bağlı olduğu ve ormandaki tüm ağaçların aynı dağılıma sahip olduğu çoklu ağaç tahmincilerinin birleşimi olarak tanımlanabilmektedir. Rastgele ormanın kapasitesi, yalnızca tek tek ağacın gücüne değil, aynı zamanda farklı ağaçlar arasındaki korelasyona da bağlıdır. Tek ağacın gücü ne kadar güçlüyse ve farklı ağaçların korelasyonu ne kadar az olursa, rastgele ormanın performansı o kadar iyi olmaktadır [37]. Eşitlik 15’te kullanılan P parametresi sınıflandırıcı performansı; doğruluk, F-puanı, kesinlik (precision) gibi performans değerlendirme metriklerinden biri olabilmektedir [38]. Rastgele orman algoritmasının performans değerlendirilmesinde P parametresi için doğruluk (accuracy) değeri kullanılmıştır.

$$f(x) = \alpha(1 - P) + (1 - \alpha) \left(1 - \frac{N_f}{Nt}\right) \quad (15)$$

Önerilen algoritmadaki x_i^t parçacığı, t yinelemesinde sürüde i aday çözümünü temsil eder. Sürüdeki i. Parçacık d-boyutlu bir vektörle temsil edilir ve $x_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{id}^t]$ şeklinde tanımlanır. Burada, x_{id}^t , t yinelemesi için i. parçacığın d. boyuta göre konumudur. Öznitelik seçme problemlerinde arama uzayı d-boyutlu durum uzayıdır ve ikilidir. Burada her boyutun ikili değeri, karşılık gelen özelliğin kararını belirtir. Bir öznitelik seçilecekse, karşılık gelen bit değeri bir olarak ayarlanır, öznitelik istenmiyorsa karşılık gelen bit değeri sıfır olarak ayarlanır. Örnek olarak Şekil 2’deki gibi 8 özniteliğin olduğu varsayalım ve her bir parçacık ikili olarak [0 1 1 0 0 1 0 1] temsil edilsin. Bu parçacıkta birinci bit 0 olduğu için F1 özniteliklerinin seçilmeyeceği, ikinci bit 1 olduğu için F2 özniteliklerinin seçileceği anlamına gelmektedir. Sonuçta 1 olan bitler F2, F3, F6, F8 öznitelikleri seçilecektir.



Şekil 2. İkili öznitelik seçimi mekanizması

Bu çalışmada öznitelik seçim yöntemi olarak kullanılan İPSO algoritmasının parametreleri; parçacık sayısı (N), maksimum yineleme sayısı (T), bilişsel faktör (C1), sosyal faktör (C2), eylemsizlik ağırlığı (W), mesafe türü (P: {1: Minkowski p-norm, 2: Öklid mesafesi}), dikkate alınacak komşu sayısı (K)’dir [38]. N, T, C1, C2, W, P, K parametrelerinin değerleri sırasıyla 10, 50, 2, 2, 0.6, 2, 9 olarak seçilmiş ve Python PySwarms kütüphanesi kullanılarak algoritma koşturulmuştur [38]. XGBoost sınıflandırıcı için Python xgboost kütüphanesi ve “default” parametreler kullanılmıştır. AdaBoost, Gradient Boosting, NB, SVM algoritmaları için Python sklearn kütüphanesi kullanılmıştır. ANN içinse Python Keras kütüphanesi kullanılmıştır. Kurulan ANN modeli 1 giriş katmanı, 8 düğümünden oluşan 1 gizli katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu olarak Rectifier Liener Units (RELU) kullanılmıştır. Çıkış katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonu ise sigmoid’dır. Loss parametresi binary_crossentropy, optimizer parametresi adam, batch_size 32, epoch parametresi ise 100 olarak ayarlanmıştır. Diğer dosya yükleme, veri çerçevesinin ayarlanması vb. işlemlerde Python numpy, pandas, statistics kütüphaneleri kullanılmıştır.

Kurulan modelin eğitim ve test başarımının değerlendirilebilmesi için kullanılan; doğru olarak sınıflandırılan örneklerin oranı olan doğruluk değeri Eşitlik 16’da, pozitif olarak tahmin edilen örneklerin gerçekte ne kadarının pozitif olduğunu ifade eden kesinlik değeri Eşitlik 17’de, gerçek pozitif değerlerin ne kadarının doğru olduğunu ifade eden duyarlılık (recall) değeri Eşitlik 18’de, duyarlılık ve kesinlik değerlerinin harmonik ortalaması olan F1-Skoru (F1-Score) Eşitlik 19’da gösterilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (16)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (17)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (18)$$

$$F1 - Skor = \frac{2xDuyarlulukxKesinlik}{Duyarluluk + Kesinlik} \quad (19)$$

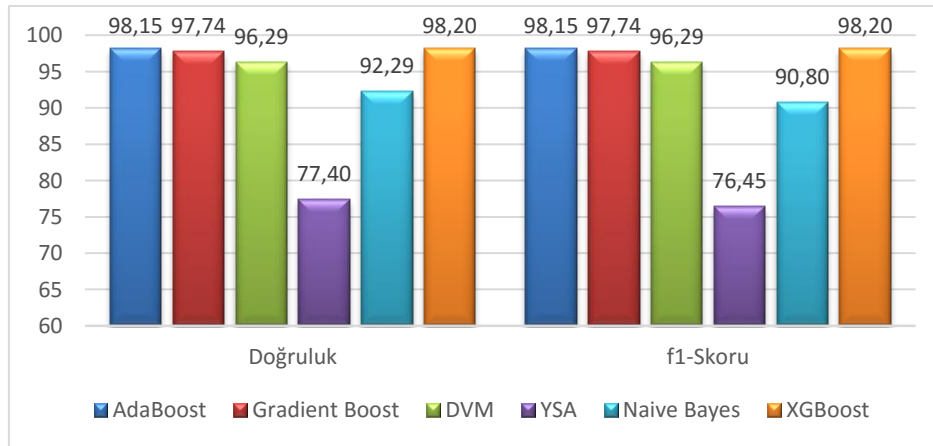
IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen modelin eğitilmesi ve test edilmesi işlemleri için Google Colaboratory ya da kısaca Colab bulut sistemi kullanılmıştır. Bu sistem içerisinde birçok Python kütüphanesini hazır olarak bulundurmakta ayrıca ücretsiz olarak hizmet vermektedir [39]. Önerilen modelin performans metrikleri elde edilirken; tüm algoritmaların koşumunda 10 kat çapraz doğrulama kullanılmıştır. Kullanılan veri setinde 6284 öznitelik bulunmaktadır. Veri seti ilk önce öznitelik seçme işlemi yapılmadan XGBoost algoritması ve diğer ML yöntemleri ile eğitilip test edilmiştir. Elde edilen performans metrikleri Tablo 1’de gösterilmiştir. AdaBoost, Gradient Boosting, SVM, ANN, NB, XGBoost ile elde edilen eğitim doğrulukları sırasıyla 0.9952, 1.00, 1.00, 0.9525, 0.7893, 0.9954 olarak elde edilmiş, test doğruluk değerleri ise sırasıyla 0.9815, 0.9774, 0.9629, 0.9229, 0.774, 0.9820 olarak elde edilmiştir. Ayrıca eğitilen veri setinin test sonuçları olan doğruluk ve F1-Skoru Şekil 3’te görselleştirilmiştir.

Tablo 1. Orijinal veri seti ile performans metrikleri

Sınıflandırıcı	Eğitim				
	Eğitim Süresi (sec)	Doğruluk (Accuracy)	Kesinlik (Precision)	F1-Skoru (F1-Score)	Duyarlılık (Recall)
AdaBoost	93.06	0.9952	0.9952	0.9952	0.9952
Gradient Boosting	221.79	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
SVM	83.74	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
ANN	402.14	0.9525	0.9756	0.9388	0.9526
Naive Bayes	2.60	0.7893	0.8345	0.7818	0.7893
XGBoost	226.70	0.9954	0.9955	0.9954	0.9954

Sınıflandırıcı	Test				
	Test Süresi (sec)	Doğruluk (Accuracy)	Kesinlik (Precision)	F1-Skoru (F1-Score)	Duyarlılık (Recall)
AdaBoost	1.59	0.9815	0.9816	0.9815	0.9814
Gradient Boosting	0.12	0.9774	0.9781	0.9774	0.9774
SVM	6.13	0.9629	0.9634	0.9629	0.9629
ANN	1.15	0.9229	0.9470	0.9080	0.9229
Naive Bayes	0.19	0.7740	0.8237	0.7645	0.7741
XGBoost	0.20	0.9820	0.9824	0.9820	0.9820



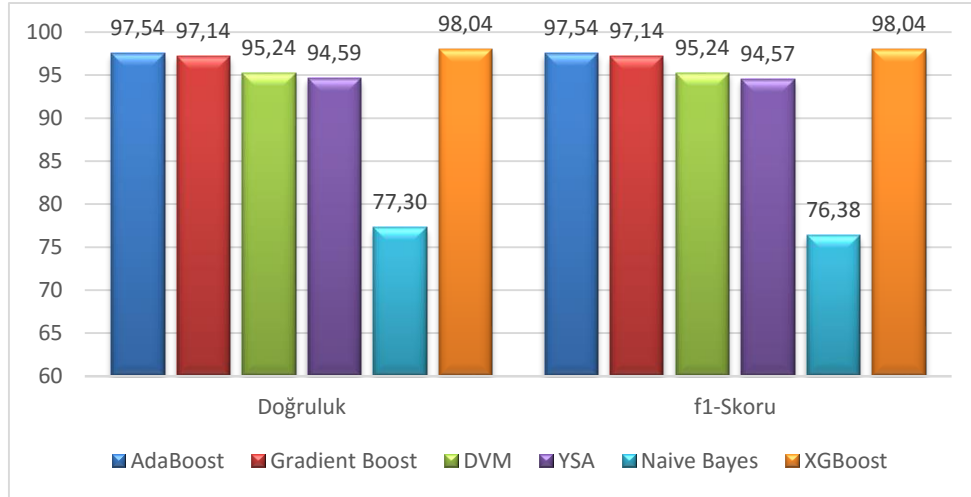
Şekil 3. Orijinal veri seti ile doğruluk ve F1-Skor değerleri

Veri seti daha sonra önerilen RF uygunluk fonksiyonlu İPSO algoritması ile yapılan öznelik seçme işlemine tabi tutulmuş ve öznelik sayısı 3378 olarak elde edilmiştir. Elde edilen öznelikler XGBoost algoritması ve diğer ML yöntemleri ile eğitilip test edilmiştir. Elde edilen performans metrikleri Tablo 2’de gösterilmiştir. AdaBoost, Gradient Boosting, SVM, ANN, NB, XGBoost ile elde edilen eğitim doğrulukları sırasıyla 0.9931, 0.9932, 0.9997, 0.9925, 0.7840, 0.9925 olarak elde edilmiş, test doğruluk değerleri ise sırasıyla 0.9754, 0.9714, 0.9524, 0.9459, 0.773, 0.9804 olarak elde edilmiştir. Ayrıca eğitilen veri setinin test sonuçları olan doğruluk ve F1-Skoru Şekil 4’te görselleştirilmiştir.

Tablo 2. Öznelik seçme işlemi ile performans metrikleri

Sınıflandırıcı	Eğitim				
	Eğitim Süresi (sec)	Doğruluk (Accuracy)	Kesinlik (Precision)	F1-Skoru (F1-Score)	Duyarlılık (Recall)
AdaBoost	47.52	0.9931	0.9932	0.9931	0.9932
Gradient Boosting	50.21	0.9932	0.9932	0.9932	0.9932
SVM	34.97	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997
ANN	188.11	0.9925	0.9927	0.9925	0.9925
Naive Bayes	1.45	0.7840	0.8294	0.7763	0.7841
XGBoost	128.54	0.9925	0.9926	0.9925	0.9925

Sınıflandırıcı	Test				
	Test Süresi (sec)	Doğruluk (Accuracy)	Kesinlik (Precision)	F1-Skoru (F1-Score)	Duyarlılık (Recall)
AdaBoost	0.96	0.9754	0.9756	0.9754	0.9754
Gradient Boosting	0.08	0.9714	0.9718	0.9714	0.9714
SVM	0.63	0.9524	0.9528	0.9524	0.9524
ANN	0.93	0.9459	0.9491	0.9457	0.9459
Naive Bayes	0.11	0.7730	0.8211	0.7638	0.7731
XGBoost	0.13	0.9804	0.9808	0.9804	0.9805



Şekil 4. Öznelik seçme işlemi ile doğruluk ve F1-Skor değerleri

Tablo 3’te literatürde kullanılmış aynı veri seti ve farklı veri setleri ile gerçekleştirilen çalışmalar ile bu çalışmalarda kullanılan yöntemler gösterilmiş ve bu çalışmalarla önerilen çalışmanın başarımlarının karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 3. Farklı çalışmalardaki Jar kötü amaçlı yazılım tespit başarı oranının karşılaştırması

Çalışmalar	Yöntem	Veri Seti	Doğruluk
Balan ve Popescu [1]	Hiyerarşik kümeleme	Bitdefender Cyber Threat Intelligence Laboratory	97.54
Jha vd. [40]	LSTM, GRU	Contagio malware dump	93.33
R. Pinheiro vd. [13]	En İyi Eşlenik Algoritması	REJAFADA	95.61
R. Pinheiro vd. [2]	Aşırı Öğrenme Makineleri	REJAFADA	91.58
Obaidat vd. [3]	Image Tabanlı ESA	Jarhead, VirusTotal, VirusShare, Archive.org VXStream	98.4
Önerilen Çalışma	İPSO tabanlı XGBoost	REJAFADA	98.04

V. SONUÇLAR

Her yıl binlerce kötü amaçlı yazılım geliştirilmektedir ve sürekli olarak artmaktadır. Bu nedenle, kötü amaçlı yazılım tespit mekanizmaları hayati önem taşımaktadır. Kötü amaçlı yazılım tanımlamasında zafiyet meydana geldiği durumlarda, hassas verilerin yetkisiz kişilerce kullanıma sunulması ihtimali vardır [15]. Java kötü amaçlı yazılımları, Java'nın yaygın kullanımı nedeniyle önemli bir güvenlik tehdit kaynağı olmaya devam etmektedir. Bu tehditlerin önlenmesine katkı sunmak adına bu çalışmada İPSO öznitelik seçme tabanlı XGBoost sınıflandırıcı bir model önerilmiştir. Kötü amaçlı jar uzantılı dosyaların davranışsal özniteliklerinin çıkarıldığı REJAFADA adlı veri setinin kullanıldığı çalışmada RF sınıflandırma algoritmasının kullanıldığı uygunluk fonksiyonu ile hem doğruluk hem hız anlamında fonksiyonun minimizasyonuna katkı sağlanmıştır. İPSO algoritması ile seçilen özniteliklere sayısal olarak bakıldığında 3378 öznitelik seçilmiş ve toplam öznitelik sayısına göre %46.24 oranında öznitelik sayısı azaltılmıştır. Yine eğitim ve test sürelerine bakıldığında orijinal veri seti ile önerilen çalışmada elde edilen sonuçlara göre, eğitim için geçen süre %43.4 oranında azaltılmış, test için geçen süre %35 oranında azaltılmıştır.

Seçilen veri seti XGBoost algoritması ile eğitilip teste tabi tutulduğunda elde edilen test sonuçlarına göre; Doğruluk, Kesinlik, F1-Skoru, Duyarlılık değerlerinin sırasıyla 0.9804, 0.9808, 0.9804, 0.9805 olduğu ve diğer algoritmalara göre daha yüksek performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda XGBoost algoritmasının performansının karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla ile literatürde görülen diğer Boosting algoritmalarından olan AdaBoost, Gradient Boosting ve ML tekniklerinden olan SVM, NB, ANN ile seçilen öznitelikleri içeren veri seti eğitilip teste tabi tutulmuştur. Performans metriklerine bakıldığında Boosting algoritmalarının birbirine yakın sonuçlar aldığı, SVM, ANN yöntemlerinin eğitim doğruluklarının yüksek olmasına rağmen test doğruluk oranlarının Boosting algoritmalarına göre nispi olarak geride kaldığı görülmüştür. NB algoritmasında ise eğitim ve test doğruluklarında diğer algoritmalara göre başarı oranının düşük kaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3'e bakıldığında; REJAFADA veri seti üzerinde gerçekleştirilen çalışmalara göre başarı oranının önerilen yöntem ile geliştirildiği gözlemlenmiştir [3, 15]. Obaidat vd'nin yaptığı image tabanlı ESA mimarisinde elde edilen sonuçlarda ise her ne kadar veri seti farklı olsa da yakın sonuçlar elde edilmiştir [5].

Sonuç olarak, kötü amaçlı yazılımların tespiti kullanıcılar ve kurumlar açısından çok önemlidir. Oransal bakıldığında çalışmaların yüksek başarıya ulaşması elbette önemlidir. Ancak tespit edilemeyen kötü amaçlı yazılımın verebileceği zararlar göz ardı edilmemelidir. Bu bağlamda bu çalışmada; İPSO öznitelik seçimli XGBoost algoritması ile bir model kurularak tespit mekanizması oluşturulmuştur. %98.04 oranında doğruluk değeri elde edilmiştir. Ancak uygulanacak yeni öznitelik çıkarma yaklaşımları ve kurulacak yeni modellerle başarı oranının yükseltilmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Balan, G., & Popescu, A. S. (2018). Detecting Java Compiled Malware using Machine Learning Techniques. *2018 20th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNAS)*. 20-23 September, Timisoara, Romania, 435-439.
- [2] Pinheiro, R. P., Lima, S. M., Souza, D. M., Silva, S. H., Lopes, P. G., de Lima, R. D., de Oliveira, J. R., Monteiro, T. de A., Fernandes, S. M., & Albuquerque, E. de Q. (2022). Antivirus applied to JAR malware detection based on runtime behaviors. *Scientific Reports*, *12*(1), 1-17.
- [3] Obaidat, I., Sridhar, M., Pham, K. M., & Phung, P. H. (2022). Jadeite: A novel image-behavior-based approach for Java malware detection using deep learning. *Computers & Security*, *113*, 102547.

- [4] Kumar, R., & Vaishakh, A. R. E. (2016). Detection of obfuscation in java malware. *Procedia Computer Science*, 78, 521-529.
- [5] Krebs on Security. (2020). *Krebs on Security* <https://krebsonsecurity.com/2020/03/live-coronavirus-map-used-to-spread-malware/>, (16.05.2022).
- [6] Ye, Y., Li, T., Adjeroh, D., & Iyengar, S. S. (2017). A survey on malware detection using data mining techniques. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 50(3), 1-40.
- [7] Özgür, A., & Erdem, H. (2018). Feature selection and multiple classifier fusion using genetic algorithms in intrusion detection systems. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 75-87.
- [8] Anıl, U. (2022). Using network traffic analysis deep learning based Android malware detection. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(4), 1823-1838.
- [9] Bhilvare, A., & Manik, T. (2015). An Overview of Different Malware Analysis Techniques in Android. *IJSRD-International Journal for Scientific Research & Development*, 3(1), 368-372.
- [10] Yerima, S. Y., Sezer, S., & McWilliams, G. (2014). Analysis of Bayesian classification-based approaches for Android malware detection. *IET Information Security*, 8(1), 25-36.
- [11] Kulkarni, K. (2018). *Android Malware Detection through Permission and App Component Analysis using Machine Learning Algorithms*. Master's thesis, University of Toledo, Toledo.
- [12] Tong, F., & Yan, Z. (2017). A hybrid approach of mobile malware detection in Android. *Journal of Parallel and Distributed computing*, 103, 22-31.
- [13] Pinheiro, R., Lima, S., Fernandes, S., Albuquerque, E., Medeiros, S., Souza, D., Monteiro, T., Lopes, P., Lima, R., & Oliveira, J. (2019). Next generation antivirus applied to Jar malware detection based on runtime behaviors using neural networks. *2019 IEEE 23rd International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, 06-08 May, Porto, Portugal, 28-32.
- [14] Herrera, A., & Cheney, B. (2015). JMD: a hybrid approach for detecting Java malware. *Proceedings of the 13th Australasian Information Security Conference (AISC 2015)*, 27, Sydney, Australia, 30.
- [15] Jha, P. K., Shankar, P., Sujadevi, V. G., & Prabhakaran, P. (2018). Deepmal4j: Java malware detection employing deep learning. *International Symposium on Security in Computing and Communication*, 389-402.
- [16] Gunasundari, S., Janakiraman, S., & Meenambal, S. (2018). Multiswarm heterogeneous binary PSO using win-win approach for improved feature selection in liver and kidney disease diagnosis. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 70, 135-154.
- [17] Brežočnik, L., Fister, I., & Podgorelec, V. (2018). Swarm intelligence algorithms for feature selection: a review. *Applied Sciences*, 8(9), 1521.
- [18] Ji, B., Lu, X., Sun, G., Zhang, W., Li, J., & Xiao, Y. (2020). Bio-inspired feature selection: An improved binary particle swarm optimization approach. *IEEE Access*, 8, 85989-86002.
- [19] Abbasi, M. S., Al-Sahaf, H., Mansoori, M., & Welch, I. (2022). Behavior-based ransomware classification: A particle swarm optimization wrapper-based approach for feature selection. *Applied Soft Computing*, 121, 108744.
- [20] Ali, Z., & Soomro, T. R. (2018). An efficient mining based approach using PSO selection technique for analysis and detection of obfuscated malware. *Journal of Information Assurance & Cyber security*, 2018, 1-13.
- [21] Dong, D., Ye, Z., Su, J., Xie, S., Cao, Y., & Kochan, R. (2020). A malware detection method based on improved fireworks algorithm and support vector machine. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 846-851.
- [22] Song, K., Yan, F., Ding, T., Gao, L., & Lu, S. (2020). A steel property optimization model based on the XGBoost algorithm and improved PSO. *Computational Materials Science*, 174, 109472.
- [23] Mo, H., Sun, H., Liu, J., & Wei, S. (2019). Developing window behavior models for residential buildings using XGBoost algorithm. *Energy and Buildings*, 205, 109564.
- [24] Dua, Dheeru, & Graff, Casey. (2017). UCI Machine Learning Repository. *University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences* <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/cardiotocography>, (08.03.2022).
- [25] Cimen, M. E., & Boz, A. F. (2019). Parameter identification of a non-minimum phase second order system with time delay using relay test and PSO, CS, FA algorithms. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1), 461-477. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416507>
- [26] Chen, T., & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*. San Francisco, California, USA, 785-794.
- [27] Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 29(5), 1189-1232.

- [28] Zhou, J., Qiu, Y., Khandelwal, M., Zhu, S., & Zhang, X. (2021). Developing a hybrid model of Jaya algorithm-based extreme gradient boosting machine to estimate blast-induced ground vibrations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 145. 104856. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104856>
- [29] Jabeur, S. B., Mefteh-Wali, S., & Viviani, J.-L. (2021). Forecasting gold price with the XGBoost algorithm and SHAP interaction values. *Annals of Operations Research*. 1-21.
- [30] Chen, Y., Guo, A., Chen, Q., Quan, B., Liu, G., Li, L., Hong, J., Wei, H., & Hao, Z. (2021). Intelligent classification of antepartum cardiotocography model based on deep forest. *Biomedical Signal Processing and Control*, 67. 102555. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102555>
- [31] Wang, W., Shi, Y., Lyu, G., & Deng, W. (2017). Electricity consumption prediction using xgboost based on discrete wavelet transform. *DEStech Trans. Comput. Sci. Eng.* 716-729.
- [32] Akbari, H., Sadiq, M. T., Payan, M., Esmaili, S. S., Baghri, H., & Bagheri, H. (2021). Depression Detection Based on Geometrical Features Extracted from SODP Shape of EEG Signals and Binary PSO. *Traitement du Signal*, 38(1)
- [33] Too, J., Abdullah, A. R., Mohd Saad, N., & Tee, W. (2019). EMG feature selection and classification using a Pbest-guide binary particle swarm optimization. *Computation*, 7(1). 12.
- [34] Vieira, S. M., Mendonça, L. F., Farinha, G. J., & Sousa, J. M. (2013). Modified binary PSO for feature selection using SVM applied to mortality prediction of septic patients. *Applied Soft Computing*, 13(8). 3494-3504.
- [35] Faris, H., Mafarja, M. M., Heidari, A. A., Aljarah, I., Al-Zoubi, A. M., Mirjalili, S., & Fujita, H. (2018). An efficient binary Salp Swarm Algorithm with crossover scheme for feature selection problems. *Knowledge-Based Systems*, 154. 43-67. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.05.009>
- [36] Too, J., Abdullah, A. R., & Mohd Saad, N. (2019). Binary competitive swarm optimizer approaches for feature selection. *Computation*, 7(2). 31.
- [37] Xuan, S., Liu, G., Li, Z., Zheng, L., Wang, S., & Jiang, C. (2018). Random forest for credit card fraud detection. *2018 IEEE 15th international conference on networking, sensing and control (ICNSC)*. Zhuhai, China, 1-6.
- [38] Miranda, L. J. (2018). PySwarms: a research toolkit for Particle Swarm Optimization in Python. *Journal of Open Source Software*, 3(21). 433. <https://doi.org/10.21105/joss.00433>
- [39] Google Colaboratory. (2022). *Colaboratory*, <https://colab.research.google.com/>, (10.08.2022).
- [40] Jha, P. K., Shankar, P., Sujadevi, V. G., & Prabhakaran, P. (2018). Deepmal4j: Java malware detection employing deep learning. *International Symposium on Security in Computing and Communication*. 19-22 September, Bangalore, India, 389-402.



Araştırma Makalesi - Research Article

Investigation of Vector Control Applications for Asynchronous Machines Using Online Parameter Estimation Methods

Asenkron Makineler için Çevrimiçi Parametre Tahmin Metotları Kullanılarak Vektör Kontrol Uygulamalarının İncelenmesi

Nihat Pamuk^{1*}

Geliş / Received: 07/11/2022

Reviz / Revised: 19/02/2023

Kabul / Accepted: 14/03/2023

ABSTRACT

Two different methods are used in dynamic model vector control applications of asynchronous machines. The first of these methods is to use the derivative information of the state variables based on the system observability principle. The second is the use of instantaneous active and reactive power measurement results as a new method. The classical equivalent circuit model is used in steady-state studies of parameter estimation methods. In dynamic systems, methods based on nonlinear minimization of the cost function, different initial values, and giving more precise estimation results are used. In this study, the dynamic system structure is set up as the square sum of the difference between parameter estimate values. Different parameter estimation methods were used for asynchronous machine models, and test results under no load and full load were examined. The impedance measurement results in parameter estimation methods were compared with the measurement results obtained from the model. It has been shown that the test results performed in real time are very close to the offline and nonlinear parameter estimation values and their accuracy has been proven.

Keywords- *Asynchronous Machine, Vector Control, Dynamic Model, Parameter Estimation Methods*

ÖZ

Asenkron makinelerin dinamik model vektör kontrol uygulamalarında iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki sistem gözlenebilirlik ilkesine dayanan durum değişkenlerine ait türev bilgilerinin kullanılmasıdır. İkincisi ise yeni bir yöntem olarak önerilen aktif ve reaktif güç ölçüm sonuçlarının anlık olarak paylaşılmasıdır. Parametre tahmin yöntemlerinin kararlı durum çalışmalarında klasik eşdeğer devre modelikullanılmaktadır. Dinamik sistemlerde ise, maliyet fonksiyonunun doğrusal olmayan minimizasyonuna dayanan, başlangıç değerleri birbirinden farklı olan ve daha kesin tahmin sonuçlarıveren yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, dinamik sistem yapısı parametre tahmin değerleri arasındaki farkın karesel toplamı olacak şekilde kurulmuştur. Asenkron makine modelleri için farklı parametre tahmin yöntemleri kullanılmış, yüksüz ve tam yük altındaki test sonuçları incelenmiştir. Empedans ölçüm sonuçları ile, modelden elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Gerçek zamanlı gerçekleştirilen deney sonuçlarının çevrimdışı olarak

*Corresponding Author Contact: nihatpamuk@beun.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8980-6913>)
Electrical Electronics Engineering, Zonguldak Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Farabi Campus, 67100, Zonguldak, Turkey

gerçekleştirilen ve doğrusal olmayan parametre tahmin değerlerine çok yakın oldukları gösterilmiş ve doğrulukları ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Asenkron Makine, Vektör Kontrolü, Dinamik Model, Parametre Tahmin Metotları*

I. INTRODUCTION

Numerous speed control applications of the asynchronous machine that were previously restricted to DC motors have now become viable because of the advancement of vector control theory, the more focused field-oriented method [1,2] and others. Comparing vector-controlled techniques to the conventional voltage frequency method can increase the dynamic response. The accurate real-time estimation of non-measurable variables is the focus of most of the research in vector control and field-oriented applications of the asynchronous machine. To address this issue, several estimating techniques have been presented by scientists [3-5]. The model parameters, which change throughout typical machine operation, are generally what these methods depend on. When the scientist-proposed vector control model is utilized, it is simple to compare the AC machine speed that controls the performance of asynchronous machines with the motor rotation speed of the DC machine [6]. By using mathematical formulas and matrix transformations, vector control can be used to identify the difference between the excitation current and torque current of an asynchronous machine [7,8]. The control approach to be applied in a comparable DC machine can significantly improve the control performance of the asynchronous machine. The majority of the asynchronous machine's parameter estimate techniques is either offline or live. Because the fundamental vector control parameter can be supplied and the operational steps are straightforward, the offline parameter estimate method is typically selected [9].

The asynchronous motor's traditional no-load and full-load rotor tests are connected to the initial concept in parameter estimation. An impedance function can be derived by using the balancing steady-state equivalent circuit for an asynchronous machine. The electrical frequency, the rotor slip, and the corresponding circuit parameters all influence this input impedance. An equivalent procedure for asynchronous machines can be carried out using the streamlined hypothesis set that was used in the transformer circuit parameter estimation technique. A simpler hypothesis can't be used in this situation. However, a preliminary and workable solution to this issue is provided by the transformer parameter estimate approach. A second approach involves building an error feature using the total of the rectangular impedance mismatch values between the size sections and the mathematical model, at least in three unbiased operational places [10]. The optimal parameter estimation results from the error function's absolute minimization. Due to its significant computational delay, non-linear regression is rarely used in real-time applications for minimizing quadratic functions mathematically.

When a constant or nearly constant rotor speed is considered, the instantaneous time response has a linear relationship with the machine parameters and the state variables while the impedance expression in the frequency domain is a non-linear function of the machine parameters. Based on the second and third derivatives of the stator currents and the second derivatives of the stator voltage, several researchers have developed a real-time parameter estimate method utilizing linear regression [11,12]. Equations for the quasi-stationary asynchronous machine are used in this identification technique. The noise that the large-order derivatives of the physical measurements introduce is the fundamental issue with this estimating technique. The scientist is using an adaptive control of the rotor time constant T_r based on the mismatch between the measured instantaneous machine active or reactive power, and the obtained by the mathematical model [13]. This approach is slower than derivative methods and assumes that only the rotor time constant is variable. Combining both ideas, an estimation method has been developed that reduces the derivative order and increases the number of parameters that can be estimated in real-time. This formulation is very simple. Using field-oriented equations or vector spatial theory, the active and reactive equations are derived. Simplifying these equations for steady state solution, one equation is obtained, with three unknown coefficients. A comparison between these four estimation methods was performed to find the electrical parameter of the asynchronous machine model in real-time applications.

II. METHODOLOGY

A. Classical Estimation Method

Using two independent asynchronous machine impedance measurements, one for load condition, and the other near the no-load condition ($s \rightarrow 0$), and the following procedure can be performed:

$$Z_i(s) = Z_s + Z_{sr} + Z_r \quad (1)$$

$$I_r(s) \approx I_s(s) - I_s(s \rightarrow 0) \quad (2)$$

$$R_r = \frac{s}{1-s} \cdot \frac{P_{shaft}}{|I_r(s)|^2} \quad (3)$$

$$X_{\sigma_s} + X_{\sigma_r} \approx 2X_{\sigma_s} \approx \Im m(Z_i(s)) \quad (4)$$

$$X_{sr} = \Im m(Z_{i(s \rightarrow 0)}) - X_{\sigma_s} \quad (5)$$

$$R_s = \Re e[Z_i(s) - (Z_{sr} + Z_r + jX_{\sigma_s})_{s \rightarrow 0}] \quad (6)$$

where:

$$Z_s \equiv R_s + jX_{\sigma_s}; Z_r \equiv R_r + jX_{\sigma_r}; Z_{sr} \equiv jX_{sr} \quad (7)$$

In Equation 7, Z_s is the stator impedance, Z_r is the rotor impedance, R_s is the stator resistance, R_r is the rotor resistance, X_s is the stator admittance, and X_r is the rotor admittance.

B. Non-Linear Estimation Method

Building a least square cost function ψ , with the mismatch between the measured input impedance and the model's input impedance defined in equation (1), a non-linear regression can be performed. The cost function ψ is;

$$\psi = \sum_{k=1}^n \left[\frac{Z_m(s_k) - Z_i(R_s, L_{\sigma_s}, L_{sr}, L_{\sigma_r}, R_r, \omega_s, s_k)}{Z_m(s_k)} \right]^2 \quad (8)$$

Minimizing equation (8), using the Gauss-Newton method [14], descendent gradient method, or any other non-linear minimization method, the five parameters of the asynchronous machine model can be found [15].

C. Derivative Estimation Method

Spatial vectors $\vec{v}(t)$ and $\vec{i}(t)$ has been defined as;

$$\vec{x}(t) \equiv \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \cdot [x_a(t) \quad x_b(t) \quad x_c(t)]^t \quad (9)$$

In the stator reference frame, the asynchronous machine model can be expressed as;

$$\begin{aligned} \vec{v}_s &= R_s \vec{i}_s + L_s p \vec{i}_s + L_{sr} p \vec{i}_r \\ \vec{0} &= R_r \vec{i}_r + L_r [p \vec{i}_r - j\theta \vec{i}_r] + L_{sr} [p \vec{i}_e - j\theta \vec{i}_e] \end{aligned} \quad (10)$$

In Equation 10, θ represents the flux position and p represents the moment of inertia. In differential equations (10), the non-measurable variables \vec{i}_r and $p \vec{i}_r$ can be reduced using the control observability method [16]. The new differential equations are independent of no-measuring variables but have dependence on the voltage derivatives as well as on currents, and their first and second derivative. The second derivative of the rotor position θ and the arbitrary reference position δ are neglected to make a linear model. The results obtained by substitution, explained above, might be written as the following linear problem [17].

$$p \vec{v}_s - j\theta \vec{v}_s = k_1 [p^2 \vec{i}_s - j\theta p \vec{i}_s] + k_2 [p \vec{i}_s] - k_3 [j\theta \vec{i}_s] - k_4 [\vec{v}_s] + k_5 [\vec{i}_s] \quad (11)$$

where:

$$k_1 = L_s; k_2 = R_s + R_r \frac{L_s}{L_r}; k_3 = R_s; k_4 = \frac{R_r}{L_r}; k_5 = R_s \frac{R_r}{L_r} \quad (12)$$

In Equation 12, the k values represent the permeability coefficients. Linear equation (11) can be solved for each instant of time. An error function can be built with the sum of the square errors and minimized it. The error function can be written as:

$$\psi = \sum_{i=1}^n [\vec{f}_{i_{test}} - \vec{f}_{i_{model}}]^t \cdot [\vec{f}_{i_{test}} - \vec{f}_{i_{model}}] \quad (13)$$

Calculating the cost function minimum value (13) the following parameter vector can be found:

$$[k] = \left[\sum_{i=1}^n [w_i]^t \cdot [w_i] \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n [w_i]^t \cdot [h_i] \right] \quad (14)$$

where:

$$\begin{aligned} [h_i] &= \left[p\vec{v}_{si} - j\theta\vec{v}_{si} \right] \\ [w_i] &= \left[p^2\vec{i}_{si} - j\theta p\vec{i}_{si} \quad p\vec{i}_{si} \quad j\theta\vec{i}_{si} \quad \vec{v}_{si} \quad \vec{i}_{si} \right] \\ [k] &= [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5]^t \end{aligned} \quad (15)$$

In Equation 15, h_i represents the friction of the motor and w_i represents the cavity diameter. Once the vector $[k]$ is obtained, the electrical machine parameters can be evaluated in the following way:

$$R_s = k_3; L_s' = \frac{k_2 - k_3}{k_4}; T_r = \frac{1}{k_4}; \frac{L_{sr}'^2}{L_r} = L_s' - k_1 \quad (16)$$

D. Active and Reactive Power Estimation Method

The phasor apparent power has been defined as:

$$\vec{S} = \vec{V} \cdot \vec{I}^* = V e^{j\alpha} \cdot I e^{-j\beta} = V \cdot I e^{j\phi} = P + jQ \quad (17)$$

In the spatial vector representation, a similar expression can be obtained:

$$\vec{s}(t) = \vec{v}(t) \cdot \vec{i}^*(t) = v(t) \cdot i(t) e^{j\phi(t)} = p(t) + jq(t) \quad (18)$$

From equations (18) and (9) the instantaneous active and reactive power can be written as:

$$p(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (19)$$

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{bc} i_a + v_{ca} i_b + v_{ab} i_c) \quad (20)$$

The instantaneous active power obtained in equation (19) agrees with the classical three-phase definition. Equation (20) defines the spatial vector concept of the instantaneous reactive power. It could be shown that these power definitions are closely related to the pointing vector on the air gap of the asynchronous motor. Definitions (19) and (20) are expressed in function of the original voltages and currents. Using the generic orthogonal coordinate system, with the arbitrary angular position δ as a reference, the spatial vectors in this frame are:

$$\vec{x}^{-\delta} = e^{-j\delta} \vec{x} = x_d + jx_q \quad (21)$$

The instantaneous active and reactive power in the arbitrary and orthogonal reference frame can be expressed as:

$$\vec{s} = p + jq = \vec{v}^{-\delta} \cdot \vec{i}^{\delta*} = \vec{v} \cdot \vec{i} = (v_d i_d + v_q i_q) + j(v_q i_d - v_d i_q) \quad (22)$$

From equations (19), (20), and (22), it follows that the instantaneous active and reactive power can be evaluated either on the primitive coordinate system or on the arbitrary reference frame. The field-oriented equations of the asynchronous machine can be written as [18]:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \tilde{L}_s p i_{ds} - \delta \tilde{L}_s i_{qs} + \frac{L_{sr}'^2}{L_r} p i_m \quad (23)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \tilde{L}_s p i_{qs} + \delta \tilde{L}_s i_{ds} + \delta \frac{L_{sr}'^2}{L_r} i_m \quad (24)$$

$$0 = T_r p i_m + i_m - i_{ds} \quad (25)$$

$$0 = T_r i_m (\delta - \theta) - i_{qs} \quad (26)$$

where; T_r rotor time constant L'_r / R_r , and \tilde{L}_s total referred stator inductance $L'_s - L'_{sr}{}^2 / L'_r$. Replacing equations (23) and (24) into (22), the instantaneous active and reactive power equations in an oriented field frame can be written as [19]:

$$p(t) = R_s i_s^2 + \tilde{L}_s (i_{ds} p i_{ds} - i_{qs} p i_{qs}) + \frac{L'_{sr}{}^2}{L'_r} (\delta i_m i_{qs} + i_{ds} p i_m) \quad (27)$$

$$q(t) = \tilde{L}_s i_s^2 + \tilde{L}_s (i_{ds} p i_{qs} - i_{qs} p i_{ds}) + \frac{L'_{sr}{}^2}{L'_r} (\delta i_m i_{ds} - i_{qs} p i_m) \quad (28)$$

Equations (27) and (28) have three different parameters R_s, \tilde{L}_s , and the coefficient $L'_{sr}{}^2 / L'_r$. The magnitude of the stator current i_s , can also be measured in the machine terminals. The field-oriented variables i_{ds}, i_{qs}, i_m , and their derivatives are strongly dependent on the rotor time constant T_r . The rotor field-oriented equations (25) and (26) can determine these relations. In the steady state operating condition of the asynchronous machine, the angular speed reference δ of the magnetization current i_m , and the mechanical rotor speed θ are constants. The magnetization current i_m is also constant during the steady-state operation. From the field-oriented equations (23) - (26), the following relations are obtained:

$$i_m = i_{ds} \Rightarrow p i_{ds} = 0 \quad (29)$$

$$i_{qs} = T_r (\delta - \theta) i_m \Rightarrow p i_{qs} = 0 \quad (30)$$

Replacing (29) and (30) into expressions (27) and (28), the steady state active and reactive power can be written from equations (27) - (30) the power expression in the function of the parameters $R_s, T_r, \tilde{L}_s, T_r$, and the variables $i_s, q(t), \delta$ and θ becomes:

$$p(t) = R_s i_s^2 + T_r (\delta - \theta) \cdot q(t) - \tilde{L}_s T_r \delta (\delta - \theta) \quad (31)$$

All variables in expression (31) can be measured in steady-state operation. The magnitude of the stator current i_s , the active power $p(t)$, and reactive power $q(t)$ can be evaluated from the instantaneous voltages and currents in the machine terminals [20]. A steady-state condition is reached when the active and reactive power are constant. The fundamental frequency of the primitive stator currents is a good estimation of the angular reference derivative δ . The solution to the steady-state problem can be found using linear regression. The ψ cost function can be built with the sum of the square errors measured and the model active power. The estimation can be performed by equation (31). The absolute minimization of the least square function represents the best possible parameter estimation from the given measurement set. The least-square function can be written as:

$$\psi = \sum_{i=1}^n [p_m(t_i) - p(t_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [p_m(t_i) - [w_i] \cdot [k]]^2 \quad (32)$$

The parameter estimation that minimizes the least square function (32) can be obtained as:

$$[k] = \left[\sum_{i=1}^n [w_i]^t \cdot [w_i] \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n [w_i]^t \cdot p_m \right] \quad (33)$$

Once the vector $[k]$ has been found using at least three independent operational conditions, the electrical parameters of the asynchronous machine can be evaluated as:

$$R_s = k_1; T_r = k_2; \tilde{L}_s = k_3 / k_2 \quad (34)$$

The torque coefficient $L'_{sr}{}^2 / L'_r$ can be obtained as [21]:

$$\frac{L_{sr}'^2}{L_r'} = \frac{q_i - \delta_i \tilde{L}_s i_s'^2}{\delta_i i_{ds}'^2} = \frac{p_i - R_s i_s'^2}{\delta_i i_{ds}' i_{qs}'} \quad (35)$$

Since the stator resistance has a secondary influence in the estimation process, the steady state method can be simplified by neglecting the stator resistance R_s or using a previously obtained value of this parameter. In that case, only two parameters need to be found by linear regression, and the proposed method can be accelerated. The stator resistance R_s and the stator inductance L_s can be obtained directly from the non-load test using equations (27) and (28). In that condition, the quadrature current i_{qs} is zero, and the stator current corresponds with the direct component of the stator current i_{ds} .

III. ONLINE PARAMETER ESTIMATION ANALYSIS

Four estimation methods have been used to calculate the parameters for a 5.5 kW industrial squirrel cage motor, 208 V, 50 Hz, wye connected, four poles, 0.8 p.f., 1760 rpm. The voltages and currents were measured through the Hall Effect transducers, and the mechanical shaft speed was measured through a digital encoder. The H-bridge module was created by using 6MBP30RH060-50 smart power modules of Fujitsu Company in the experimental set. The H-bridge module is composed of a 3-phase 6-level cascaded inverter group and the input voltages of each H-bridge module are isolated from each other as 160 V. Hall-effect transducers MCR-S10-50-UI-SW-DCI-NC from Phoenix Contact Company were used. RIM Tach NexGen RT1 encoder of 1250 pulses of Dynapar Company was used to measure the motor speed and evaluate it by the digital signal processor. Figure 1 shows the picture of the main control board module together with the block diagram.

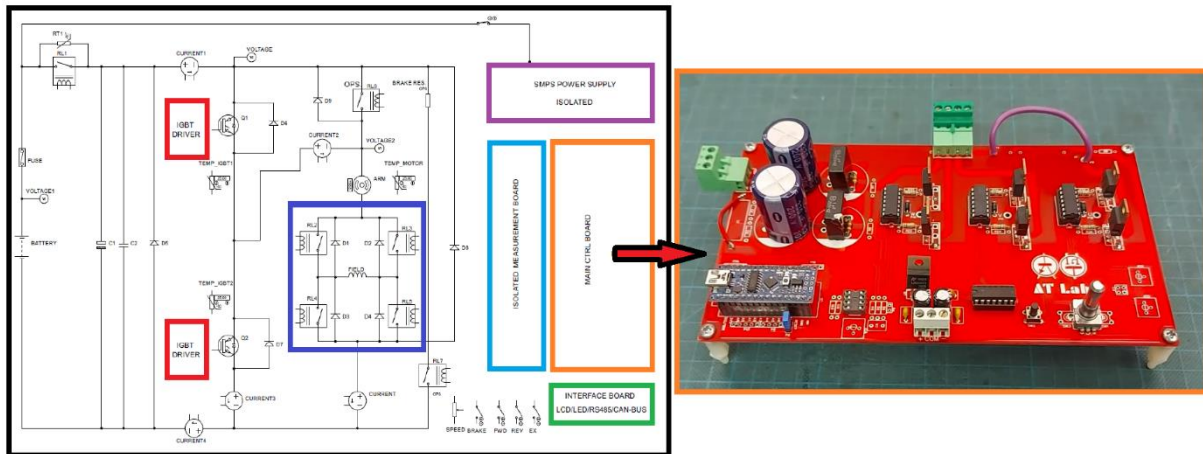


Figure 1. The picture of the main control board module together with the block diagram

A direct starting of the asynchronous machine, using nominal voltages was performed. The line voltages, the phase currents and the shaft speed were measured and digitized using a fast A/D (350 kHz) acquisition card with a sample and hold input. Digital signals were sent to a PC through the DMA channels. These variables were registered for three different mechanical load steps in the rotor shaft. Figure 2 shows the picture of the experimental setup.

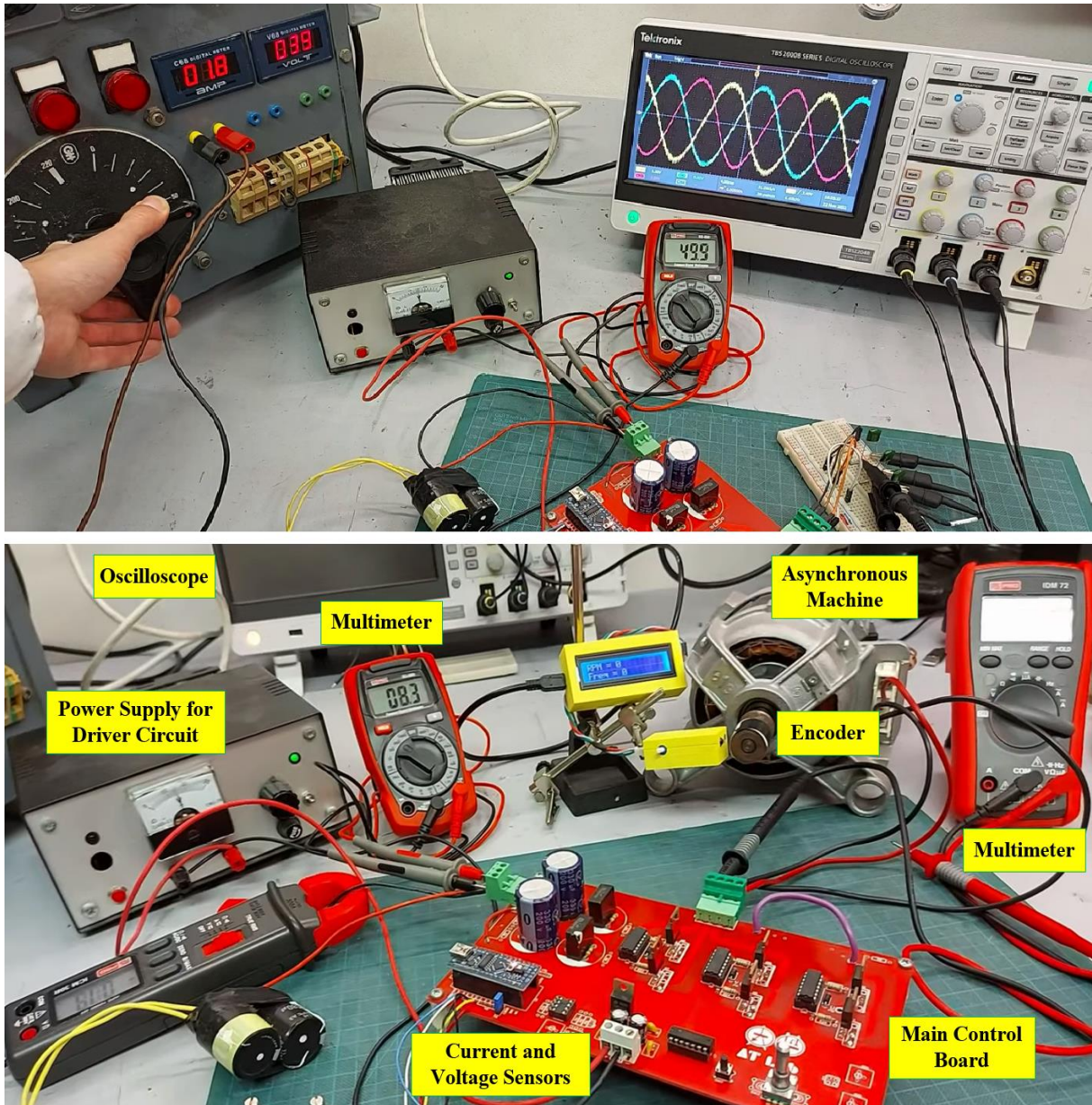


Figure 2. The picture of the experimental setup

Table 1 shows the test data obtained from three independent operating conditions and the obtaining values for the slip, impedance, current, and voltages related to the three operating conditions. The per-unit (pu) bases used in the calculations are $S_{Base} = 5.5$ kVA and $V_{Base} = 208$ V.

Table 1. Asynchronous machine testing data

Variables	Real Values							Per-Unit Values					
	V_{ab} [V]	V_{bc} [V]	i_a [A]	i_b [A]	n [rpm]	P [kW]	T [Nm]	s	$\Re(Z_i)$	$\Im(Z_i)$	$ V_s $	$ I_s $	$\angle I_s$
Condition 1	196.5	195.3	18.24	17.57	1768	5.02	24.51	0.0284	0.6361	0.4543	0.9501	1.1751	0.5916
Condition 2	203.8	203.1	11.27	10.46	1790	2.83	10.49	0.0068	0.8004	1.0224	0.9943	0.7835	0.9148
Condition 3	209.1	207.2	9.93	8.28	1803	0.88	0.21	0.0003	0.3017	1.7519	1.0108	0.5341	1.4205

IV. TEST RESULTS

Table 2 shows a comparison of the parameter estimation values using the four estimating methods. For the fourth method, calculations were performed with and without the stator resistance R_s . The classical estimation method is fast but has poor accuracy. The cost function with this estimation procedure is 0.2542. Nevertheless, the time required to solve this problem is less than that used by the non-linear method and derivative method. The best accuracy was obtained with the non-linear estimation method ($\psi = 0.0029$). However, the estimation algorithm was the most time-consuming (251.43). The derivative estimation method was accurate ($\psi = 0.0087$) and faster than the non-linear method (23.18) but was more noise sensitive. The active and reactive power estimation method was the fastest method (1.1380 or 1.0002). When the stator resistance R_s , is estimated from direct measurements, the accuracy of the non-linear method is practically reached. If the resistance is included in the estimation procedure, accuracy is reduced but speed is almost the same.

Table 2. Comparison of the parameter estimation per-unit values

Techniques	Classical Method	Non-linear Method	Derivative Method	Power (w- R_s)	Power (w/o- R_s)
R_s	0.2418	0.1703	0.2207	0.2112	0.1699
$L_{\sigma s}$	0.2386	0.1409	0.1398	0.1327	0.1203
L_{sr}	1.5113	1.5608	1.5405	1.6421	1.5182
$L_{\sigma r}$	0.2319	0.1235	0.1406	0.1386	0.1204
R_r	0.0297	0.0146	0.0139	0.0173	0.0151
T_r	80.11	115.37	130.04	107.59	113.44
L_{sr}^2 / L_r	1.3159	1.4110	1.4081	1.5004	1.3816
ψ	0.2542	0.0029	0.0087	0.0371	0.0038
$t_{exe}^{(*)}$	1.3963	251.43	23.18	1.1380	1.0002

(*) In per-unit of the fastest estimation

V. CONCLUSIONS

The analyzed parameter estimation methods of the asynchronous machine model have an accurate mathematical behavior according to the results presented and can be easily implemented in real-time applications. The accuracy of the classical estimation method leaves its application only for the initial solution used by the non-linear procedures. The non-linear estimation method is the most accurate, but the time required for this technique makes it difficult to use this algorithm in real-time applications. The derivative estimation method is accurate and fast. The main problem using this procedure can be the noise influence in the external variable measurements. The numerical derivative of these noisy signals introduces big errors in the estimation solution. Due to the adaptive and durable nature of the online parameter estimation method, the speed and torque current monitoring performance of the drive to be used is better than other controllers. With the method, a fast response characteristic was obtained against the driver load change. This has given the drive system a dynamic response characteristic. In addition, with the control of the inverter power switches, minimum switching transitions are provided in the space vector diagram. The active and reactive power estimation method is the fastest and one of the most accurate estimation methods. For these reasons, it is recommended for real-time applications in vector control drives. In the future, the improvement effect of compact machines based on gear brush DC machines and low-cost magnetic encoders on different mobile robot controls can be examined. The fluctuation and variation prediction values of the instantaneous angular rotation speed provided by the low-cost magnetic rotary encoder can be increased. This will improve the precision of angular rotational velocity estimation to be used in mobile robot applications based on a low-cost magnetic rotary encoder connected to asynchronous machines.

REFERENCES

- [1] Rengifo, J., Aller, J. M., Bueno, A., Viola, J., & Restrepo, J. (2012). Parameter Estimation Method for Induction Machines Using the Instantaneous Impedance During a Dynamic Start-Up. *VI. Andean Region International Conference*. 7-9 November, Cuenca, Ecuador, 11-14.
- [2] Barambones, O., & Alkorta, P. (2011). A Robust Vector Control for Induction Motor Drives with an Adaptive Sliding-Mode Control Law. *Journal of the Franklin Institute*, 348(2), 300-314.
- [3] Adameczyk, M., & Orłowska-Kowalska, T. (2022). Postfault Direct Field-Oriented Control of Induction Motor Drive Using Adaptive Virtual Current Sensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(4), 3418-3427.

- [4] Elmahfoud, M., Bossoufi, B., Taoussi, M., Ouanjli, N. E., & Derouich, A. (2019). Rotor Field Oriented Control of Doubly Fed Induction Motor. *5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, 25-26 April, 1-6.
- [5] Mondal, A., Sarkar, P., & Hazra, A. (2020). A Unified Approach for PI Controller Design in Delta Domain for Indirect Field-Oriented Control of Induction Motor Drive. *Journal of Engineering Research*, 8(3), 118-134.
- [6] Gamazo-Real, J. C., Vázquez-Sánchez, E., & Gómez-Gil, J. (2010). Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends. *Sensors*, 10(7), 6901-6947.
- [7] Mishra, A., & Choudhary, P. (2012). Speed Control of an Induction Motor by Using Indirect Vector Control Method. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(12), 144-150.
- [8] Robyns, B., Francois, B., Degobert, P., & Hautier, J. P. (2012). *Vector Control of Induction Machines Desensitisation and Optimisation Through Fuzzy Logic*. Springer, London, 75-121.
- [9] Peretti, L., Zigliotto, M. (2012). Automatic Procedure for Induction Motor Parameter Estimation at Standstill. *IET Electric Power Applications*, 6(4), 214-224.
- [10] Ando, K., Takahashi, S., Ieda, J., Kurebayashi, H., Trypiniotis, T., Barnes, C. H. W., Maekawa, S., & Saitoh, E. (2011). Electrically Tunable Spin Injector Free from the Impedance Mismatch Problem. *Nature Materials*, 10(9), 655-659.
- [11] Subasri, R., Meenakumari, R., Panchal, H., Suresh, M., Priya, V., Ashokkumar, R., & Sadasivuni, K. K. (2022). Comparison of BPN, RBFN and Wavelet Neural Network in Induction Motor Modelling for Speed Estimation. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 3246-3251.
- [12] Saad, K., Abdellah, K., Ahmed, H., & Iqbal, A. (2019). Investigation on SVM-Backstepping Sensorless Control of Five-Phase Open-End Winding Induction Motor Based on Model Reference Adaptive System and Parameter Estimation. *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 22(4), 1013-1026.
- [13] Soliman, M. A., Hasanien, H. M., Al-Durra, A., & Alsaidan, I. (2020). A Novel Adaptive Control Method for Performance Enhancement of Grid-Connected Variable-Speed Wind Generators. *IEEE Access*, 8, 82617-82629.
- [14] Cartis, C., & Roberts, L. (2019). A Derivative-Free Gauss–Newton Method. *Mathematical Programming Computation*, 11(4), 631-674.
- [15] Burgers, K. C. (2014). *The Non-linear Resonant Pole Soft Switching Inverter with Induction Machine Load*. University of Johannesburg, South Africa, 49-98.
- [16] Tilli, A., & Conficoni, C. (2014). Induction Motor Sensorless Observer Aligned with Rotor Flux Derivative. *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 08-10 October, Juan Les Antibes, France, 1722-1728.
- [17] Pamuk, N. (2018). Numerical Method for Calculations of the Multi-Dielectric Fields Based on Flux Density in High Voltage Power Transformer Apparatus. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(4), 342-347.
- [18] Tang, J., Yang, Y., Blaabjerg, F., Chen, J., Diao, L., & Liu, Z. (2018). Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review. *Energies*, 11(9), 2194.
- [19] Teja, A. R., Verma, V., & Chakraborty, C. (2015). A New Formulation of Reactive-Power-Based Model Reference Adaptive System for Sensorless Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), 6797-6808.
- [20] Tohidi, S. (2016). Analysis and Simplified Modelling of Brushless Doubly - Fed Induction Machine in Synchronous Mode of Operation. *IET Electric Power Applications*, 10(2), 110-116.
- [21] Kim, J. G. (2022). Soft Start Analysis of Induction Motor Using Current Phase Angle. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(2), 1475-1480.



Araştırma Makalesi - Research Article

Doğrusal Katılaştırılmış Sn-Zn Ötektik Alaşımında Altsığumanın Hesaplanması

Calculation the Undercooling of the Directionally Solidified Sn-Zn Eutectic Alloy

Mevlüt Şahin^{1*}

Geliş / Received: 10/11/2022

Revize / Revised: 27/12/2022

Kabul / Accepted: 03/02/2023

ÖZ

Sn-8.8Zn (kütlece %) ötektik alaşımı döküm fırını ve vakumlu eritme fırını kullanılarak üretildi. Daha sonra döküm alaşımları sabit sıcaklık gradyentinde ($G=4.16$ K/mm), farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.3-166.0$ $\mu\text{m/s}$) Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında yukarı yönlü doğrusal katılaştırıldı. Altsığuma (ΔT) değerleri; katılaştırma hızı, ötektik mesafe (λ) ve sistem parametreleri (K_1 ve K_2) kullanılarak Jackson-Hunt modeli ile hesaplandı. Sabit bir sıcaklık gradyentinde ($G=4.16$ K/mm) katılaştırma hızının 8.3 $\mu\text{m/s}$ 'den 166.0 $\mu\text{m/s}$ 'ye artmasıyla, altsığuma 0.87 K'den 3.89 K değerine arttı. 0.87 K değerindeki minimum altsığumada çubuksal ötektik mesafe 3.22 μm , 3.89 K'de ise ötektik mesafe 0.72 μm değerlerinde elde edildi. Sonuçlar literatür ile karşılaştırıldı.

Anahtar Kelimeler-Doğrusal Katılaştırma, Katılaştırma Hızı, Ötektik Mesafe, Altsığuma, Sn-Zn

ABSTRACT

The Sn-8.8 wt. % Zn eutectic alloy was produced by using casting furnace and vacuum melting furnace. Then cast alloys were directionally solidified upwards with a constant temperature gradient ($G=4.16$ K/mm) at different solidification rates ($V=8.3-166.0$ $\mu\text{m/s}$) in a Bridgman type controlled directional solidification furnace. The undercooling (ΔT) values are calculated with the Jackson-Hunt model by using the solidification rate, eutectic spacing (λ) and system parameters (K_1 and K_2). At a constant temperature gradient ($G=4.16$ K/mm) with the increasing of solidification rate from 8.3 $\mu\text{m/s}$ to 166.0 $\mu\text{m/s}$, undercooling increased from 0.87 K to 3.89 K. At minimum undercooling of 0.87 K, the rod eutectic spacing is obtained 3.22 μm while the eutectic spacing is obtained 0.72 μm at the 3.89 K. The results were compared with the literature.

Keywords- Directional Solidification, Solidification Rate, Eutectic Spacing, Undercooling, Sn-Zn

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: msahin@ohu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6659-3756>)

Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Derbent Yerleşkesi, Niğde, Türkiye

I. GİRİŞ

Bazı elektronik aletlerin temelini oluşturan entegre devrelerin üretimi, kusursuz tek kristallerin üretilmesi ile sağlanabilir. Bu çeşit kristallerin üretimi için farklı katılaştırma yöntemleri kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi de Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma yöntemidir [1]. Katılaştırma yöntemi döküm malzemelerinin niteliğini artırmada önemli bir rol oynar. Doğrusal katılaştırma yöntemi tek kristal büyütme [2], homojen bileşim elde etme ve saflaştırma [3] gibi yöntemlerde kullanılır. Bu yöntem ticari olarak oksit lazer sistemleri, yarı iletken kristallerin büyütülmesi [4], mekanik ve termal dayanımı yüksek savunma sistemleri [5] ile optik uygulamalarda [6] kullanılmaktadır.

Kontrollü katılaştırma metodu ile alaşımların mikrosertlik, gerilme dayanımı ve akma dayanımı gibi mekanik özellikleri katılaştırma parametrelerine (sıcaklık gradyenti, katılaştırma hızı) bağlı olarak iyileştirilebilmektedir. Kontrollü doğrusal katılaştırılan alaşımın mikroyapısında katılaştırma parametrelerindeki artışa bağlı olarak tanecek büyüklüklerinde azalma meydana geldiği, bu azalmanın sonucunda da alaşımın mikrosertlik, çekme dayanımı ve akma dayanımı gibi bazı mekanik özelliklerinin önemli ölçüde arttığı bilinmektedir [7-19].

Döküm alaşımının temelini oluşturan alaşımlardan biri de ötektik alaşımlardır. Ötektik alaşımların düzenli mikroyapısı, ötektik bu alaşımların fiziksel özellikleri üzerine yapmış olduğu etki nedeniyle ilgi çeken bir çalışma alanı oluşturmuştur. Ötektik alaşımlar saf metaller gibi en düşük ve tek erime sıcaklığına sahiptir. Saf kalayın erime sıcaklığı 232 °C, saf çinko'nun erime sıcaklığı 420 °C olmasına rağmen, ötektik kompozisyona sahip Sn- ağı.% 8.8 Zn alaşımının erime sıcaklığı 198.5 °C'dir [20]. Bunun sebebi iki bileşen atomlarının diğer bileşenin atomlarının kendi kristallerini oluşturmasını engelleme eğilimidir. Dolayısıyla, her iki bileşene ait kristaller aynı anda oluşmaya başlarlar. Ortamdan yeterli ısı çekilirse kristalleşme kısa sürede meydana gelir. Bu sebepten dolayı, kristal tanecekleri ince taneli yapıda oluşurlar. İnce taneli ötektik alaşımlar iyi mekanik özelliklere (sertlik, gerilme dayanımı, akma dayanımı, kırılma tokluğu) sahiptir [21-24]. Sn-Zn alaşımları maliyetinin düşük olmasından, iyi elektriksel iletkenliğe [25], üstün mekanik dayanıma [26] ve düşük erime sıcaklıklarına [20] sahip olmasından dolayı Sn-Pb alaşımlarının yerini almaktadır. Ayrıca bu alaşımlar elektronik paketleme ve mekaniksel bütünlüğü koruma, kolay üretilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı lehim malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [21].

Ötektik mesafeleri belirlemek için, ilk ve en kapsamlı model Jackson-Hunt [27] tarafından çubuksal ve lamelsel ötektikler için tasarlanmıştır. Bu model, alt soğuma (ΔT), ötektik mesafe (λ) ve katılaştırma hızı (V) arasındaki ilişkileri iyi açıklamaktadır. Alt soğuma için mevcut bu denklem,

$$\Delta T = K_1 V \lambda + K_2 / \lambda \quad (1)$$

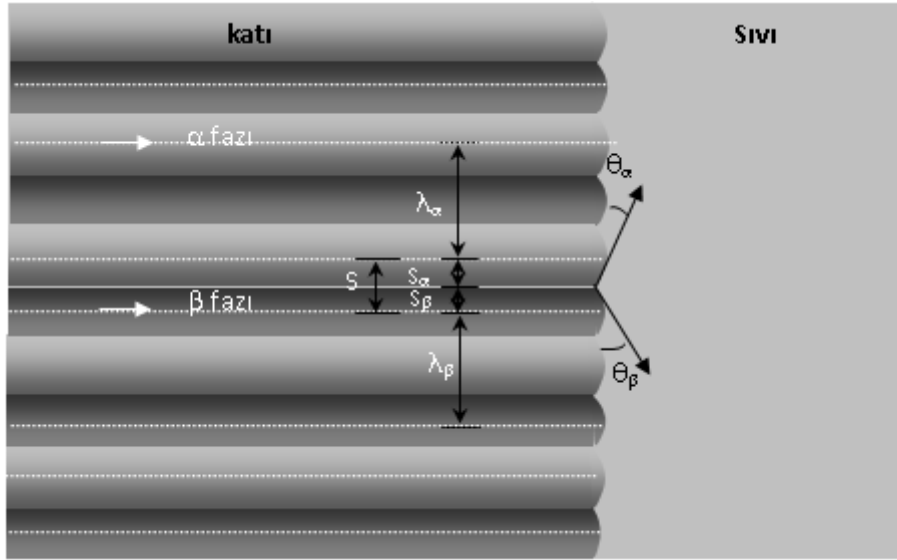
şeklinde dir. Burada, K_1 ve K_2 fiziksel parametrelerdir ve

$$K_1 = m P C_o / f_\alpha f_\beta D \quad (2)$$

$$K_2 = 2m\delta \sum_i (\Gamma_i \sin \theta_i / m_i f_i); \quad i = \alpha, \beta \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir [28]. Burada $m = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$ 'dir. m_α ve m_β , α ve β sıvılaşma eğrilerinin eğimleridir. f_α ve f_β , α ve β fazlarının hacim kesirleridir. C_o , α ve β fazlarının bileşim farkıdır. Γ_i Gibbs-Thomson katsayısıdır. θ_i açıları ($i = \alpha, \beta$) ise Şekil 1.'de gösterilmektedir. Şekil 1.'de görülen S_α ve S_β sırasıyla α ve β fazlarının yarı lamelsel genişlikleridir. δ parametresi çubuksal büyütme için $2\sqrt{f_\alpha}$ 'ya, lamelsel büyütme için 1'e eşittir [28]. Denklem 2'deki P ise, Pecclet sayısıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$P = \begin{cases} 0,3383 (f_\alpha f_\beta)^{1,661} & \text{Lamelsel ötektikler için} \\ 0,167 (f_\alpha f_\beta)^{1,22} & 0 \leq f_\alpha \leq 0,3 \text{ Çubuksal ötektikler için} \end{cases} \quad (4)$$



Şekil 1. Ötektik yapının şematik gösterimi [29]

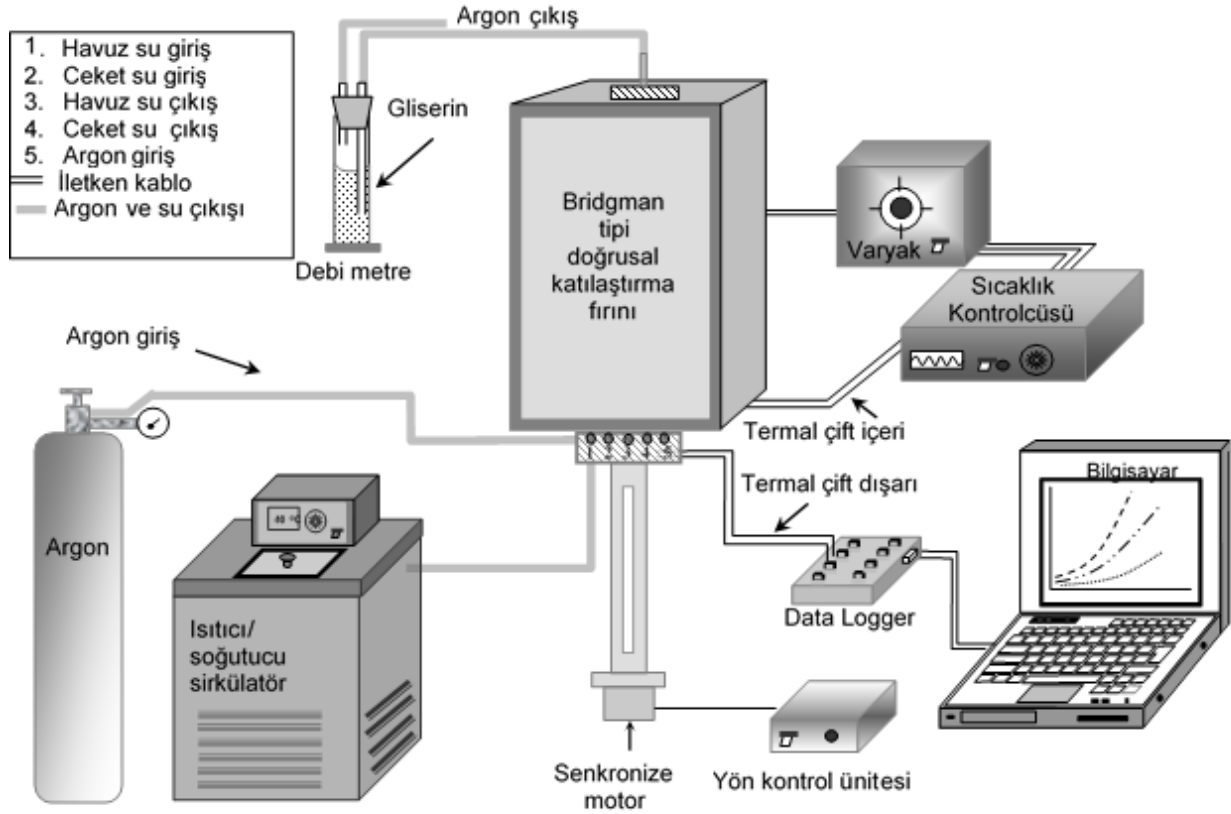
Dolayısıyla Bu çalışmanın amacı, sabit sıcaklık gradyentinde, farklı katılaştırma hızlarında doğrusal katılaştırılmış Sn-Zn ötektik alaşımında; alt soğuma, ötektik mesafe ve katılaştırma hızı arasındaki ilişkilerin Jackson Hunt [27] modeli kullanılarak belirlenmesidir.

II. DENEYSEL METOT

İlk olarak erime sıcaklığı düşük olan kalay eritilecek şekilde; miktarları belirlenen kalay ve çinko vakumlu eritme fırını içerisinde bulunan grafit potaya yerleştirildi. Fırın vakumlandıktan sonra, varyak en düşük güç durumunda çalıştırıldı ve her 5 dakikada değeri % 5 artırıldı. Varyajın değerindeki artışa fırın istenilen sıcaklığa ulaşıncaya kadar devam edildi. Metaller eritildikten sonra vakum kapağı açılarak grafit çubuk yardımıyla eriyik birkaç kez karıştırıldı. Böylelikle ötektik alaşım eriyiği hazırlanmış oldu. Eritme fırınında hazırlanan ve homojen hale getirilen eriyik döküm fırınındaki kalıplara döküldü. Döküm fırınının alt ısıtıcısı kapatıldı, üst ısıtıcı çalışır haldeyken soğutma kazanından su geçirilerek doğrusal katılaştırma başlatıldı. Katılma tamamlandıktan sonra üst ısıtıcıda kapatılarak fırının soğuması beklendi. Daha sonra, dökümü yapılan grafit alaşım kalıpları fırından çıkarıldı. Böylelikle alaşımlar doğrusal katılaştırılma için hazırlanmış oldu.

Malzemelerin doğrusal katılaştırılmasında kullanılan Bridgman tipi katılaştırma fırınına ait şematik gösterim Şekil 2'de verilmiştir. Alaşımımız fırında bulunan numune tutucusunayyerleştirildi. Doğrusal katılaştırma fırını istenilen sıcaklığa ayarlandı. Fırının istenilen sıcaklığı gelişti, bilgisayar bağlantısı ve sıcaklık kaydedici yardımıyla kontrol edildi. Fırın oda sıcaklığından itibaren ısıtılmaya başlandı ve varyajın güç değeri kademesi (her beş dakikada % 7-8) olarak arttırıldı. Fırın 500 °C sıcaklığa ulaştığında dengeye gelmesi için belirli bir süre (yaklaşık 20 dakika) beklendi. Dengeye gelindiğinde sürücü motor ile alaşım sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru çekildi. Alaşım 10-12 cm katılaştıktan sonra suya çekilerek ani katılaştırıldı. Deneyler sabit sıcaklık gradyenti, farklı katılaştırma hızlarında tekrarlandı. Daha sonra içinde bulunduğu grafit potadan çıkartılan alaşımımız metalografik işlemler için hazır hale getirilmiş oldu.

Yüzey mikroyapıların mikroskobik incelenmesi için zımparalama, parlatma ve dağlama gibi bazı işlemler yapıldı. Parlatma işleminden sonra alaşımların mikroyapılarının gözlenebilmesi için % 92 CH₃OH, % 5 HNO₃ ve % 3 HCl ile dağlandı. Numunelerin üretilmesi ve mikroyapılarının açığa çıkarılmasına ait detaylar kaynak [29]'de açıklanmıştır.

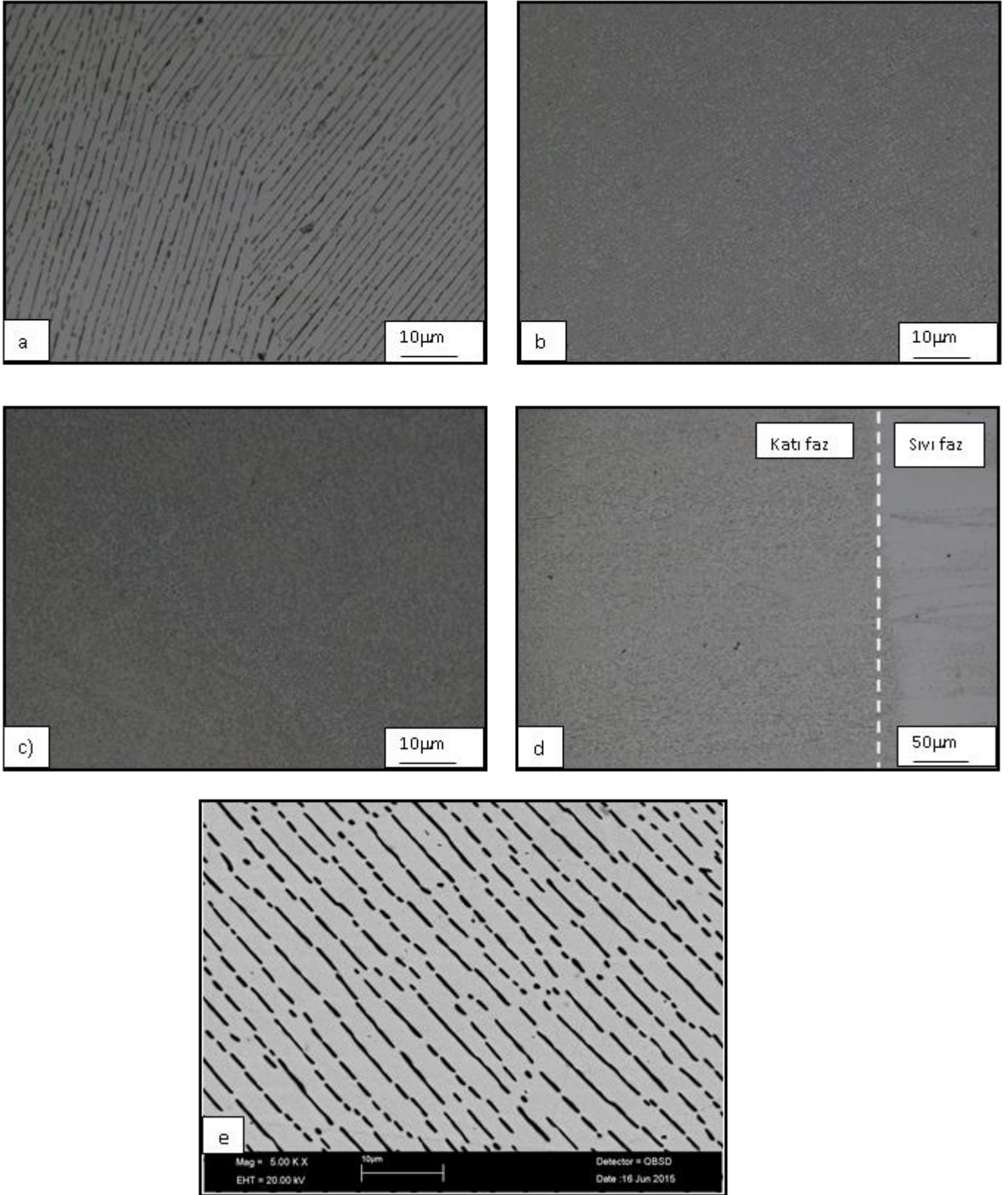


Şekil 2. Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınının şematik gösterimi [1]

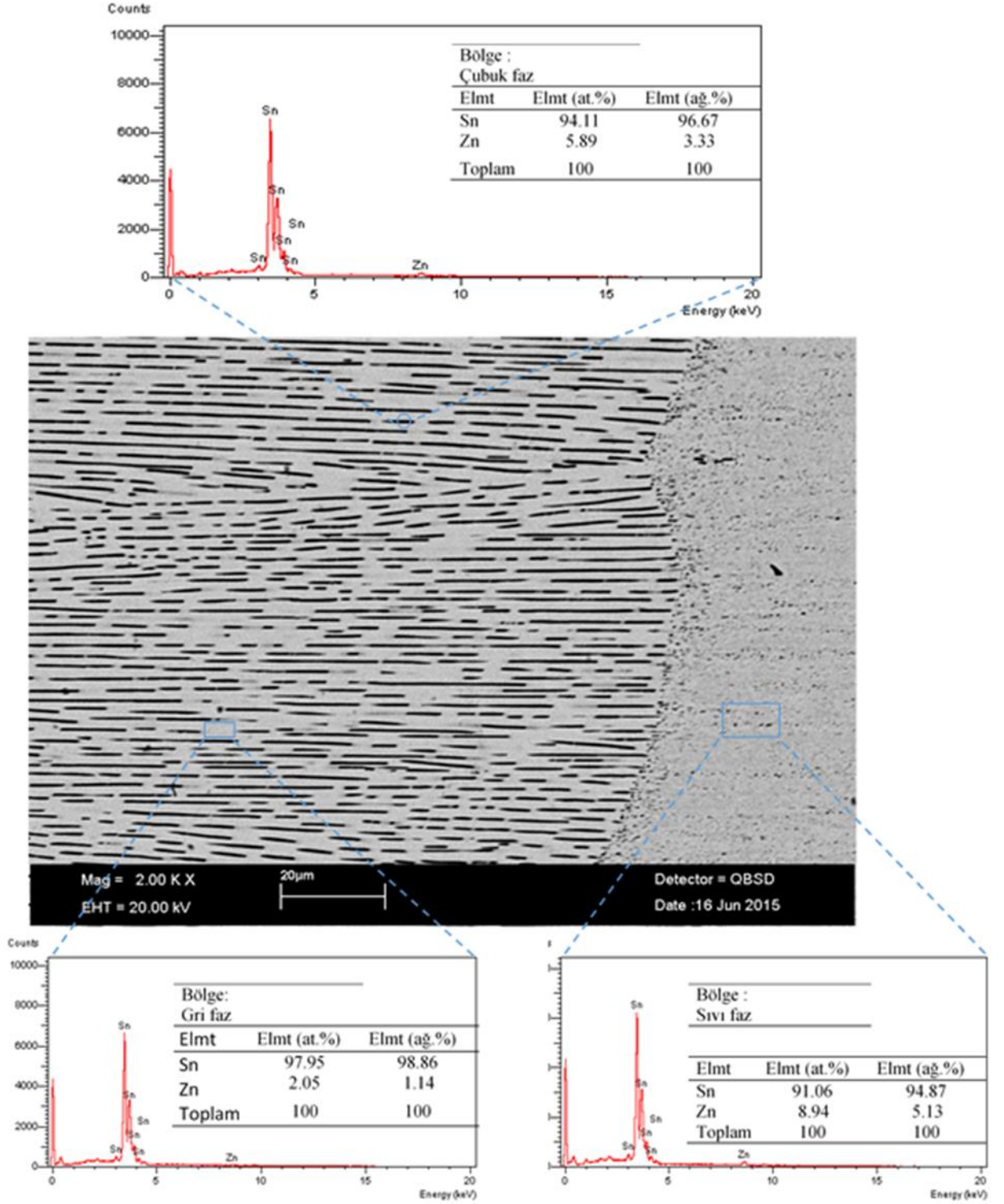
III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 3’de optik mikroskop ile sabit sıcaklık gradyentinde, farklı katılaştırma hızlarında alaşımların boyuna ve enine bölgelerinden çekilen mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Düşük hızda çubuksal ötektikler kaba yapıda iken, artan katılaştırma hızında ötektik mikroyapılarda küçülme meydana gelmiştir. Ayrıca Sn-Zn ötektik alaşımının SEM-EDS analizleri yapılmış; gri fazda ağırlık % 1.14 Zn, ağırlık % 98.86 Sn elementleri ve çubuksal fazda ise ağırlık % 3.33 Zn, ağırlık % 96.67 Sn elementleri tespit edilmiştir. Alaşımın sıvı fazında ise ağırlık % 5.13 Zn, ağırlık % 94.87 Sn elementleri belirlenmiştir (Şekil 4).

Sabit sıcaklık gradyentinde, hesaplanan ötektik mesafe ile Sn-Zn ötektik alaşımında deney sonucu elde edilen ötektik mesafenin [8] katılaştırma hızı ile değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Hızın 8.3 $\mu\text{m/s}$ değerinden 166.0 $\mu\text{m/s}$ değerine artmasıyla Jackson Hunt [27] modeli kullanılarak hesaplanan ötektik mesafe 3.22 μm ’den 0.72 μm ’ye azalmıştır. Jackson Hunt [27] modelinden λ ’ya bağlı olarak belirlenen V üstel değeri 0.50 ile, deney sonucunda λ ’ya bağlı olarak elde edilen 0.47 üstel değeri [8] birbirine yakın çıkmıştır. Bağlılar Tablo 1’de verilmiştir. Altsoğumanın katılaştırma hızı ve ötektik mesafeye bağımlılığı Şekil 6-8’de verilmiştir. Hızın 8.3 $\mu\text{m/s}$ ’den 166.0 $\mu\text{m/s}$ değerine artmasıyla altsoğuma 0.87 K’den 3.89 K değerine artmıştır. 0.87 K değerindeki minimum alt soğumada, çubuksal mesafe 3.22 μm , 3.89 K’de ise çubuksal mesafe 0.72 μm değerlerinde elde edilmiştir. Sabit sıcaklık gradyentinde, katılaştırma hızının artması alt soğumayı arttırmıştır. Katılaştırma ve mikroyapı parametreleri ile altsoğuma arasındaki bağıntılar Tablo 1’de verilmiştir. Katılaştırma hızı 20 kat artırıldığında alt soğuma yaklaşık 4.5 kat artmıştır. Sn-ağırlık % 8.8 Zn alaşımına ait fiziksel parametreler ise Tablo 2’de verilmiştir. Bu fiziksel parametreler Jackson Hunt [27] modelinde kullanılarak K_1 ve K_2 değerleri hesaplanmıştır. Katılaştırma ve mikroyapı parametreleri ile altsoğuma arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Lineer Regresyon analizi ile belirlenen altsoğuma, katılaştırma hızı ve çubuksal mesafeler arasındaki bağıntılar Tablo 1’de verilmiştir. Bu model $\lambda^2 V$ ’nin sabit olduğunu öngörmektedir. $\lambda^2 V$ değeri sabittir (86.1 $\mu\text{m}^3/\text{s}$).



Şekil 3. Kontrollü katılaştırılmış Sn-8.8 Zn ötektik alaşımına ait bazı mikroyapılar a) Enine bölge (V=8.3 µm/s), b) Enine bölge (V=41.5 µm/s), c) Enine bölge (V=166 µm/s) d) Boyuna bölge (V=41.5 µm/s) e) Enine bölgeye ait SEM fotoğrafı (V=41.5 µm/s).



Şekil 4. Sn-8.8Zn alaşımına ait EDX sonuçları

Tablo 1. Sn-8.8 Zn ötektik alaşımı için katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametreleri ve katılaştırma ve mikroyapı parametreleri ile altoğuma arasındaki bağıntılar.

G (K/mm)	V (µm/s)	ΔT (K)	λ _{J-H} (µm)	λ (µm) [8]
4.16	8.3	0.87	3.22	2.59
4.16	41.5	1.95	1.44	0.88
4.16	166.0	3.89	0.72	0.65
Bağıntı		Sabit (k)		Korelasyon katsayısı (r)
λ _{J-H} =kV ^{-0.50}		k=9.275 (µm ^{1.50} s ^{-0.50})		r=1
λ _{J-H} =kV ^{-0.47} [8]		k=6.273 (µm ^{1.47} s ^{-0.47}) [8]		r=0.963 [8]
ΔTV ^{-0.50} =0.302 Kµm ^{-0.50} s ^{0.50} (sabit G)				
λ _{J-H} ΔT=2.803 Kµm (sabit G)				
λ ² V=86.1 µm ³ /s				

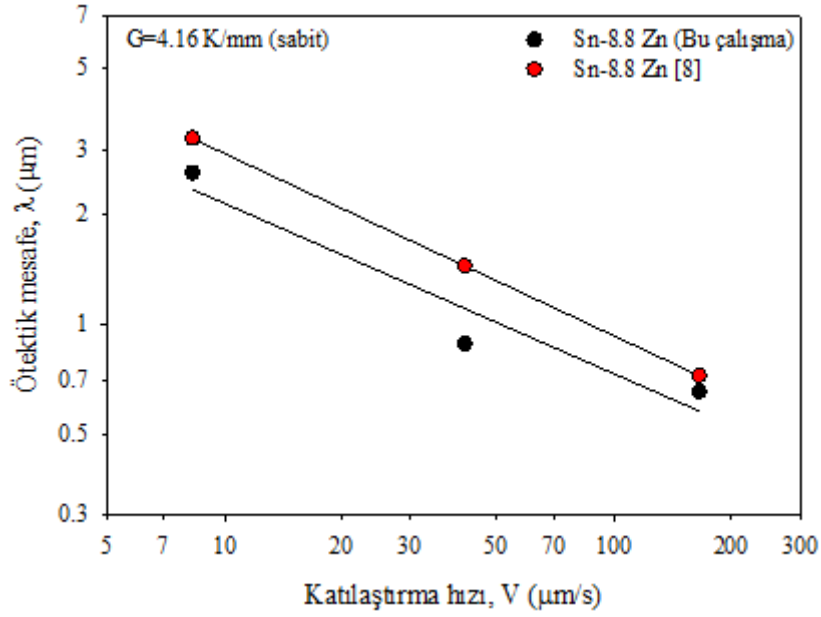
Tablo 2. Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait fiziksel parametreler

Özellik	Sembol	Birim	Değer	Kaynak
Eriye noktası	T _e	K	471.2	[20]
α fazının sıvılık eğimi	m _α	K/(ağ.%)	-2.424	[20]
β fazının sıvılık eğimi	m _β	K/(ağ.%)	3.803	[20]
Ötektik kompozisyon	C ₀	(% ağ.)	91.2	[20]
α fazının hacim kesri	f _α	–	0.917	[30]
β fazının hacim kesri	f _β	–	0.083	[30]
Gibbs-Thomson katsayısı (α)	Γ _α	K µm	0.1022	[31]
Gibbs-Thomson katsayısı (β)	Γ _β	K µm	0.0474	[31]
α fazının temas açısı	θ _α	(°)	17.16	[31]
β fazının temas açısı	θ _β	(°)	26.99	[31]
Difüzyon katsayısı	D	µm ² /s	3500	[32]
Fiziksel parametre	K ₁	K s/µm ²	0.016	Hesaplandı
Fiziksel parametre	K ₂	K µm	1.397	Hesaplandı

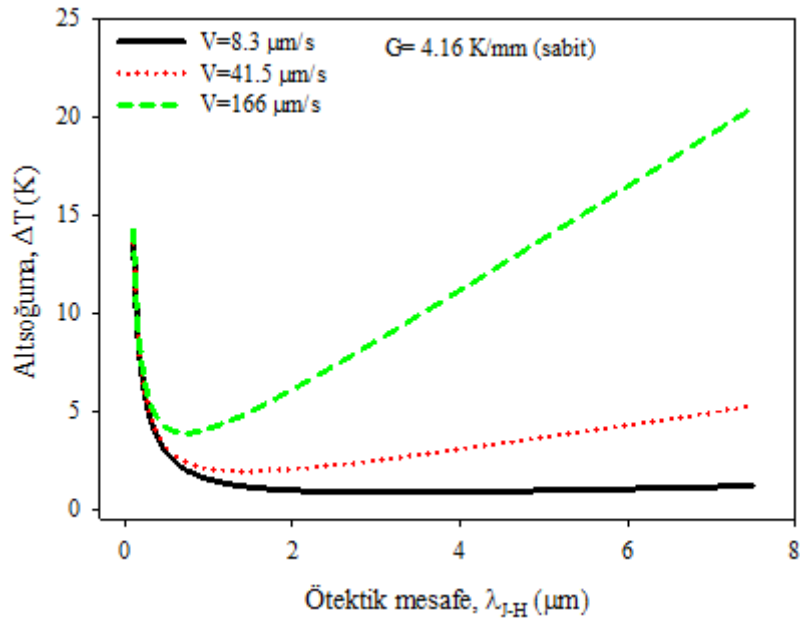
Bu çalışmadan elde edilen λ²Vdeğeri (86.1 µm³/s), Büyük ve ark. [33] tarafından Sn-3.7Ag-0.9Zn (kütlece %) alaşımında elde edilen 86.4 µm³/s değeri ile, Koçak ve ark. [34] tarafından Bi-44.8Pb (kütlece %) ötektik alaşımında elde edilen 88.2 µm³/sdeğeri ile, Ma ve ark. [35] tarafından Al-4.5Cu ötektik alaşımında elde edilen 88.4 µm³/sdeğeri ile uyumlu çıkmıştır. Bu çalışmadan elde edilen λ_{J-H}ΔTdeğeri (2.8 Kµm),sabit sıcaklık gradyentinde Şahin ve ark. [36] tarafından Sn-3.5Ag (kütlece %) alaşımında elde edilen 2.5 Kµm değerine yakın çıkmıştır.

SEM-EDS analizleri neticesinde katı ana fazda at.% 2.05 Zn, sıvı fazda ise at.% 8.94 Zn elementinin mevcut olması, sıvı fazın çözünence zengin olduğunu göstermektedir. Katı-sıvı arayüzeyi önündeki sıvı bölgenin çözünence zengin olması bu bölgede yapısal altoğuma meydana getirir. Arayüzey önünde çinko çözünen miktarı fazla olduğundan denge sıvılaşma sıcaklığı arayüzeyin hemen önündeki sıcaklıktan yüksektir. Sıvılaşma sıcaklıklarındaki bu fark arayüzey önünde altoğuma meydana getirmiştir. Düşük katılaştırma hızlarında çözünen madde zamanla arayüzeyden sıvı içine itilir. Katılaştırma hızı yeterince yüksekse çözünen madde arayüzeyde birikir. Bu durum yapısal altoğuma meydana getirir. Dolayısıyla bu çalışmada da görüldüğü gibi, yüksek katılaştırma hızlarında daha fazla altoğuma meydana gelmiştir.

Bir çekirdeğin kristal olarak büyüebilmesi için belirli bir kritik boyut değerine ulaşması gerekir. Alt soğuma miktarı arttıkça kritik çekirdek çapı küçülecektir. Şekil 7'de görüldüğü gibi katılaştırma hızının artması altoğumayı artırmıştır. Bu durum kritik yarıçap değerinde bir azalma meydana getirecektir. Bu çalışmada görüldüğü gibi mikroyapı katılaştırma parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla mikroyapı çalışmaları üzerine yoğunlaşarak alaşımların fiziksel özellikleri iyileştirilebilir.

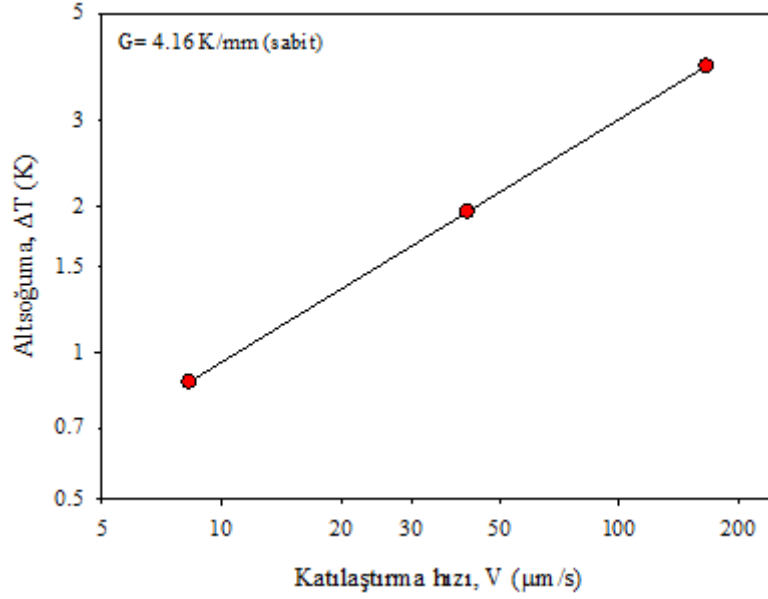


Şekil 5. Çubuksal ötektik mesafenin katılaştırma hızı ile değişimi

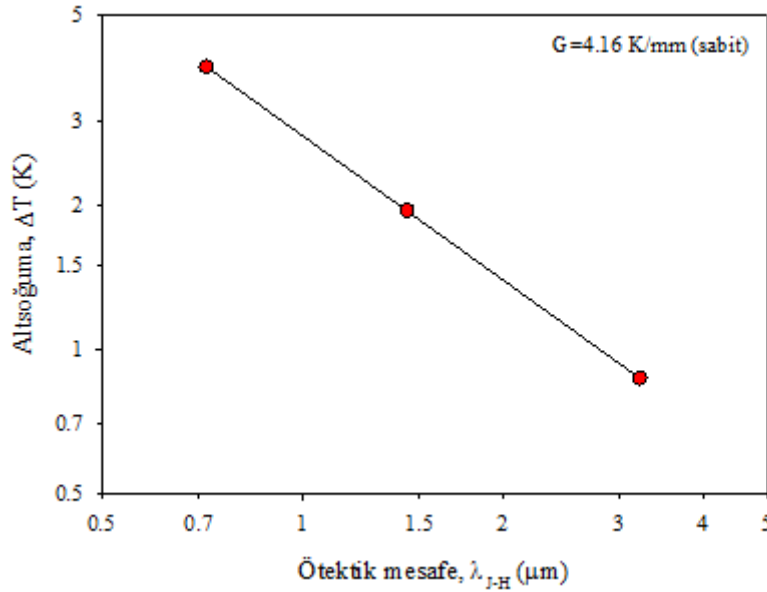


Şekil 6. Altoğumanın ötektik mesafe ve katılaştırma hızı ile değişimi

Jackson Hunt [27] modeli tüm katılaştırma parametreleri için iyi sonuç vermemektedir. Altoğuma; sıvının bileşimine, arayüzey eğriliğine ve atomların sıvı fazdan katı faza geçmesi için gerekli olan enerji miktarına bağlıdır. Dolayısıyla arayüzey enerjisi, sıvı bileşim miktarı ve atomların katılaşması için gerekli olan enerji miktarı üzerinde yoğunlaşarak altoğuma hakkında daha fazla bilgi sahibi olunabilir.



Şekil 7. Minimum altoğumanın katılaştırma hızı ile değişimi



Şekil 8. Minimum alt soğumalara tekabül eden çubuksal mesafeler

IV. SONUÇLAR

Sn-ağ.% 8.8 Zn ötektik döküm alaşımları sabit sıcaklık gradyentinde ($G=4.16$ K/mm), farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.3-166.0$ μm/s) Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınında yukarı yönlü doğrusal katılaştırılmıştır. Altoğuma değerleri; katılaştırma hızı, ötektik mesafe ve sistem parametreleri kullanılarak Jackson-Hunt modeli ile hesaplanmıştır. Sabit sıcaklık gradyentinde katılaştırma hızının artmasıyla, altoğuma artmış, ötektik mesafe ise azalmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Gündüz, M., & Çadırlı, E. (2002). Directional solidification of aluminium-copper alloys. *Materials Science and Engineering A*, 327, 167-185.
- [2] Allegretti, F., Borgia, B., Riva, R., Notaristefani, F. D., & Pizzini, S. (1989). Growth of BGO single crystals using a directional solidification technique. *Journal of Crystal Growth*, 94, 373-380.
- [3] Martorano, M. A., Neto, J. B. F., Oliveira T. S., & Tsubaki, T. O. (2011). Refining of metallurgical silicon by directional solidification. *Materials Science and Engineering B*, 176, 217-226.

- [4] Su, C. H. (2015). A method of promoting single crystal yield during melt growth of semiconductors by directional solidification. *Journal of Crystal Growth*, 410, 35-38.
- [5] Wang, D., Wang, W., Huang, Y., & Wang, X. (2022). An investigation on microstructures and mechanical properties of twinning-Induced plasticity steels prepared by directional solidification. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 3326-3340.
- [6] Orera, V. M., & Merino, R. I. (2015). Ceramics with photonic and optical applications. *Cerámica y Vidrio*, 54, 1-10.
- [7] Peng, Peng. (2020). Analysis on the growth and growth-dependent microhardness of Ni₃Sn₄ intermetallic compound phase in directionally solidified Sn-Ni alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 821, 1-7.
- [8] Şahin, M., & Karakurt, F. (2018). The effect of the solidification rate on the physical properties of the Sn-Zn eutectic alloy. *PhysicaB: Condensed Matter*, 545, 48-54.
- [9] Bayram, Ü., & Maraşlı, N. (2020). Effects of growth rate on eutectic spacing, microhardness, and ultimate tensile strength in the Al-Cu-Ti eutectic alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 121, 382-390.
- [10] Santos, W. L. R., Cruz, C.B., Spinelli, J. E., Cheung, N., & Garcia, A. (2018). Tailoring microstructure, tensile properties and fracture process via transient directional solidification of Zn-Sn alloys. *Materials Science and Engineering A*, 712, 127-132.
- [11] Spinelli, J. E., Silva, B. L., Cheung, N., & Garcia, A. (2014). The use of a directional solidification technique to investigate the interrelationship of thermal parameters, microstructure and microhardness of Bi-Ag solder alloy. *Materials Characterization*, 96, 115-125.
- [12] Kaygısız, Y. (2018). Microstructure characterization and hardness of Al-Cu-Mn eutectic alloy. *China Foundry*, 15, 390-396.
- [13] Cui, C., Wang, Y., Zhang, K., Wu, C., Liu, W., Deng, L., Wang, C., & Su, H. (2021). Mechanical properties of Fe-Al-Ta eutectic composites at higher solidification rates. *Materials Science and Engineering A*, 824, 1-11.
- [14] Kakitani, R., Konno, C., Garcia, A., & Cheung, N. (2022). The effects of solidification cooling and growth rates on microstructure and hardness of supersaturated Al-7%Si-x%Zn alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 1956-1970.
- [15] Chunjuan, C., Li, D., Wei, L., Yan, W., Yue, L., Yuanyuan, L., Haijun, S., & Yingying, L. (2022). High temperature tensile property and fracture behavior of directionally solidified Fe-Al-Ta eutectic composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Material Science Edition*, 37, 110-116.
- [16] Wang, J., Zheng, L., Kang, J., & Hu, Y. (2020). Study on the directional solidification process of an aluminum alloy bar in multishell mold being gradually immersed in water. *Materials*, 13, 1-8.
- [17] Wang, L., Yao, C., Shen, J., Zhang, Y., Wang, T., Ge, Y., Gao, L., & Zhang, G. (2020). Microstructures and room temperature tensile properties of as-cast and directionally solidified AlCoCrFeNi_{2.1} eutectic high-entropy alloy. *Intermetallics*, 118, 1-10.
- [18] Cruz, C., Lima, T., Kakitani, R., Barros, A., Garcia, A., & Cheung, N. (2020). Plate-like growth in a eutectic Bi-Ni alloy: effects of morphological microstructure evolution and Bi₃Ni intermetallic phase on tensile properties. *Journal of Materials Research Technology*, 9, 4940-4950.
- [19] Gandolfi, M., Xavier, M. G. C., Gomes, L. F., Reyes, R. A. V., Garcia, A., & Spinelli, J. E. (2021). Relationship between Microstructure Evolution and Tensile Properties of AlSi10Mg Alloys with Varying Mg Content and Solidification Cooling Rates. *Metals*, 11, 1-14.
- [20] Massalski, T. B. (1990). Binary alloy phase diagrams. ASM International, Materials Park. Ohio.
- [21] Garcia, L. R., Osorio, W. R., Peixoto L. C., & Garcia, A. (2010). Mechanical properties of Sn-Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array. *Materials Characterization*, 61, 212-220.
- [22] Cui, C., Lai, Y., Liu, W., Wang, P., Liu, Y., Wang, C., & Su, H. (2019). Tensile and fatigue properties of the Bridgman directionally solidified Fe-Al-Ta eutectic. *Materials Science and Engineering A*, 765, 1-10.
- [23] Hu, L., Hu, W., Gottstein, G., Bogner, S., Hollad, S., & Polaczek, A. B. (2012). Investigation into microstructure and mechanical properties of NiAl-Mo composites produced by directional solidification. *Materials Science and Engineering A*, 539, 211-222.
- [24] Kakitani, R., Gouvei, G. L., Garcia, A., Cheung, N., & Spinelli, J. E. (2019). Thermal analysis during solidification of an Al-Cu eutectic alloy: interrelation of thermal parameters, microstructure and hardness. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 983-996.
- [25] Gancarz, T., Fima, P., & Pstrus, J. (2014). Thermal Expansion, Electrical Resistivity, and Spreading Area of Sn-Zn-In Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1524-1529.
- [26] Islam, R. A., Chan, Y. C., Jillek, W., & Islam, S. (2006). Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn-Zn and Sn-Pb solders. *Microelectronics Journal*, 37, 705-713.
- [27] Jackson, K.A., & Hunt, J. D. (1966). Lamellar and eutectic growth. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 236, 1129-1142.
- [28] Stefanescu, D. M., Abbaschian, G. J., & Bayuzick, R. J. (1988). Solidification processing of eutectic alloys. The Metallurgical Society, Inc., Ohio.

- [29] Şahin, M. (2012). *İkili ve üçlü metalik alaşımların doğrusal katılaştırılması ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- [30] Crocker, M. N., Baragar, D., & Smith, R.W. (1975). Anomalous eutectic growth. *Journal of Crystal Growth*, 30, 198- 212.
- [31] Saatçi, B. (2000). *İkili metalik alaşımların katı-sıvı arayüzey enerjilerinin ölçümü*. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [32] Bouchhard D., & Kirkaldy J. S. (1997). Prediction of dendrite arm spacings in unsteady and steady-state heat flow of unidirectionally solidified binary alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 28, 651-663.
- [33] Büyük, U., Engin, S., Kaya, H., & Maraşlı, N. (2010). Effect of solidification parameters on the microstructure of Sn-3.7Ag-0.9Zn solder. *Materials Characterization*, 61, 1260-1267.
- [34] Koçak, Y., Engin, S., Büyük, U. & Maraşlı, N. (2013). The influence of the growth rate on the eutectic spacings, undercoolings and microhardness of directional solidified bismuth-lead eutectic alloy. *Current Applied Physics*, 13, 587-593.
- [35] Ma, D., Jie, W.Q., Xu, W., Li, Y., & Liu, S. (1998). Unidirectional solidification of Al-Cu eutectic with the accelerated crucible rotation technique, *Journal of Crystal Growth*, 194, 398-405.
- [36] Şahin, M., & Çadırılı, E. (2012). The effects of temperature gradient and growth rate on the microstructure of directionally solidified Sn-3.5Ag eutectic solder. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 23, 484-492.



Araştırma Makalesi–Research Article

Ophrys mammosa Desf. subsp. *mammosa* (Orchidaceae) Polinaryumlarında Bazı Hormonların Araştırılması

Investigation of Some Hormones in Polinariums of *Ophrys mammosa* Desf. subsp. *mammosa* (Orchidaceae)

Mehmet Aybeke^{1*}

Geliş / Received: 11/11/2022

Revize / Revised: 24/02/2023

Kabul / Accepted: 13/03/2023

ÖZ

Orkidelerde polenler polinaryum denen kümeler şeklindedir ve orkide polinaryumlarında hormonal hiçbir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle çalışmanın amacı orkide polinaryumlarındaki hormonların tespit edilmesidir. Bu amaçla araziden toplanan *Ophrys mammosa* subsp *mammosa* polinaryumları, laboratuvara getirilmiştir. Çalışmada Salisilik asit(SA), Absisik asit(ABA), Jasmonik asit(JA), Gibberellik asit(GA3) ve Indol-3-asetik(IAA)asit hormonları numunelerde taranmıştır. Hidrolize olmayan bitkisel ekstraksiyon ile muamele edilen numuneler LC–MS/MS cihazında çalışmaya alınmıştır. LC–MS/MS cihaz çalışması sonucunda Salisilik asit 2,6736 ng/gr, Absisik asit 65,6926 ng/gr, Jasmonik asit 12,2367 ng/gr bulunmuş, Gibberellik asit ve Indol-3-Asetik asit tespit edilmemiştir. Tespit edilen bulgular, güncel literatürler ışığında tartışılmıştır ve ileride yapılacak orkide üreme biyolojisi çalışmalarına katkıda bulunacağına inanılmaktadır. Çalışma bu yönüyle bir ilk olma niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler-Orkide, Polen, Hormon, Salisilik Asit, Jasmonik Asit

ABSTRACT

Pollen in orchids is in the form of clusters called polynarium and no hormonal studies have been found in orchid polynariums. Therefore, the aim of the study is to determine the hormones in orchid polynariums. For this purpose, *Ophrys mammosa* subsp *mammosa* polynariums collected from the field were brought to the laboratory. In the study, Salicylic acid, Abscisic acid, Jasmonic acid, Gibberellic acid and Indole-3-acetic acid hormones were screened in the samples. The samples treated with non-hydrolyzed herbal extraction were taken into the study in LC–MS/MS device. As a result of the LC–MS/MS device study, Salicylic acid was found to be 2.6736 ng/gr, Abscisic acid 65.6926 ng/gr, Jasmonic acid 12.2367 ng/gr, Gibberellic acid and Indole-3-Acetic acid were not detected. The findings are discussed in the light of current literature and it is believed that they will contribute to future orchid reproductive biology studies. The study is a first in this respect.

Keywords- Orchid, Pollen, Hormone, Salicylic Acid, Jasmonic Acid

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mehmetaybeke@trakya.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-9512-5313>)
Biyoloji Bölümü, Trakya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Balkan Yerleşkesi, Merkez, Edirne, Türkiye

I. GİRİŞ

Orchidaceae familyası, karasal veya ağaçlar üzerinde epifitler olmak üzere ototrof, saprofitik veya parazitik çok değişik yelpazede bitki formlarını içermektedir [1]. Bitkilerin en büyük ailesi olarak kabul edilen Orchidaceae, 25.000–35.000 türden oluşur [2]. Ülkemizdeki orkidelerin büyük bir bölümü Orchidoideae subfamilyası Orchideae tribusuna ait karasal orkidelerdir. Türkiye’de Orchidaceae familyası 24 cins ve toplamda 229 taksonla temsil edilmektedir [3]. Bu sayı her geçen gün yeni orkidelerin keşfi ile gittikçe artmaktadır. Dikkate değer güzellikteki bu bitkiler, çiçek varyasyonları ve değişik tozlaşma yöntemleri ile birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur [4].

Orkide polenleri konusunda birçok morfolojik ve taksonomik çalışma yapılmıştır. Kısmen de embriyolojik, in vivo polen çimlenmesi ve tozlaşma sonrası gelişim süreci hakkında çalışmalar vardır [5-7]. Tozlaşma sonrası çalışmalarında, polenin stigmaya temasından sonra olan olaylar kısmen hormonal olarak incelenmiştir. Örneğin; *Dendrobium* stigmalarına başka taksonlardan polenlerin tozlaşması sonrasında çiçeklerde etilen hormonunun arttığı ve bununla alakalı olarak çiçek solmasının hızlandığı belirtilmiştir [8]. Curtis [9], *Vanda* cinsine ait polenlerde büyük miktarda oksin hormonu olduğunu ileri sürmüştü ve bu oksin hormonunun tozlaşma sonrasında etileni tetiklediğini belirtmiştir [10]. Ayrıca orkideler dışındaki bazı bitkilerde yapılan bir başka çalışmada polen ekstraktlarında oksin ve giberellinlerin olduğu belirtilmiştir [11]. Bir başka yayında orkide polenlerinin IAA kaynağı olduğu belirtilmiştir [12].

Ayrıca polen aktivitesi ve tohum kapasitesi ilişkisi üzerinde bazı çalışmalar da mevcuttur [13,14]. Oysa Orchidaceae familyasında hem embriyolojik özellikleri hem de polen strüktürleri, diğer Angiospermae familyalardan daha farklıdır [15]. Birçok orkide cinsinde, polenler tetrad şeklindedir ve böylece binlerce tetrad pollinium denen kitlelerde toplanmıştır; aksine birkaç cinsde ise polenler granular taneler halindedir [15]. Orkide polenlerinin polinyum halinde toplanması nedeniyle hemen hemen en fazla gelişmiş çoklu polen üniteleri neredeyse Orchidaceae familyasına özgü olma niteliğindedir. Polinyumlar da viskidyum adında bir sap üzerinde toplanarak polinaryumları oluştururlar. Polenlerin hormon içerikleri ile ilgili fazla çalışmaya rastlanmamış olduğundan bu konu oldukça yenilik içermektedir. Orkidelerde de aynı şekilde polen ve hormon ikileminde yapılan çalışma çok az olup bu sonuçlar yukarıda verilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı; *Ophrys mammosa* subsp. *mammosa* taksonundaki polinaryumlarda bazı hormon miktarlarının tespit edilmesidir.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada araştırma materyali, Trakya Üniversitesi Tıp Fakültesi arkası otoban kenarındaki çalılık alanlardan toplanmış *Ophrys mammosa* Desf. subsp. *mammosa* taksonuna ait bitkilerden elde edilen polinaryumlar kullanılmıştır (Şekil 1). Toplanan materyalin bir kısmı, herbaryum kurallarına göre kurutularak EDTU 8206 numara ile herbaryuma (Trakya Üniversitesi Herbaryumu) kayıt edilmiştir.



Şekil 1. *Ophrys mammosa* subsp. *mammosa* 'ya ait bitkinin arazi ortamındaki görünümü

Polenlerde hormonlar Agilent 1200 infinity LC (Likit Kromatografi), Agilent 6460 Triple Quadrupole MS/MS sistem Jet Stream Electrospray iyonizasyon kaynaklı (ESI) (Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA) kütle/kütle spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir.

Yaklaşık 1 gram bitki dokusu, 10 ml isopropil+metanol+su karışımında homojenizatör ile homojenize edilerek sonrasında 4°C'de 20 dakika 10.000 rpm'de santrifüj edilmiştir. Bunu takiben süpernatant alınarak sırasıyla 45µ ve 20µ PTFE filtreden süzölmüştür. Süzölen bu örnek viallere alınarak analiz için 1 µl enjeksiyon yapılmıştır. Çalışmada kalibrasyon eğrileri her bir hormon için 1-200 ng/l aralığında çizilecek deneme 3 tekrerrülü olarak yapılmıştır. Çalışmalarda Agilent Poroshell 120 EC-C18 (4,6x50 mm, 2,7 µm particle size) kolon kullanılmış kolon fırın sıcaklığı 25°C olarak ayarlanmıştır. Mobile Faz A ultrasaf su, 0,2 % amonyum format (v/v), 0,2 % formik asit (v/v). Mobile Faz B metanol, 0,2 % amonyum format (v/v), 0,2 % formik asit (v/v) olarak hazırlanmıştır. Akış hızı sabit sıcaklıkta 0,3 ml/dak olarak ayarlanarak ve gradient profili aşağıdaki gibi uygulanmıştır:

0 - 1 dak, 70 % A, 30 % B; 3 - 7 dak; 30 %, 70 %; 9 -10 dak. 50 % A, 50 % B; 11 - 12 dak; 70 % A, 30 % B. Toplam analiz süresi 12 dakika olarak ayarlanmıştır. Çalışmalarda kütle spektrometresi (MS/MS) koşulları aşağıdaki gibidir: İyonlaştırıcı gaz sıcaklığı: 350°C, Nebulizer gaz basıncı:45 psi, nozzle voltaj: 500V, Kapılar ilgili voltaj: 3000V, sheat gaz sıcaklığı 400°C, sheat gaz akışı 12 l/ dakika. Enjeksiyon sonunda elde edilen pik alanları Mass Hunter (version B.06.01) yazılımı ile açılarak ve pik alanları kullanılarak Absisik asit (ABA), Jasmonik asit (JA) ve Salisilik asit (SA) değerleri belirlenmiştir [16].

Her bir hormon denemesi 3 tekrerrülü olarak gerçekleştirilmiş ve data sonuçları ortalama üzerinden verilmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

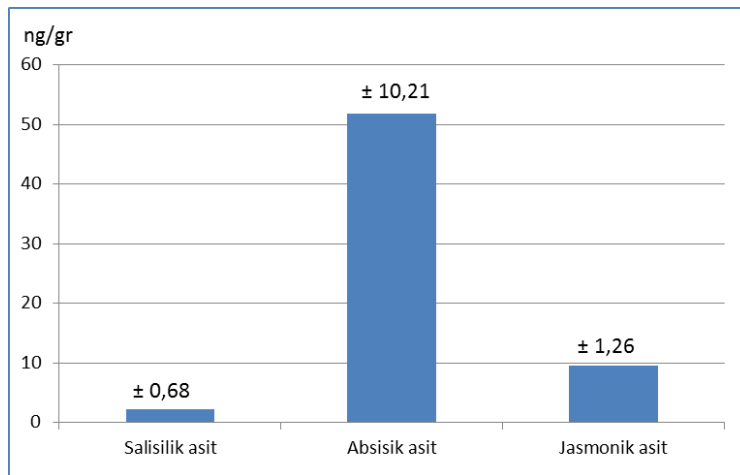
Çalışmada her 3 denemede de Salisilik asit (SA), Absisik asit (ABA) ve Jasmonik asit (JA) hormonları bulunmuş; fakat Gibberellik asit ve Indol asetik asit hormonları polenlerde çıkmamıştır.

1. denemede Salisilik asit 2,4929 ng/gr, Absisik asit 61,5419 ng/gr, Jasmonik asit 11,5850 ng/gr olarak tespit edilmiştir.

2. denemede Salisilik asit 3,4262 ng/gr, Absisik asit 77,3273 ng/gr, Jasmonik asit 13,6933 ng/gr olarak tespit edilmiştir.

3. denemede ise Salisilik asit 2,1017 ng/gr, Absisik asit 58,2087ng/gr, Jasmonik asit 11,4318ng/gr olarak tespit edilmiştir.

Buna göre her 3 denemenin ortalamaları ise Salisilik asit 2,6736 ($\pm 0,68$) ng/gr , Absisik asit 65,6926 ($\pm 10,21$) ng/gr, Jasmonik asit 12,2367 ($\pm 1,26$) ng/gr olarak bulunmuştur. Her 3 denemede de en büyük değerler Absisik asitte, ikinci değerler Jasmonik asitte, 3. değerler de salisilik asitte çıkmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Salisilik asit, Absisik asit, Jasmonik asit hormon ortalamaları (ng/gr). Sütun üzerindeki rakamlar standart sapmadır.

ABA, hem biyotik hem de abiyotik strese verilen yanıtları düzenleyen bir stres hormonudur [17]. ABA, embriyonun olgunlaşması ve çevresel kaynaklı strese karşı cevapta yer alan birinci derecede önemli bir hormondur. Ayrıca, tohumun çimlenmesi sırasında hücre bölünmesi ve buna bağlı olarak uzamada görevlidir. Ekseriyetle büyüme hormonlarına zıt yönde etkiler yaratır ve büyümeye ket vurur. Bu nedenle ABA, meyve

içindeki tohumların, meyvedeki neme ve karanlığa bağlı olarak hızlıca ve erkenden çimlenmesini önler; böylece sonbaharda yayılan bir tohumun sert kış koşullarında erkenden çimlenmesine engel olur. Dolayısıyla zamansız tohum çimlenmesini engellemiş olur ve çimlenmenin ilkbaharda oluşmasına böylelikle zemin hazırlar. Absisik asit, bitkilerin kuraklık gibi abiyotik ve değişik biyotik çevresel stres koşullarına karşı direnmesini sağlayan önemli bir sinyaldir [18]. ABA miktarı, tohum olgunlaşması sırasında normalden 100 kata kadar yükselebilir. Böylelikle gelişen tohumlardaki bu yüksek ABA, çimlenmeyi engellediği gibi ayrıca özel proteinlerin sentezini de sağlamaktadır. Söz konusu bu proteinler, olgunlaşma sürecindeki tohumlarda yüksek su kaybına karşı tohumun sağ kalmasını sağlar. ABA, dormansinin tohumlarda devamını da sağlamaktadır. Ayrıca ABA'nın flavonoid/fenol sentezinde ve antioksidan yanıtın düzenlenmesinde önemli işlevleri vardır [19].

Tozlaşmamış karpuz çiçeklerinde, güçlü ABA biyosentezinin, yumurtalığı döllenmeden önce korumalı, hareketsiz bir durumda tuttuğu gözlemlenmiştir [20].

Tohum gelişiminde absisik asit görevlidir. Absisik asit, sporofitten gametofite ve gametofitten sporofite embriyo gelişiminin birçok aşamasında yer alır. Burada, depo ürünlerinin birikimi, desikasyon toleransı, dormansi, çimlenme ve çimlenme sonrası büyümenin durdurulmasında ABA'nın rolü vardır [21].

Bitki hormonu olarak absisik asit (ABA), bitki büyümesi ve gelişiminin birçok yönünde önemli bir rol oynar ve birçok kanıt göstermiştir ki, ABA domates poleni gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak ABA, anter spesifik genlerin ekspresyonunu düzenleyerek polen olgunlaşmasını etkiler [22]. ABA'nın büyümeyi teşvik etmedeki güçlü noktası olmasa da, aslında ABA, bitki büyümesi ve gelişiminin birçok yönünde olumlu bir rol oynar. Ancak ABA'nın özelliği, büyüme ve gelişme üzerindeki düzenleyici etkisinin büyük ölçüde konsantrasyonu ile yakından ilgili olmasıdır. Bitkilerdeki ABA içeriği, normal büyüme ve gelişme aşamasında çok hassas bir seviyede tutulur. ABA homeostazi bozulduğunda bitkilerin büyüme ve gelişmesi etkilenecektir [22]. ABA kendi sinyali ile polen olgunlaşmasını düzenler. Azalan ABA sinyal seviyeleri, anter spesifik genlerin ekspresyonunu düzenleyen polen transkripsiyon faktörlerinin değişikliklerine neden olabilir; bu da sonuçta bir dizi anormal polen olgunlaşmasının nedenidir. Dolayısıyla bu bilgiler ışığında; bizim bulgularımızda da ABA'nın diğer hormonlardan daha yüksek çıkması oldukça mantıklı görünmektedir.

ABA, bitki büyümesini, uyku halini düzenleyen ve zorluklara yanıt veren önemli bir bitki hormonudur. ABA'nın sadece dişi ve erkek çiçeklerin farklılaşmasına [23] ve tohum embriyosunun gelişimine [24-26] katılmadığı bulunmuştur. Ayrıca ABA, meyvenin gelişimine ve olgunlaşmasına geniş çapta katılır [27-29] ve şeker sinyal iletimi ve asimilatların dağılımında önemli bir rol oynar [30-32]. Aynı şekilde, diğer hormonlar gibi, ABA da bitki üreme gelişiminde rol oynar. ABA, *Brassica napus*'ta mikrospor türevli embriyoların indüksiyonunda yer almıştır [33]. Bu arada ABA'nın domates meyvesinin ovaryum gelişimi ve meyveye dönüşümü üzerindeki etkileri de doğrulanmıştır [34].

SA'nın hem gelişim ve hem de strese cevapta önemli etkisi vardır [35]. SA büyüme ile ilgili metabolizmada, fotosentezde ve stres koşullarına karşı dayanıklılıkta birçok fizyolojik olayda görevlidir. Ayrıca SA, patojen saldırısı durumunda bir sinyal olarak görev yapar ve patojenite ile ilgili proteinlerin (PR proteinleri) sentezini başlatır; böylelikle sistemik dayanıklılığı sağlar. SA önemli bir stres hormonu olup [36] SA aktivitesi ile biyotik strese karşı direnç sağlanır [37].

SA, ayrıca çiçeklerde termojenite ile alakalıdır. *Cycas* erkek organlarında ilk defa tespit edilip sonradan yapılan araştırmalar ile Annonaceae, Araceae, Aristolochiaceae, Cyclanthaceae, Nymphaeaceae ve Palmae familyalarına ait bazı Angiosperm türlerinin çiçekleri ya da çiçek durumlarında da termojenite varlığı tespit edilmiştir [38]. Bizim bulgularımızda da polenlerin erkek gametofit olduğu ve erkek organlarda bulunduğu dikkate alındığında termojenite nedeniyle SA çıkması muhtemel görünmektedir.

SA, ek kök oluşumunda da etkilidir. Uygun konsantrasyonlarda eksojen SA uygulaması, salatalık hipokotillerinde ek kök oluşumunu desteklemiştir. SA, ek kök oluşumu sırasında düzenleyici olarak işlev görür [39]. Bitki büyüme ve gelişiminde SA, konsantrasyonuna ve bitki büyüme koşullarına ve gelişim aşamalarına bağlı olarak farklı rollere sahiptir [40]. Şöyle ki; genel olarak, optimal SA konsantrasyonlarının uygulanması, bitki büyümesi ve gelişimi üzerinde faydalı etkiler göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek SA seviyeleri bitki gelişimini olumsuz etkiler [41].

ROS (Reaktif oksijen türleri, serbest radikaller), metabolizmanın ve bitkilerin biyotik ve abiyotik çevresel uyarılara verdiği yanıtın önemli düzenleyicileridir ve ROS, bitki gelişimi için de önemlidir [42]. SA, ROS birikimini teşvik ederek pirinçte kök meristem aktivitesini korur [43]. SA'nın abiyotik stres altında spikelet dejenerasyonunun düzenlenmesinde de rol oynayabileceği öne sürülmüştür [44]. SA'nın ısı stresi altındaki bitkilere dışarıdan uygulanması, spikelet dejenerasyonunu önemli ölçüde azaltıp ve polen canlılığını arttırmıştır [45-46]. Diğer çalışmalar ayrıca SA'nın polen canlılığını, çiçek fertilitasını ve normal dişi çiçeklerin gelişimini düzenlemede önemli roller oynadığını bildirmiştir [47-48]. Özetle, ROS homeostazi ve SA hormonunun spikelet gelişimini ve polen fertilitasını etkilediği gösterilmiştir [49].

SA ve onun türevi, MeSA, *Camelia oleifera*'nın polen tüpü büyümesinde rol oynamıştır [50]. Bazı çalışmalar SA'nın tozlaşma ve dölleme ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Yalı armutunun tozlaştırılmış pistilinde, SA miktarı önemli ölçüde artar ve in vitro polen çimlenmesini ve polen tüpünün uzamasını teşvik ettiği ve meyve tutumu oranını oldukça arttırdığı bulunmuştur [51]. *Arabidopsis thaliana*'da SA inhibe edici etkilidir. Dolayısıyla muhtemelen farklı bitki türlerinde polen ve polen tüpünün SA'ya farklı tepkisi nedeniyle SA'nın polen çimlenmesini ve polen tüpü büyümesini destekleyebileceği bulunmuştur [50]. Ancak, *A.thaliana*'dan [52] farklı olarak, eksojen SA ve MeSA, daha düşük konsantrasyonlarda *C.oleifera*'nın polen çimlenmesini ve polen tüpünün uzamasını teşvik etmiştir.

JA özellikle mekanik yaralanmalara, böcek otçullarına, abiyotik ve biyotik stres koşullarına, nematodlara, ağır metallere, soğuk stresine, kuraklık stresine, tuz stresine ve UV stresine, mevsimsel ve sirkadiyen ritimlerin neden olduğu değişikliklere karşı savunmada önemli bir hormondur [53-54]. Mekanik yaralanmaya dayalı herbisit istilasında yaralı dokularda JA aktivitesi hızlanır ve savunma için gerekli metabolizma hızı artırılır [55]. Ayrıca Mazen ve Lin [56], tıpkı bizim sonuçlarımız gibi ABA, SA, JA gibi savunma hormonları arasında antagonistik bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. JA, yaprak sararmasına, yaprak, çiçek ve meyvalarda absisyona neden olmakta, köklenmeyi ve yumru oluşumunu sağlamakta, asmalarda tendril oluşumuna katkı sağlamakta ve beta-karoten ve etilen sentezini artırmaktadır. Ayrıca JA, tohum çimlenmesi ve polen çimlenmesini engellemektedir. Domateste yapılan bir çalışmada, dölleme öncesi mikro ve megagametofit gelişiminde yer alan SIMYB21 geninin transkripsiyonu için JA sinyalinin gerekli olduğu gösterilmiştir [57].

Literatür taramalarımıza göre sadece *Petunia hybrida* ve *Lilium* polenlerinde yüksek oranda Giberellik asit ve IAA tespit edilmiştir [58]. Benzer şekilde orkide polenlerinde de yapılan bir çalışmada yüksek IAA varlığına dikkat çekilmiştir [12]. Oysa bizim sonuçlarımızda bu her iki hormon da tespit edilmemiştir. Bunu yerine daha çok büyümeye ket vurucu Absisik asit, strese ve gelişmeye odaklı Salisilik asit ve Jasmonik asit hormonları yüksek oranlarda çıkmıştır. Tahminimize göre burada polen rezervlerinin, çimlenme gerçekleşinceye kadar stabil halde kalmasına ve çimlenmenin tozlaşmaya kadar engellenmesine odaklı bir strateji izlenmektedir. Sonuçlarımız bu yönüyle oldukça dikkat çekici özelliktedir. Ayrıca yukarıda ayrıntılı olarak verilen bilgiler ışığında polen olgunlaşması ve çimlenmeye hazırlık için bu her 3 hormonun da çıkması oldukça muhtemel görünmektedir. İlâveten bulgularımız, hem orkideler hem de polenler açısından hem de bu 3 hormon açısından dikkat çekici olup yenilik arz etmektedir.

Orkide polenleri üzerinde benzer hiçbir bilgiye rastlanılmamıştır. Orkidelerde tozlaşma (polinasyon) ve sonrasındaki polen çimlenmesi, ovul ve embriyo kesesi gelişimi olaylarında hormonal çalışmalar çok sayıda mevcuttur [12,59]; fakat tozlaşmaya hazır olgun polinasyon hormonlarının ne olduğu ve bunların seviyeleri konusunda herhangi bir bilgiye rastlanılmamıştır. Dolayısıyla belirlenen verilerin orkide polinasyon çimlenmesi ve tozlaşma sonrası ovul gelişimi olaylarıyla (= post pollinasyon fenomena) bütünleşmiş olarak incelendiğinde daha açıklayıcı olacağı anlaşılmaktadır. Muhtemeldir ki tozlaşma ve polen çimlenmesi sürecinde de bu hormonlardan bazıları işlev görebilecektir. Sonuç olarak bulgularımız tamamıyla yeni ve özgün nitelikte olup orkidelerde tozlaşma ve sonrası "post polinasyon fenomena" olaylarında karanlıkta kalmış önemli noktaları aydınlatacağı düşünülmektedir. Sonraki çalışmalarımız bu yönde devam edecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Leake, J. R. (2005). Plants parasitic on fungi: unearthing the fungi in myco-heterotrophs and debunking the 'saprophytic' plant myth. *Mycologist*, 19, 113-122.
- [2] Attri, L. K., Bhanwra R. K. & Nayyar, H. (2020). Pollination induced embryology studies in *Aerides multiflora* (ROXB.). *International Journal of Botanical Studies*, 5(4), 211–215.
- [3] Güler, N. ve Deniz, İ. G. (2012). *Orchidaceae. Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)*. 1.baskı. Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Basımı, İstanbul, 630-652.
- [4] Cozzolino, S. and Widmer, A. (2005). Orchid diversity: an evolutionary consequence of deception? *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 487-494.
- [5] Poddubnaya-Arnoldi, V.A. (1964). *General Embryology of the Angiosperms*. Nauka Publishing House, Moscow,253.
- [6] Arditti, J. (1992). *Fundamentals of Orchid Biology*. John Wiley and Sons, New York, 502.
- [7] Clifford,S.C., & Owens, C.J. (1990). The stigma, style and ovarian transmitting tract in teh Oncidiinae (Orchidaceae): Morphology, developmental anatomy and histochemistry. *Botanical Gazette* 151(4), 440-451.
- [8] Ketsa, S., Bunya-Atichart, K. and Van Doorn, W.G. (2001). Ethylene production and post pollination development in Dendrobium flowers treated with foreign pollen. *Australian Journal of Plant Physiology*, 28,5, 409-415.
- [9] Curtis, J. T. (1943). An unusual pollen reaction in 11h/coniopsis. *American Orchid Society Bullten* 11: 258-60.

- [10] Burg, S.P. and Dijkman, M.J. (1967). Ethylene and Auxin Participation in Pollen Induced Fading of Vanda Orchid Blossoms. *Plant Physiology*, 42, 1648-1650.
- [11] Barendse, G.W.M, Rodrigues-Prereira, A.S., Berkers P.A., Driessen F.M., Van Eyden-Emons, A., Linskens H.F. (1970). Growth Hormones in pollen, styles and ovaries of *Petunia hybrida* and of *Lilium* species. *Acta Botanica Neerlandica*, <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1970.tb00639.x>
- [12] Strauss, M.S., Arditti, J. (1984). Postpollination phenomena in orchid flowers.12. Effects of pollination, emasculation, and auxin treatment on flowers of *Cattleya porcia cannizaro* and the rostellum of *Phalaenopsis*. *Botanical Gazette*, 145(1). 43-49.
- [13] Johnson, S.D., Nilsson, L.A. (1999). Pollen carryover, geitonogamy and the evolution of deceptive pollination systems in orchids. *Ecology*, 80,8, 2607-2619.
- [14] Proctor, H.C. (1998). Effect of pollen age on fruit set, fruit weight and seed set in three orchid species. *Canadian Journal of Botany*, 76,3, 420-427.
- [15] Pandolfi, T., Pacini, E. and Calder, D.M. (1993). Ontogenesis of monad pollen in *Pterostylis plumosa* (Orchidaceae, Neottioideae). *Plant Systematic and Evolution*, 186, 175-185.
- [16] Doganlar, Z. B. (2012). Physiological and genetic responses to pesticide mixture treatment of *Veronica beccabunga*. *Water Air & Soil Pollution*, 223, 6201–6212.
- [17] Mehrotra, R., Bhalothia, P., Bansal, P., Basantani, M.K., Bharti, V., Mehrotra, S. (2014). Abscisic acid and abiotic stress tolerance – Different tiers of regulation. *Journal of Plant Physiology*, 171: 486–496.
- [18] Karakurt, H., Aslantaş, R., Eşitken, A. (2010). Tohum Çimlenmesi ve Bitki Büyümesi Üzerinde Etkili Olan Çevresel Faktörler ve Bazı Ön Uygulamalar. *U. Ü. Ziraat fakültesi Dergisi*, 24, 2, 115-128.
- [19] Jia, H.F., Chai, Y.M., Li, C.L., Lu, D., Luo, J.J., Qin, L. et al. (2011). Abscisic Acid Plays an Important Role in the Regulation of Strawberry Fruit Ripening. *Plant Physiology*, 157 (1):188–99.
- [20] Hu, Z., Lan, S., Zhao, N., Su, N., Xue, Q., Liu, J., Deng, Q., Yang, J. And Zhang, M. (2019). Soft-X-irradiated pollens induce parthenocarpy in watermelon via rapid changes of hormone-signalings and hormonal regulation. *Scientia Horticulturae*, 250, 317–328.
- [21] Chen, K., Guo - Jun, Li, Bressan, R. A., Chun - Peng, S., Jian - Kang, Z. and Yang, Z. (2020). Abscisic acid dynamics, signaling, and functions in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 62, 1, 25–54.
- [22] Wang, X., Na, X., Dong, K., Li, H., Shi, S., Liu, Z., Cao, X., Cui, X., Dai, S. (2021). SINCED1 affects pollen maturation in tomato by regulating the expression of anther-specific genes. *Plant Growth Regulation*, 95:191–205.
- [23] Xiao, H.S., Lv, L.X., Chen, Z.T. (2003) Dynamic changes of endogenous hormone in litchi (*Litchi chinensis* sonn.) pistil and stamen during flower development. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 9:279–283
- [24] Cheng, Z.J., Zhao, X.Y., Shao, X.X., Wang, F., Zhou, C., Liu, Y.G., Zhang, Y., Zhang, X.S. (2014). Abscisic acid regulates early seed development in *Arabidopsis* by ABI5-mediated transcription of Short Hypocotyl Under Blue1. *Plant Cell*, 26:1053–1068
- [25] Finkelstein, R.R., Gampala, S.S., Rock, C.D. (2002). Abscisic acid signaling in seeds and seedlings. *Plant Cell* 14:15–45
- [26] Kanno, Y., Jikumaru, Y., Hanada, A., Nambara, E., Abrams, S.R., Kamiya, Y., Seo, M. (2010). Comprehensive hormone profiling in developing *Arabidopsis* seeds: examination of the site of abscisic acid biosynthesis, abscisic acid transport and hormone interactions. *Plant Cell Physiology*, 51:1988–2001
- [27] Sun, L., Yuan, B., Zhang, M., Wang, L., Cui, M., Wang, Q., Leng, P. (2012). Fruit-specific RNAi-mediated suppression of SINCED1 increases both lycopene and β -carotene contents in tomato fruit. *Journal of Experimental Botany*, 63:3097–3108
- [28] Wang, X., Yin, W., Wu, J., Chai, L.J., Yi, H.L. (2016). Effects of exogenous abscisic acid on the expression of citrus fruit ripening-related genes and fruit ripening. *Scientia Horticulturae*, 201:175–183
- [29] Zhang, Y.S., Li, Q., Jiang, L., Kai, W.B., Liang, B., Wang, J., Du, Y.W., Zhai, X.W., Wang, J.L., Zhang, Y.Q., Sun, Y.F., Zhang, L.S., Leng, P. (2018). Suppressing type 2 protein phosphatases alters fruit ripening and the stress response in tomato. *Plant Cell Physiology*, 59:142–154
- [30] Jia HF, Xie ZQ, Wang C, Shangguan LF, Qian N, Cui MJ, Liu ZJ, Zheng T, Wang MQ, Fang JG (2017) Abscisic acid, sucrose, and auxin coordinately regulate berry ripening process of the Fujiminori grape. *Funct Integr Genomics* 17:441–457
- [31] Oh, H.D., Yu, D.J., Chung, S.W., Chea, S., Lee, H.J. (2017). Abscisic acid stimulates anthocyanin accumulation in 'Jersey' highbush blueberry fruits during ripening. *Food Chemistry*, 244:403–407
- [32] Villalobos-González, L., Peña-Neira, A., Ibáñez, F., Pastenes, C. (2016). Long-term effects of abscisic acid (ABA) on the grape berry phenylpropanoid pathway: gene expression and metabolite content. *Plant Physiology and Biochemistry*, 105:213–223
- [33] Zou, J., Abrams, G.D., Barton, D.L., Taylor, D.C., Pomeroy, M.K., Abramset, S.R. (1995). Induction of lipid and oleosin biosynthesis by (+)-Abscisic Acid and its metabolites in microspore-derived embryos of *Brassica*

- napus L.cv reston (Biological responses in the presence of 8'-Hydroxyabscisic Acid). *Plant Physiology*, 108:563–571
- [34] Kai, W., Fu, Y., Wang, J., Liang, B., Li, Q., Leng, P. (2019). Functional analysis of SINCED1 in pistil development and fruit set in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientific Reports*, 9:16943–16955
- [35] Xia XJ, Yan-Hong Z, Kai S, Zhou J, Foyer CH, Jing-Quan Y (2015) Interplay between reactive oxygen species and hormones in the control of plant development and stress tolerance. *J Exp Bot* 66:2839–2856. doi:10.1093/jxb/erv089
- [36] Xiao-Jian, X., Yan-Hong, Zhou, K., Shi, J., Zhou, C.H., Foyer and Jing-Quan, Yu. (2015). Interplay between reactive oxygen species and hormones in the control of plant development and stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 66(10): 2839–2856.
- [37] Kang G, G Li, T Guo. Molecular mechanism of salicylic acid-induced abiotic stress tolerance in higher plants. *Acta Physiol Plant*. 2014; 36: 2287–2297. doi:10.1007/s11738-014-1603-z.
- [38] [Oçkun, M.A. (2013). *Bağcılıkta Metil Jasmonat (MeJA), Jasmonik Asit (JA) ve Salisilik Asitin (SA) Aşıda Kallun Oluşumu Üzerine Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [39] Bellini, C., Pacurar, D.I., Perrone, I. (2014). Adventitious roots and lateral roots: similarities and differences. *Annual Review of Plant Biology*, 65:639–666.
- [40] Koo, Y.M., Heo, A.Y., Choi, H.W. (2020). Salicylic acid as a safe plant protector and growth regulator. *Plant Pathology Journal*, 36:1–10.
- [41] Chun-Juan, D., Xin-Yan, L., Lu-Lu, X., Ling-Ling, W., Qing-Mao, S. (2020). Salicylic acid regulates adventitious root formation via competitive inhibition of the auxin conjugation enzyme CsGH3.5 in cucumber hypocotyls. *Planta*, 252:75.
- [42] Waszczak, C., Carmody, M., and Kangasjarvi, J. (2018). Reactive oxygen species in plant signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 69, 209–236.
- [43] Xu, L., Zhao, H. Y., Ruan, W. Y., Deng, M. J., Wang, F., Peng, J. R., et al. (2017). Abnormal inflorescence meristem1 functions in salicylic acid biosynthesis to maintain proper reactive oxygen species levels for root meristem activity in rice. *Plant Cell* 29, 560–574.
- [44] Wang, Z. Q., Zhang, W. Y., and Yang, J. C. (2018). Physiological mechanism underlying spikelet degeneration in rice. *Journal of Integrative Agriculture*, 17, 1475–1481.
- [45] Zhang, C. X., Feng, B. H., Chen, T. T., Zhang, X. F., Tao, L. X., and Fu, G. F. (2017). Sugars, antioxidant enzymes and IAA mediate salicylic acid to prevent rice spikelet degeneration caused by heat stress. *Plant Growth Regulation*, 83, 313–323.
- [46] Zhao, Q., Zhou, L. J., Liu, J. C., Cao, Z. Z., Du, X. X., Huang, F. D., et al. (2018). Involvement of CAT in the detoxification of HT-induced ROS burst in rice anther and its relation to pollen fertility. *Plant Cell Reports*, 37, 741–757.
- [47] Østergaard, L., Petersen, M., Mattsson, O., and Mundy, J. (2002). An Arabidopsis callose synthase. *Plant Molecular Biology*, 49, 559–566.
- [48] Liu, M. L., Li, W. Y., Zhao, G., Fan, X. M., Long, H. X., Fan, Y. R., et al. (2019). New insights of salicylic acid into stamen abortion of female flowers in tung tree (*Vernicia fordii*). *Frontiers in Genetics*, 10:316.
- [49] Zhou, D., Shen, W., Cui, Y., Liu, Y., Zheng, X., Li, Y., Wu, M., Fang, S., Liu, C., Tang, M., Yi, Y., Zhao, M. and Chen, L. (2021). APICAL SPIKELET ABORTION (ASA) Controls Apical Panicle Development in Rice by Regulating Salicylic Acid Biosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 12:636877.
- [50] Lu, M., Junqin, Z., Yiyao, L., Jin, Y., Xiaofeng, T. (2021). CoNPR1 and CoNPR3.1 are involved in SA- and MeSAMediated growth of the pollen tube in *Camellia oleifera*. *Physiologia Plantarum*, 172:2181–2190.
- [51] Zhao, S., Zhang, Y. & Zhao, Y. (2012). Effect of salicylic acid on pollen germinating and pollen tube growth of pear. *Hubei Agricultural Science*, 51, 1366–1369.
- [52] Rong, D., Luo, N., Mollet, J.C., Liu, X. & Yang, Z. (2016). Salicylic acid regulates pollen tip growth through an NPR3/NPR4-independent pathway. *Molecular Plant*, 9, 1478–1491.
- [53] Wasternack, C. (2014). Action of jasmonates in plant stress responses and development—applied aspects. *Biotechnology Advances*, 32:31–39
- [54] Zhao, S., Ma, Q., Xu, X., Li, G., Hao, L. (2016). Tomato jasmonic aciddeficient mutant spr2 seedling response to cadmium stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3):603–610
- [55] Heil, M., Ibarra-Laclette, E., Adame-Alvarez, R.M., Martinez, O., Ramirez-Chavez, E., Molina-Torres, J. et al. (2012). How plants sense wounds: damaged-self recognition is based on plantderived elicitors and induces octadecanoid signaling. *PLoS One*, 7:e30537.
- [56] Mazen, A. and Na-Sheng, L. (2015). Roles of plant hormones in the regulation of host–virus interactions. *Molecular Plant Pathology*, 16(5): 529–540.
- [57] Niwa, T., Suzuki, T., Takebayashi, Y., Ishiguro, R., Higashiyama, T., Sakakibara, H. and Ishiguro, S. (2018). Jasmonic acid facilitates flower opening and floral organ development through the upregulated expression of SIMYB21 transcription factor in tomato. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 82, 292–303.

- [58] Barendse, G.W.M, Rodrigues Prereira, A.S., Berkers, P.A., Driessen, F.M., Van Eyden-Emons, A., Linskens, H.F. (1970). Growth Hormones in pollen , styles and ovaries of *Petunia hybrida* and of *Lilium* species. *Acta Botanica Neerlandica*. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1970.tb00639.x>
- [59] Gandawidjaja, D. and Arditti, J. (1982). Post-Pollination Phenomena in Orchid Flowers. XI. Autogamy in *Phajus tankervilleae* (Aiton) Bl, Orchidaceae. *American Journal of Botany*, 69, 3, 335-338.



Araştırma Makalesi -Research Article

Evaluation of SNPs and miRNAs in the *BID*, *MAPK10*, and *AGER* Genes Related to Alzheimer's Disease by Using *In Silico* Tools

Alzheimer Hastalığıyla İlişkili *BID*, *MAPK10* ve *AGER* Genlerindeki SNP ve miRNA'ların *In Silico* Araçlar Kullanılarak Değerlendirilmesi

Nur Demirci¹, Ebru Özkan Oktay^{2*}, Mesut Karahan³

Geliş / Received: 16/11/2022

Kabul / Accepted: 01/03/2023

ABSTRACT

Alzheimer's disease (AD) is a multifactorial disease resulting from both genetic and environmental factors, which are pathologically defined by the accumulation of intracellular hyperphosphorylated tau protein, neurofibrils tangles, and extracellular amyloid β protein in the brain. The purpose of this study is to estimate the potentially damaging effects of missense single nucleotide polymorphisms (SNPs) in the *BID*, *MAPK10* and *AGER* genes associated with AD using various *in silico* tools and to determine the effects of SNPs on miRNAs. In addition, it is aimed to determine the gene-gene and protein-protein interactions through various software tools.

Consequently, it was estimated that there may be harmful effects of seven polymorphisms in the *BID* gene, twenty-seven in the *MAPK10* gene and three in the *AGER* gene. It was obtained that some SNPs decrease the effectiveness of miRNA-mRNA binding, enhance, break, create a new binding zone and/or destroy the miRNA-mRNA binding zone in the *BID* and *MAPK10* genes. miRNA-SNP analyses could not provide information on the *AGER* gene.

In this study, SNPs in the *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes, which are estimated to be high-risk SNPs, will be able to provide data for future genotyping studies. SNPs that are estimated to be high-risk and SNPs that may have a role in miRNA- mRNA activity can be assessed as a priority in experimental studies related to AD.

In the future, experimental studies are proposed to investigate the clinical effects of harmful/disease-related missense SNPs and SNPs affecting mRNA-miRNA interaction.

Keywords- Alzheimer's Disease, *AGER*, *BID*, *MAPK10*, *In silico*

¹Contact: nurdemirci18@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2925-0703>)

Neuroscience Master's Degree, Institute of Health Sciences, Üsküdar University, İstanbul, Türkiye

^{2*} Corresponding Author Contact: ebru.ozkanoktay@uskudar.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-0395-9845>)

Department of Laboratory Technology, Vocational School of Health Services, Üsküdar University, İstanbul, Türkiye

³ Contact: mesut.karahan@uskudar.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8971-678X>)

Biomedical Device Technology, Vocational School of Health Services, Üsküdar University, İstanbul, Türkiye

ÖZ

Alzheimer hastalığı (AH), beyinde hücre içi hiperfosforile tau proteini, nörofibril yumakları ve hücre dışı amiloid β proteininin birikimi ile patolojik olarak tanımlanan hem genetik hem de çevresel faktörlerden kaynaklanan multifaktöriyel bir hastalıktır. Bu çalışmanın amacı, çeşitli *in silico* araçları kullanarak AH ile ilişkili *BID*, *MAPK10* ve *AGER* genlerindeki yanlış anlamlı tek nükleotid polimorfizmlerinin (SNP'ler) potansiyel olarak zarar verici etkilerini tahmin etmek ve SNP'lerin miRNA'lar üzerindeki etkilerini belirlemektir. Ayrıca çeşitli yazılım araçları ile gen-gen ve protein-protein etkileşimlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Sonuç olarak, *BID* geninde yedi, *MAPK10* geninde yirmi yedi ve *AGER* geninde üç polimorfizmin zararlı etkilerinin olabileceği tahmin edilmiştir. *BID* ve *MAPK10* genlerinde bazı SNP'lerin miRNA-mRNA bağlanmasının etkinliğini azalttığı, arttırdığı, kırdığı, yeni bir bağlanma bölgesi oluşturduğu ve/veya miRNA-mRNA bağlama bölgesini yok ettiği elde edilmiştir. miRNA-SNP analizlerinde *AGER* genine ait bilgi edinilememiştir.

Bu çalışmada *BID*, *MAPK10* ve *AGER* genlerindeki yüksek riskli olduğu tahmin edilen SNP'ler gelecekteki genotiplenme çalışmaları için veri sağlayabilecektir. Yüksek riskli olduğu tahmin edilen SNP'ler ve miRNA-mRNA aktivitesinde rolü olabilecek SNP'ler AH ile ilgili deneysel çalışmalarda öncelikli olarak değerlendirilebilecektir. Gelecekte, zararlı/hastalıkla ilgili yanlış anlamlı SNP'lerin ve mRNA-miRNA etkileşimini etkileyen SNP'lerin klinik etkilerini araştırmak için deneysel çalışmalar önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler- Alzheimer Hastalığı, *AGER*, *BID*, *MAPK10*, *In silico*

I.INTRODUCTION

Alzheimer's disease (AD) is a multifactorial disease resulting from both genetic and environmental factors, which are pathologically defined by the accumulation of intracellular hyperphosphorylated tau protein in the brain, and extracellular amyloid β protein. The genetic factors that cause AD began to be investigated in the early 1990s with linkage analysis methods [1].

The Human Genome Project and the technological methods that develop rapidly with it show that many diseases are not caused by a single gene, but are caused by many factors that occur in our DNA structure. By conducting many studies, such as genome-wide association studies (GWAS), many variations found simultaneously on the entire genome can be determined. As a result of these studies, many variations have been obtained in AD. With these studies, single nucleotide polymorphisms (SNP) and miRNAs found in genes have become the focus of attention [2].

SNP is defined as the single base pair positions formed by different sequence alleles that exist in healthy individual genomes within a given society [3]. The frequency of these alleles must be 1% or more in that society, alleles less than 1% are not considered SNP [4]. The SNP is divided into two mainly synonymous and non-synonymous groups. Non-synonymous is divided into two groups as missense and nonsense. Missense SNPs, on the other hand, cause nucleotide change, resulting in different amino acid coding [5]. SNPs facilitate the emergence of the disease by creating a predisposition or demonstrating a cumulative effect without the actual cause of the disease [6].

MicroRNAs (miRNAs) are RNA molecules that regulate mRNAs' expression, most of which do not encode proteins [7, 8] miRNAs exhibit tissue-specific expression differences. Most of the miRNAs discovered (such as miR-9, miR-128) are synthesized only in the brain [9, 10]. SNPs that may occur in the structures or target sites of miRNAs disrupt miRNA-mRNA coupling. SNPs affecting miRNA-mRNA interactions cause anomalies in protein levels. Therefore, miRNAs are able to disrupt molecular pathways such as neurogenesis, amyloid synthesis, and acquired immunity [9].

The aim of this study was to determine the SNPs within AD-related *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes and to estimate the potential damaging/harmful effects of missense SNPs on the proteins encoded by these genes using various *in silico* tools. In addition, it was aimed to identify the possible effects of SNPs in these genes on the miRNA-mRNA interactions using various bioinformatics tools. For this purpose, *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes were primarily selected and analyzed using bioinformatics tools in this study. *The BID* gene is involved in the apoptosis pathway and causes mitochondrial dysfunction [11]. *The MAPK10* gene is a member of the JNK family involved in the unfolded protein response signalling pathway and is specifically expressed in the brain and

manages neuronal processes by integrating biochemical signals [11]. The *AGER* gene causes the accumulation of A β , which is the main cause of AD by being found in the AGE-RAGE signalling pathway [11].

II. MATERIALS AND METHODS

A series of tools and databases were used in the bioinformatics analysis in this study. The workflow was summarized in Figure 1.

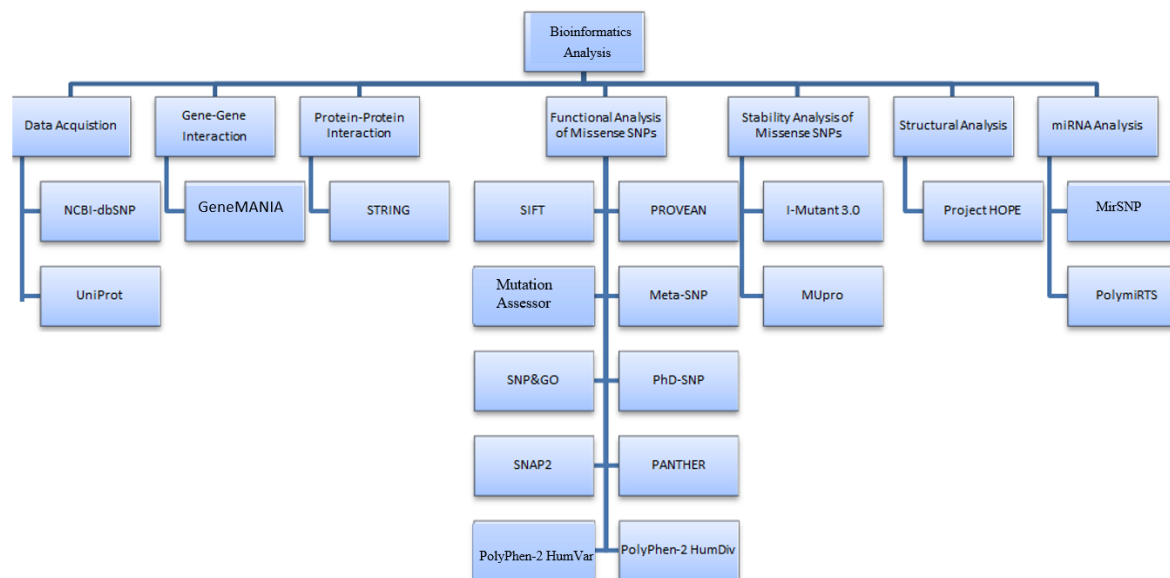


Figure 1. Workflow schema of bioinformatics analysis

A. Data Acquisition

The NCBI dbSNP database [12] was used to gain access to the missense SNPs of *BID* (NCBI Gene ID: 637), *MAPK10* (NCBI Gene ID: 5602), and *AGER* (NCBI Gene ID: 177) genes in December, February and March 2021, respectively. The missense SNPs within the *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes were chosen for bioinformatics analysis. The amino acid sequences of proteins encoded by the *BID* (UniProt accession number: P55957), *MAPK10* (UniProt accession number: P53779) and *AGER* (UniProt accession number: Q15109) genes were obtained from the UniProt database [13].

B. Determination of gene-gene relationships

BID, *MAPK10* and *AGER* genes' relationships with other genes were determined using the GeneMANIA [11] software tool. The GeneMANIA uses protein-protein interactions, protein-DNA interactions, gene-protein expression information, and phenotypic scanning data when creating gene-gene interaction data. In addition, it offers data by combining the associated gene networks with several different methods [14].

C. Determination of protein-protein relationships

BID, *MAPK10* and *AGER* proteins' relationships with other proteins were determined using the STRING [15] software tool. The STRING offers protein-protein interactions functionally and physically. It creates an association study by compiling public texts and using computational methods [16].

D. In silico prediction of possible effects of SNPs

A series of online software tools have been used to identify harmful/damaging missense SNPs in the *BID*, *MAPK10* and *AGER* genes as described below:

Altering one of the amino acids that make up protein sequences can cause a change in structure and function in proteins. SIFT [17] (Sorting intolerant from tolerant) is a tool that analyses and estimates the physical properties and sequence homologies of amino acids to understand whether these changes actually cause changes in protein function [18, 19]. PolyPhen-2 [20] (Polymorphism phenotyping v2) estimates the effects of amino acid changes in protein using the protein's sequence, phylogenetic and structural properties. It classifies the estimate as damaging and benign according to the scoring system it uses. High scoring means that it is likely to affect the protein [21]. PROVEAN [22] is the software tool used to determine the possible effects of amino acid alterations on the protein function [23, 24]. The SNAP2 [25] is a neural network system that predicts whether amino acid change is harmful using the protein's structural properties and the effectiveness of the solvent in that protein [26]. The SNPs&GO [27] is a machine learning method that estimates whether altered amino acids are associated with

the disease, taking into account the function of proteins. It provides forecast results using the functional scores it generates [28]. PhD-SNP [29] (Predictor of human deleterious single nucleotide polymorphisms) is machine learning that estimates whether amino acid change is associated with the disease, using multiple-array alignment protection scores [30]. Mutation Assessor [31] is a tool that estimates the functional effects of mutations discovered in missense polymorphisms or cancer disease on protein. In order to determine the functional effect, the program scores based on the evolutionary preservation of the affected amino acid in multiple-array alignment [32]. PANTHER [33] (Protein analysis through evolutionary relationships) is a comprehensive software tool that estimates whether SNP's formed in a protein sequence are harmful to protein structure, taking into account the evolutionary histories and functions [34]. META-SNP [35] is a complex software tool that presents whether amino acid changes in the protein sequence are associated with the disease. It uses SIFT, PANTHER, SNAP2, and PhD-SNP software to generate analysis results [36].

E. Estimation of Protein Stabilization Change

I-Mutant 3.0 and MUpro were used for the estimation of protein stabilization change. I-Mutant 3.0 [37] is a tool used to estimate the impact of amino acid changes in the protein sequence on protein stability. It also uses DeltaDeltaG (free energy change) to generate the forecast result [38]. MUpro [39] is a neural network system that estimates the effects of non-synonymous amino acid alterations on protein stability using DeltaDeltaG score [40].

F. Determination of amino acid properties and models

Project HOPE [41] tool used in this study creates 3-D models of the proteins and compares amino acid changes caused by SNPs in terms of size, charge and hydrophobicity [42].

G. miRNA analysis of *BID*, *MAPK10* and *AGER* genes

MirSNP and PolymiRTS software tools were used to identify SNPs that affected miRNAs, which regulate gene expression. The MirSNP [43] is a tool that predicts the effects of SNPs located in the 3'-UTR region on mRNA-miRNA binding. Those SNPs may have an influence on the miRNA-mRNA binding as an enhance, break, create and decrease[44]. PolymiRTS [45] provides information on SNPs occurring in miRNA seed regions and their target sites. The database shows the effect of SNPs in miRNA seed regions under functional classes as D, C, N and O. D: The derived allele disrupts a protected miRNA region. C: The derived allele creates a new miRNA region. N: The derived allele disrupts a nonconserved miRNA site (ancestral allele with support < 2). O: Refers to situations that the ancestral allele cannot be determined [46].

III. RESULTS

SNPs of human *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes were procured from the NCBI dbSNP. *BID* gene was determined to contain a total of 12440 SNPs of which 186 SNPs were missense. There was a total of 132004 SNPs found in the *MAPK10* gene of which 204 SNPs were missense. Finally, the *AGER* gene was determined to comprise a total of 1840 SNPs. 392 SNPs among them were missense. Those missense SNPs were selected for further analysis.

A. Results of gene-gene relationships

The relationships of *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes with other genes were shown in Figure 2A, Figure 2B, and Figure 2C, respectively. The 5 genes with which the *BID* gene interacts most closely: *BAK1*, *BCL2*, *BAX*, *BCL2L1*, and *NMT1*. When the input was limited to 20 genes, 279 connections were determined between them (Figure 2A). The 5 genes with which the *MAPK10* gene interacts most closely: *EBF1*, *SARM1*, *ARRB2*, *MAPK8IP3*, and *JUND*. When the input was limited to 20 genes, 143 connections were determined between them (Figure 2B). The 5 genes with which the *AGER* gene interacts most closely: *RELA*, *HMGB1*, *ITGAM*, *S100P*, and *S100A12*. When the input was limited to 20 genes, 262 connections were determined between them (Figure 2C).

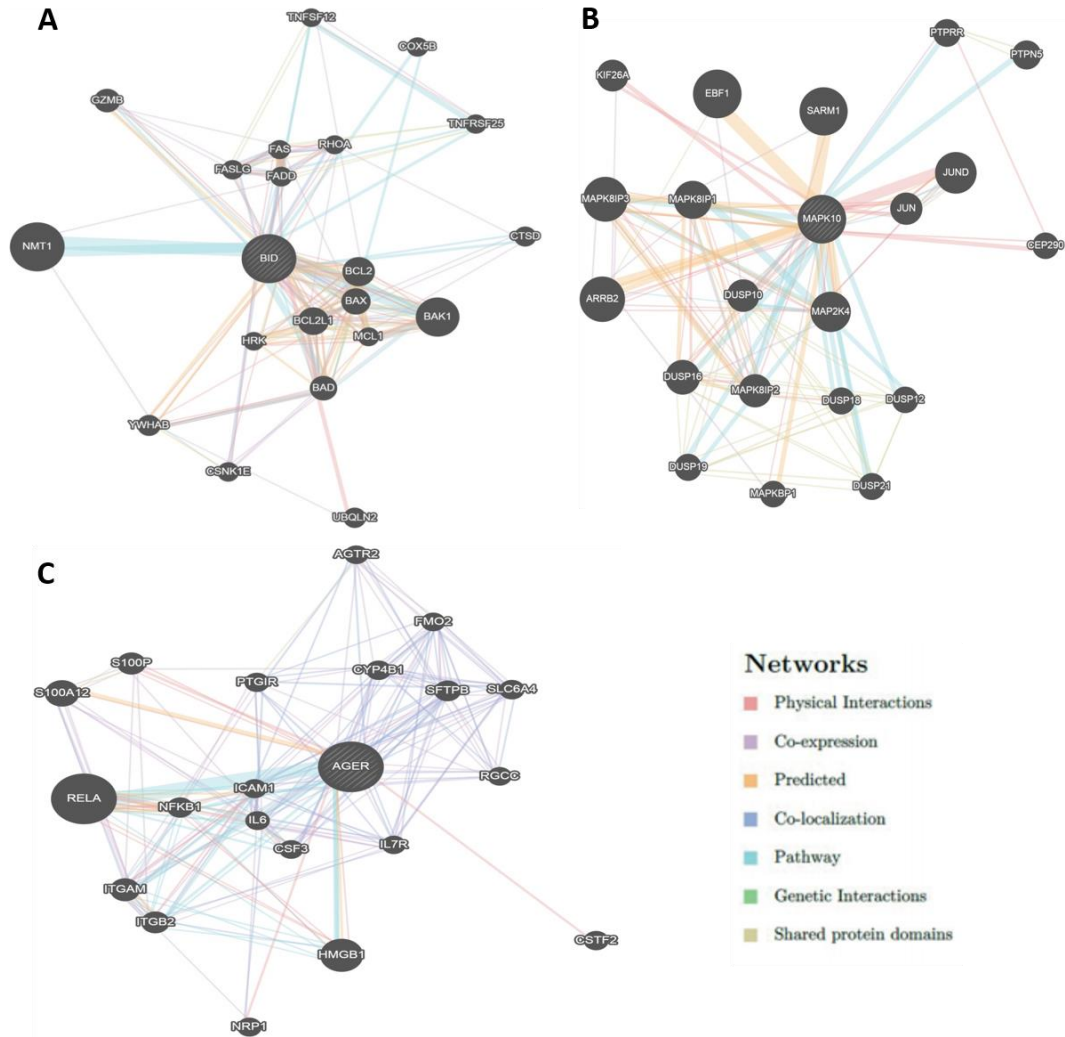


Figure 2. The interactions between genes related to the (A) *BID* gene (B) *MAPK10* gene, (C) *AGER* gene from GeneMANIA [11].

B. Results of protein-protein relationships

The input of the STRING software was limited to ten proteins to obtain protein-protein interactions of *BID*, *MAPK10*, and *AGER* proteins. As a result, 48, 30, and 41 connections were determined for *BID*, *MAPK10*, and *AGER* proteins, respectively (Figure 3).

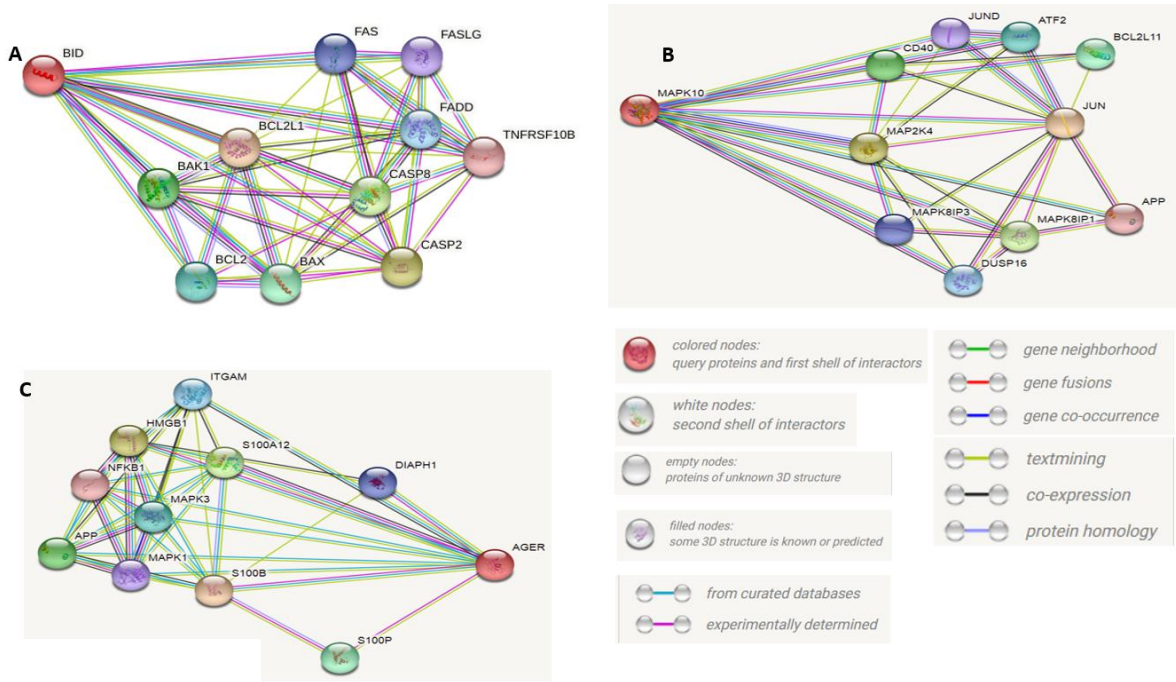


Figure 3. The protein-protein interactions of (A) BID, (B) MAPK10, (C) AGER and the types of connections from STRING [15]

C. In silico prediction results of possible effects of SNPs

The missense variants of *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes were analyzed via SIFT, PolyPhen-2 (HumVar and HumDiv), PROVEAN, Mutation Assessor, SNPs&GO, PhD-SNP, PANTHER, SNAP2, and META-SNP software tools. 7 disease-related/harmful SNPs were identified in the *BID* gene (out of 10 data from 9 software tools), 27 in the *MAPK10* gene (Out of 9 data from 8 software tools), and 3 in the *AGER* gene (out of 10 data from 9 software tools). The results are shown in Table 1-2 for *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes, respectively.

Table 1. Functional analysis results of SNPs from SIFT, PolyPhen-2, PROVEAN, and PANTHER

Gene	SNP ID	A.A.	SIFT	SIFT Score	PolyPhen-2 HumDiv	PolyPhen-2 HumDiv Score	PolyPhen-2 HumVar	PolyPhen-2 HumVar Score	PROVEAN	PROVEAN Score	PANTHER
<i>BID</i>	rs113033070	L19P	D.	0	PrD	1	PrD	0,998	D.	-4,531	PrD
<i>BID</i>	rs143734092	L151P	D.	0,005	PrD	0,999	PrD	0,99	D.	-5,964	Not found
<i>BID</i>	rs143734092	L105P	D.	0,007	PrD	1	PrD	0,983	D.	-5,071	PrD
<i>BID</i>	rs367829996	N181K	D.	0,013	PrD	0,999	PrD	0,978	D.	-4,506	PrD
<i>BID</i>	rs376912423	F171V	D.	0,006	PrD	1	PrD	0,998	D.	-5,714	Not found
<i>BID</i>	rs780833600	G8V	Not found	Not found	PrD	0,999	PrD	0,987	D.	-4,473	Not found
<i>BID</i>	rs1196785035	G8D	Not found	Not found	PrD	0,999	PrD	0,989	D.	-3,427	PrD
<i>MAPK10</i>	rs142571603	W390R	D.	0	PrD	1	PrD	1	D.	-13,13	Not found
<i>MAPK10</i>	rs143720396	A91V	Not found	Not found	PrD	0,998	PrD	0,944	D.	-3,334	Not found
<i>MAPK10</i>	rs372124619	W272R	D.	0,002	PrD	1	PrD	1	D.	-13,329	Not found
<i>MAPK10</i>	rs376073317	Y268C	D.	0,039	PrD	0,962	PrD	0,861	D.	-5,11	Not found
<i>MAPK10</i>	rs534048937	D189Y	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-8,368	Not found
<i>MAPK10</i>	rs756256876	N122Y	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-7,084	Not found
<i>MAPK10</i>	rs757457303	L153F	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-3,849	Not found
<i>MAPK10</i>	rs762664125	D207N	Not found	Not found	PrD	1	PrD	0,998	D.	-4,668	Not found
<i>MAPK10</i>	rs773390425	R63C	Not found	Not found	PrD	1	PrD	0,999	D.	-7,267	Not found
<i>MAPK10</i>	rs777561999	L190F	Not found	Not found	PrD	1	PrD	0,999	D.	-3,728	Not found
<i>MAPK10</i>	rs778824606	A231T	Not found	Not found	PrD	1	PrD	0,994	D.	-3,604	Not found
<i>MAPK10</i>	rs937510593	G250R	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-7,083	Not found
<i>MAPK10</i>	rs939639515	V244L	Not found	Not found	PoD	0,901	PoD	0,714	D.	-2,582	Not found
<i>MAPK10</i>	rs951209020	L95P	Not found	Not found	PrD	1	PrD	0,999	D.	-6,078	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1047724692	V53G	Not found	Not found	PrD	0,989	PrD	0,959	D.	-5,892	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1200724232	M339I	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-3,713	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1219541757	G237E	Not found	Not found	PoD	0,932	PoD	0,817	D.	-7,423	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1241029338	C251Y	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-9,858	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1304596003	D141H	Not found	Not found	PrD	0,989	PrD	0,911	D.	-5,596	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1314239624	R188M	Not found	Not found	PrD	1	PrD	0,998	D.	-5,525	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1337478269	A353D	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-5,472	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1336009977	V145L	Not found	Not found	PrD	0,968	PoD	0,865	D.	-2,792	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1367894037	C201W	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-10,43	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1580038340	W247R	Not found	Not found	PrD	1	PrD	1	D.	-12,594	Not found
<i>MAPK10</i>	rs939639515	V244M	Not found	Not found	PrD	0,998	PoD	0,886	D.	-2,652	Not found
<i>MAPK10</i>	rs1255789663	L190S	Not found	Not found	PrD	1	PrD	0,998	D.	-5,559	Not found
<i>MAPK10</i>	rs373516870	E255Q	Not found	Not found	PrD	0,998	PrD	0,991	D.	-2,742	Not found
<i>AGER</i>	rs138178120	C301S	D.	0	PrD	1	PrD	0,999	D.	-6,661	PrD
<i>AGER</i>	rs138726985	C144W	D.	0	PrD	1	PrD	1	D.	-9,74	PrD
<i>AGER</i>	rs201829223	C38W	D.	0	PrD	1	PrD	1	D.	-7,217	PrD

D: Deleterious; PrD: Probably Damaging, PoD: Possibly damaging

Table 2. Functional analysis results of SNPs from SNP&GO, Mutation Assessor, SNAP-2, PHD-SNP, and META-SNP

Gene	SNP ID	A.A.	SNPs&GO	SNPs&GO Score	Mutation Assessor	Mutation Assessor FI. Score	SNAP-2	SNAP-2 Score	SNAP-2 Expected Accuracy	PHD-SNP	PHD-SNP RI Score	META-SNP
<i>BID</i>	rs113033070	L19P	Disease	6	Medium	2,165	Effect	79	85%	Disease	8	Disease
<i>BID</i>	rs143734092	L151P	Disease	2	Medium	1,975	Effect	71	85%	Disease	4	Disease
<i>BID</i>	rs143734092	L105P	Disease	2	Low	1,935	Effect	83	91%	Disease	2	Disease
<i>BID</i>	rs367829996	N181K	Disease	5	Medium	2,14	Effect	61	80%	Disease	6	Disease
<i>BID</i>	rs376912423	F171V	Disease	0	Medium	2,14	Effect	69	80%	Disease	4	Disease
<i>BID</i>	rs780833600	G8V	Disease	2	Medium	2,165	Effect	60	80%	Disease	4	Disease
<i>BID</i>	rs1196785035	G8D	Disease	2	Medium	2,165	Effect	73	85%	Disease	1	Disease
<i>MAPK10</i>	rs142571603	W390R	Neutral	5	Medium	2,36	Effect	73	85%	Disease	0	Disease
<i>MAPK10</i>	rs143720396	A91V	Disease	6	Medium	2,375	Effect	30	66%	Disease	6	Disease
<i>MAPK10</i>	rs372124619	W272R	Disease	7	Neutral	0,58	Effect	74	85%	Disease	7	Disease
<i>MAPK10</i>	rs376073317	Y268C	Neutral	6	Low	1,68	Effect	38	66%	Disease	1	Disease
<i>MAPK10</i>	rs534048937	D189Y	Disease	3	High	4,4	Effect	94	95%	Disease	9	Disease
<i>MAPK10</i>	rs756256876	N122Y	Disease	6	Medium	2,42	Effect	43	71%	Disease	7	Disease
<i>MAPK10</i>	rs757457303	L153F	Disease	3	Medium	2,58	Effect	79	85%	Disease	7	Disease
<i>MAPK10</i>	rs762664125	D207N	Disease	4	Medium	3,42	Effect	90	95%	Disease	6	Disease
<i>MAPK10</i>	rs773390425	R63C	Disease	3	Low	0,895	Effect	25	63%	Disease	6	Disease
<i>MAPK10</i>	rs777561999	L190F	Disease	1	Medium	2,98	Effect	65	80%	Disease	5	Disease
<i>MAPK10</i>	rs778824606	A231T	Disease	3	High	3,605	Effect	51	75%	Disease	2	Disease
<i>MAPK10</i>	rs937510593	G250R	Disease	6	High	3,885	Effect	92	95%	Disease	9	Disease
<i>MAPK10</i>	rs939639515	V244L	Disease	0	Medium	2,17	Effect	85	91%	Disease	6	Disease
<i>MAPK10</i>	rs951209020	L95P	Neutral	6	Low	2,145	Effect	73	85%	Disease	7	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1047724692	V53G	Neutral	2	Low	0,805	Effect	76	85%	Disease	8	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1200724232	M339I	Disease	4	Medium	1,355	Effect	83	91%	Disease	5	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1219541757	G237E	Disease	4	Medium	3,015	Effect	95	95%	Disease	7	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1241029338	C251Y	Disease	8	Medium	1,115	Effect	45	71%	Disease	9	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1304596003	D141H	Neutral	4	Low	3,605	Effect	65	80%	Disease	7	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1314239624	R188M	Disease	4	Medium	3,37	Effect	85	91%	Disease	6	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1337478269	A353D	Disease	3	High	4,045	Effect	73	85%	Disease	8	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1336009977	V145L	Disease	0	Low	1,745	Effect	76	85%	Disease	2	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1367894037	C201W	Disease	5	Low	1,44	Effect	83	91%	Disease	0	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1580038340	W247R	Disease	8	High	4,635	Effect	95	95%	Disease	9	Disease
<i>MAPK10</i>	rs939639515	V244M	Disease	1	Medium	2,47	Effect	45	71%	Disease	8	Disease
<i>MAPK10</i>	rs1255789663	L190S	Disease	5	High	3,875	Effect	65	80%	Disease	6	Disease
<i>MAPK10</i>	rs373516870	E255Q	Disease	5	Medium	2,225	Effect	83	91%	Disease	3	Disease
<i>AGER</i>	rs138178120	C301S	Disease	2	High	4,235	Effect	76	85%	Disease	5	Disease
<i>AGER</i>	rs138726985	C144W	Disease	5	Medium	3,33	Effect	84	91%	Disease	7	Disease
<i>AGER</i>	rs201829223	C38W	Disease	2	Medium	3,385	Effect	85	91%	Disease	8	Disease

D. Protein Stabilization Results

The deleterious SNPs that were predicted by *in silico* tools as described in Section C were analyzed via I-Mutant and MUpro software tools. All of those amino acid changes caused by SNPs were predicted to decrease protein stability as shown in Table 3.

Table 3. Prediction results of protein stability

Gene	SNP ID	Nucleotide Change	Amino Acid Change	I-Mutant 3.0 Prediction	I-Mutant 3.0 RI	I-Mutant 3.0 DDG	MUpro Prediction	MUpro DDG
<i>BID</i>	rs113033070	A>G	L19P	Decrease	4	-1.65	Decrease	-2.3128234
<i>BID</i>	rs143734092	A>G	L151P	Decrease	6	-1.15	Decrease	-12.247.708
<i>BID</i>	rs143734092	A>G	L105P	Decrease	3	-1.71	Decrease	-20.025.928
<i>BID</i>	rs367829996	G>T	N181K	Decrease	6	-0.62	Decrease	-1.398417
<i>BID</i>	rs376912423	A>C	F171V	Decrease	8	-1.69	Decrease	-1.420.371
<i>BID</i>	rs780833600	C>A	G8V	Decrease	8	-0.71	Decrease	-0.4017768
<i>BID</i>	rs1196785035	C>T	G8D	Decrease	9	-1.20	Decrease	-0.66696436
<i>MAPK10</i>	rs142571603	A>G	W390R	Decrease	6	-0.62	Decrease	-1.0713584
<i>MAPK10</i>	rs143720396	G>A / G>C	A91V	Decrease	4	-0.39	Decrease	-0.58308152
<i>MAPK10</i>	rs372124619	A>G	W272R	Decrease	8	-1.16	Decrease	-15.438.938
<i>MAPK10</i>	rs373516870	C>G	E255Q	Decrease	7	-0.40	Decrease	-0.73364885
<i>MAPK10</i>	rs376073317	T>C	Y268C	Decrease	2	-1.10	Decrease	-0.76248657
<i>MAPK10</i>	rs534048937	C>A	D189Y	Decrease	3	-0.48	Decrease	-1.0071177
<i>MAPK10</i>	rs756256876	T>A	N122Y	Decrease	0	-0.07	Decrease	-0.73065093
<i>MAPK10</i>	rs757457303	T>C / T>G	L153F	Decrease	5	-0.92	Decrease	-0.80002274
<i>MAPK10</i>	rs762664125	C>T	D207N	Decrease	5	-0.64	Decrease	-0.92204047
<i>MAPK10</i>	rs773390425	G>A	R63C	Decrease	4	-1.19	Decrease	-0.7351192
<i>MAPK10</i>	rs777561999	C>A / C>T	L190F	Decrease	7	-1.14	Decrease	-1.245821
<i>MAPK10</i>	rs778824606	C>T	A231T	Decrease	6	-0.68	Decrease	-1.0137092
<i>MAPK10</i>	rs937510593	C>G	G250R	Decrease	4	-0.48	Decrease	-0.38427059
<i>MAPK10</i>	rs939639515	C>A / C>T	V244L	Decrease	2	-0.87	Decrease	-0.75885538
<i>MAPK10</i>	rs951209020	A>G	L95P	Decrease	7	-1.91	Decrease	-15.943.355
<i>MAPK10</i>	rs1047724692	A>C	V53G	Decrease	10	-2.86	Decrease	-2.725322
<i>MAPK10</i>	rs1200724232	C>T	M339I	Decrease	5	-0.61	Decrease	-0.95105635
<i>MAPK10</i>	rs1219541757	C>T	G237E	Decrease	6	-0.86	Decrease	-0.54729308
<i>MAPK10</i>	rs1241029338	C>T	C251Y	Decrease	1	-0.33	Decrease	-11.912.536
<i>MAPK10</i>	rs1304596003	C>G	D141H	Decrease	3	-0.33	Decrease	-0.8588084
<i>MAPK10</i>	rs1314239624	C>A	R188M	Decrease	5	-0.57	Decrease	-0.40248524
<i>MAPK10</i>	rs1337478269	G>T	A353D	Decrease	6	-0.72	Decrease	-0.96748389
<i>MAPK10</i>	rs1336009977	C>A / C>T	V145L	Decrease	6	-1.06	Decrease	-0.51623757
<i>MAPK10</i>	rs1367894037	G>C	C201W	Decrease	2	-0.26	Decrease	-11.970.366
<i>MAPK10</i>	rs1580038340	A>G	W247R	Decrease	7	-0.91	Decrease	-15.666.698
<i>MAPK10</i>	rs939639515	C>A / C>T	V244M	Decrease	5	-0.89	Decrease	-0.91713103
<i>MAPK10</i>	rs1255789663	A>G	L190S	Decrease	8	-2.12	Decrease	-1.9851829
<i>AGER</i>	rs138178120	C>G / C>T	C301S	Decrease	5	-0.63	Decrease	-1.3749336
<i>AGER</i>	rs138726985	A>C	C144W	Decrease	2	-0.21	Decrease	-0.67606746
<i>AGER</i>	rs201829223	A>C	C38W	Decrease	1	0.04	Decrease	-1.244.702

DDG: DeltaDelta G RI: Reliability Index

E. Results of amino acid features and modeling via Project HOPE

The features of variant residues such as size, charge, and hydrophobicity were summarized in Table 4-6 and three-dimensional models of BID, MAPK10 and AGER were given in Table 7-9, respectively. In addition, interactions of wild type residues with other residues in the MAPK10 protein and possible effects of variations on these interactions are presented in Table 10.

Table 4. Properties of wild and variant type amino acids of BID from Project HOPE [42]

SNP ID	Amino Acid Change	WILD-TYPE AMINO ACIDS			MUTANT TYPE AMINO ACIDS		
		Size	Charge	Hydrophobicity	Size	Charge	Hydrophobicity
rs113033070	L19P	>	-	-	<	-	-
rs143734092	L151P	>	-	-	<	-	-
rs143734092	L105P	>	-	-	<	-	-
rs367829996	N181K	<	Neutral	-	>	+ Charge	-
rs376912423	F171V	>	-	-	<	-	-
rs780833600	G8V	<	-	<	>	-	>
rs1196785035	G8D	<	Neutral	>	>	- Charge	<

Table 5. Properties of wild and variant type amino acids of MAPK10 from Project HOPE [42]

SNP ID	Amino Acid Change	WILD-TYPE AMINO ACIDS			MUTANT TYPE AMINO ACIDS		
		Size	Charge	Hydrophobicity	Size	Charge	Hydrophobicity
rs142571603	W390R	>	Neutral	>	<	+ Charge	<
rs143720396	A91V	<	-	-	>	-	-
rs372124619	W272R	>	Neutral	>	<	+ Charge	<
rs373516870	E255Q	-	- Charge	-	-	Neutral	-
rs376073317	Y268C	>	-	<	<	-	>
rs534048937	D189Y	<	- Charge	<	>	Neutral	>
rs756256876	N122Y	<	-	<	>	-	>
rs757457303	L153F	<	-	-	>	-	-
rs762664125	D207N	-	- Charge	-	-	Neutral	-
rs773390425	R63C	<	+ Charge	<	>	Neutral	>
rs777561999	L190F	<	-	-	>	-	-
rs778824606	A231T	<	-	>	>	-	<
rs937510593	G250R	<	Neutral	>	>	+ Charge	<
rs939639515	V244L	<	-	-	>	-	-
rs951209020	L95P	>	-	-	<	-	-
rs1047724692	V53G	>	-	>	<	-	<
rs1200724232	M339I	>	-	-	<	-	-
rs1219541757	G237E	<	Neutral	>	>	- Charge	<
rs1241029338	C251Y	<	-	>	>	-	<
rs1304596003	D141H	<	- Charge	-	>	Neutral	-
rs1314239624	R188M	>	+ Charge	<	<	Neutral	>
rs1337478269	A353D	<	Neutral	>	>	- Charge	<
rs1336009977	V145L	<	-	-	>	-	-
rs1367894037	C201W	<	-	-	>	-	-
rs1580038340	W247R	>	Neutral	>	<	+ Charge	<
rs939639515	V244M	<	-	-	>	-	-
rs1255789663	L190S	>	-	>	<	-	<

Table 6. Properties of wild and variant type amino acids of AGER from Project HOPE [42]

SNP ID	Amino Acid Change	WILD-TYPE AMINO ACIDS			MUTANT TYPE AMINO ACIDS		
		Size	Charge	Hydrophobicity	Size	Charge	Hydrophobicity
rs138178120	C301S	-	-	>	-	-	<
rs138726985	C144W	<	-	-	>	-	-
rs201829223	C38W	<	-	-	>	-	-

Table 7. Results of the 3D models of the BID protein via Project HOPE [42]



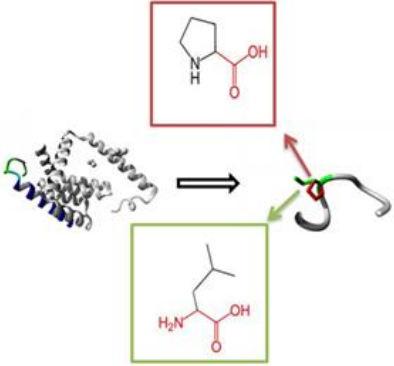
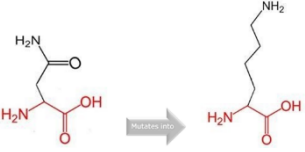



<p>rs113033070 L19P</p> 	<p>rs143734092 L151P</p> 	<p>rs143734092 L105P</p> 	<p>rs367829996 N181K</p> 
<p>rs376912423 F171V</p> 	<p>rs780833600 G8V</p> 	<p>rs1196785035 G8D</p> 	

Table 8. Results of the 3D models of the MAPK10 protein via Project Hope [42]

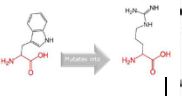
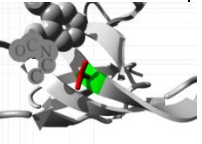
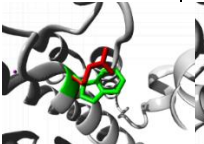

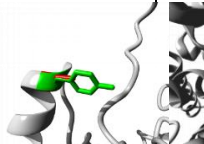
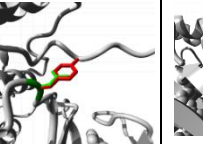
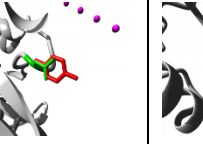
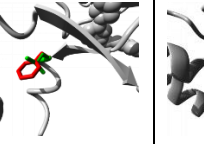
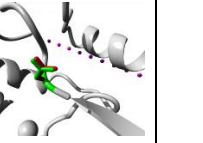
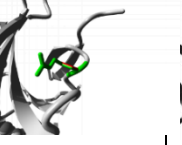
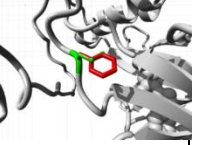
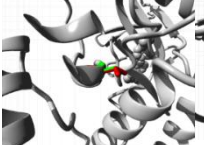
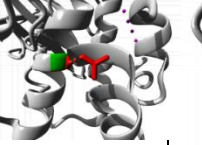
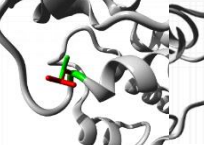
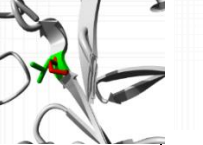
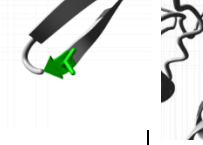
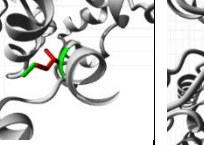

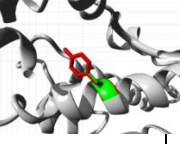

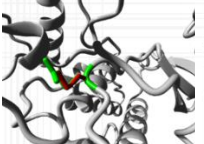
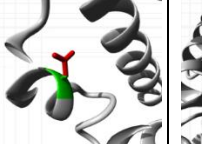
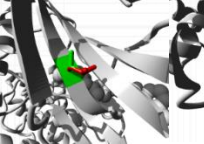
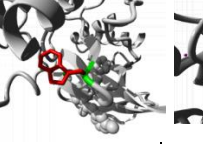
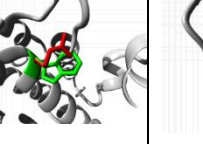
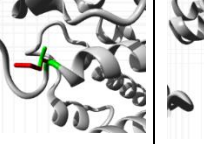
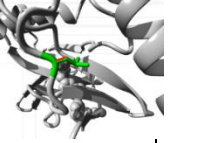
<p>rs142571603 W390R</p> 	<p>rs143720396 A91V</p> 	<p>rs372124619 W272R</p> 	<p>rs373516870 E255Q</p> 	<p>rs376073317 Y268C</p> 	<p>rs534048937 D189Y</p> 	<p>rs756256876 N122Y</p> 	<p>rs757457303 L153F</p> 	<p>rs762664125 D207N</p> 
<p>rs773390425 R63C</p> 	<p>rs777561999 L190F</p> 	<p>rs778824606 A231T</p> 	<p>rs937510593 G250R</p> 	<p>rs939639515 V244L</p> 	<p>rs951209020 L95P</p> 	<p>rs1047724692 V53G</p> 	<p>rs1200724232 M339I</p> 	<p>rs1219541757 G237E</p> 
<p>rs1241029338 C251Y</p> 	<p>rs1304596003 D141H</p> 	<p>rs1314239624 R188M</p> 	<p>rs1337478269 A353D</p> 	<p>rs1336009977 V145L</p> 	<p>rs1367894037 C201W</p> 	<p>rs1580038340 W247R</p> 	<p>rs939639515 V244M</p> 	<p>rs1255789663 L190S</p> 

Table 9. Results of the 3D models of the AGER protein via Project Hope [42]

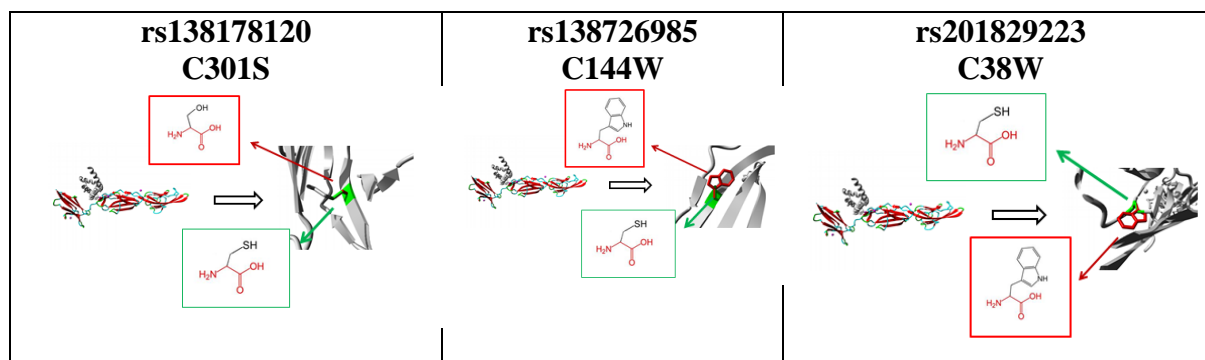


Table 10. Project HOPE software results of interactions by MAPK10 variants [42]

SNP ID	Amino Acid Change	Types of Bonds Established by Wild Type Amino Acid	Effect of Variation on Protein
rs773390425	R63C	It forms a hydrogen bond with aspartic acid in position 83 and forms a salt bridge.	As a result of the variation, these types of interaction may be affected due to the change in amino acid size, load, and hydrophobicity.
rs1304596003	D141H	It forms a salt bridge with lysine in the 94th position and arginine in the 97th position.	The difference in load as a result of the variation is thought to disrupt ionic interactions.
rs756256876	N122Y	It establishes hydrogen bonds with histidine in the 120th position and leucine in the 203rd position.	Differences in size and hydrophobicity that will occur in amino acids as a result of the variation can lead to deterioration of hydrogen bonds.
rs376073317	Y268C	In the 230th position, it establishes a hydrogen bond with arginine.	It causes the new position not to be in the right position to make the same hydrogen bond as the original wild-type position did. Hydrogen bond formation can be affected by hydrophobic change.
rs534048937	D189Y	It establishes hydrogen bonds with arginine in the 230th position and lysine in the 191st position. It also forms a salt bridge with arginine in the 107th and 110th positions and lysine in the 191st position.	Changing hydrophobicity can disrupt these interactions. Due to the load difference, this can disrupt ionic connections.
rs762664125	D207N	It establishes hydrogen bonds with histidine at the 187th position. It forms salt bridges with arginine in the 107th and 110th positions and lysine in the 191st positions.	The load difference as a result of the variation can disrupt such ionic connections.
rs1314239624	R188M	It forms salt bridges with aspartic acid in the 245th position and glutamic acid in the 382nd position.	The load change resulting from the variation can disrupt these ionic interactions.

F. miRNA Analysis Results Associated with BID, MAPK10, and AGER Genes

MirSNP and PolymiRTS software tools were used to analyze SNPs that are in *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes and cause various effects at miRNA-mRNA binding sites. The results of *BID* and *MAPK10* genes were presented in Table 11 and Table 12, respectively. There are no results were obtained for the *AGER* gene with both MirSNP and PolymiRTS.

Table 11. SNPs and miRNAs in *BID* gene predicted by miRNA target prediction databases.

Gene	Variation	dbSNP ID	miRNA	MirSNP	PolymiRTS	MirSNP Effect	PolymiRTS Effect
<i>BID</i>	A/C	rs1061200	hsa-miR-3145-3p	+	-	decrease	
<i>BID</i>	A/C	rs1061200	hsa-miR-4796-3p	+	-	break	
<i>BID</i>	T/A	rs1802194	hsa-miR-4289	-	+		C
<i>BID</i>	T/C	rs186394629	hsa-miR-141-5p	-	+		D
<i>BID</i>	T/C	rs186394629	hsa-miR-626	-	+		C
<i>BID</i>	T/C	rs186394629	hsa-miR-6740-3p	-	+		C
<i>BID</i>	T/C	rs186394629	hsa-miR-6876-3p	-	+		C
<i>BID</i>	A/T	rs1802194	hsa-miR-302c-5p	+	-	create	
<i>BID</i>	A/T	rs1802194	hsa-miR-3143	+	-	create	
<i>BID</i>	A/T	rs1802194	hsa-miR-4796-3p	+	-	enhance	
<i>BID</i>	T/A	rs2305001	hsa-miR-3121-3p	+	-	create	
<i>BID</i>	G/A	rs2305001	hsa-miR-3121-3p	+	-	create	
<i>BID</i>	G/A	rs2305001	hsa-miR-3143	+	-	decrease	
<i>BID</i>	G/A	rs2305001	hsa-miR-3143	+	-	decrease	
<i>BID</i>	T/G	rs2305001	hsa-miR-511	+	-	enhance	
<i>BID</i>	A/A	rs8190355	hsa-miR-4326	-	+		D
<i>BID</i>	A/G	rs8190355	hsa-miR-567	+	+	break	
<i>BID</i>	A/A	rs8190355	hsa-miR-567	+	+		D
<i>BID</i>	A/A	rs8190355	hsa-miR-6868-3p	-	+		D
<i>BID</i>	A/G	rs8190355	hsa-miR-3936	+	-	decrease	
<i>BID</i>	A/G	rs8190355	hsa-miR-4448	+	-	create	
<i>BID</i>	-/ATCT	rs8190356	hsa-miR-4477a	+	-	enhance	
<i>BID</i>	-/A	rs8190357	hsa-miR-4659a-5p	+	-	decrease	
<i>BID</i>	A/A	rs8190358	hsa-miR-6507-3p	-	+		D
<i>BID</i>	T/T	rs151268390	hsa-miR-6507-3p	-	+		D
<i>BID</i>	T/G	rs151268390	hsa-miR-4680-3p	+	-	decrease	
<i>BID</i>	-/CA	rs71680500	hsa-miR-3120-3p	+	-	decrease	
<i>BID</i>	G/G	rs115649437	hsa-miR-1266-3p	-	+		D
<i>BID</i>	G/G	rs115649437	hsa-miR-452-5p	-	+		D
<i>BID</i>	G/G	rs115649437	hsa-miR-3074-5p	-	+		D
<i>BID</i>	G/T	rs115649437	hsa-miR-7152-5p	-	+		C
<i>BID</i>	G/T	rs115649437	hsa-miR-892c-3p	-	+		C
<i>BID</i>	G/T	rs115649437	hsa-miR-4693-5p	-	+		C
<i>BID</i>	G/T	rs115649437	hsa-miR-4676-3p	-	+		C
<i>BID</i>	T/G	rs115649437	hsa-miR-513a-5p	+	-	enhance	
<i>BID</i>	T/T	rs151268390	hsa-miR-6507-3p	-	+		D

Table 11. (Continued)

BID	T/G	rs151268390	hsa-miR-302c-5p	-	+		C
BID	T/G	rs151268390	hsa-miR-552-5p	-	+		C
BID	T/G	rs151268390	hsa-miR-6882-5p	-	+		C
BID	T/G	rs151268390	hsa-miR-4680-3p	+	-	decrease	
BID	G/A	rs189671157	hsa-miR-130b-5p	+	+	create	
BID	A/A	rs189671157	hsa-miR-130b-5p	+	+		D
BID	G/A	rs189671157	hsa-miR-18a-3p	+	+	Break	
BID	A/G	rs189671157	hsa-miR-18a-3p	+	+		C
BID	A/G	rs189671157	hsa-miR-6886-3p	-	+		C
BID	A/G	rs189671157	hsa-miR-938	-	+		C
BID	G/A	rs192534350	hsa-miR-130b-5p	+	+	create	
BID	A/A	rs192534350	hsa-miR-130b-5p	+	+		D
BID	A/G	rs192534350	hsa-miR-6870-3p	-	+		C
BID	A/G	rs192534350	hsa-miR-7110-3p	-	+		C
BID	A/A	rs192534350	hsa-miR-452-3p	-	+		D
BID	A/A	rs189629146	hsa-miR-29a-5p	-	+		D
BID	A/C	rs189629146	hsa-miR-3613-5p	-	+		C
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-3661	+	+	break	
BID	C/C	rs149980557	hsa-miR-3661	+	+		D
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-619-3p	-	+		C
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-631	+	+	break	
BID	C/C	rs149980557	hsa-miR-631	+	+		D
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-7851-3p	-	+		C
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-30a-5p	+	-	decrease	
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-30d-5p	+	-	decrease	
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-30e-5p	+	-	decrease	
BID	C/A	rs149980557	hsa-miR-5693	+	-	decrease	
BID	G/A	rs147656401	hsa-miR-145-3p	-	+		C
BID	G/A	rs147656401	hsa-miR-3145-5p	+	-	break	
BID	T/A T/T	rs146895750	hsa-miR-4775	+	+	break	
BID	T/A T/T	rs146895750	hsa-miR-4775	+	+		D
BID	T/A	rs146895750	hsa-miR-144-3p	+	+	create	
BID	T/A	rs146895750	hsa-miR-144-3p	+	+		C
BID	T/T	rs146895750	hsa-miR-590-3p	-	+		D
BID	T/A	rs146895750	hsa-miR-16-1-3p	+	+	create	
BID	T/A	rs146895750	hsa-miR-16-1-3p	+	+		C
BID	C/T	rs181869684	hsa-miR-511-3p	-	+		C
BID	T/C	rs181869684	hsa-miR-124-3p	+	-	enhance	

Table 11. (Continued)

BID	T/C	rs181869684	hsa-miR-548an	+	-	enhance	
BID	T/C	rs181869684	hsa-miR-593-5p	+	-	break	
BID	T/C	rs181869684	hsa-miR-767-5p	+	-	break	
BID	T/C T/T	rs186394629	hsa-miR-141-5p	+	+	break	
BID	T/C T/T	rs186394629	hsa-miR-141-5p	+	+		D
BID	T/C	rs186394629	hsa-miR-626	+	+	create	
BID	T/C	rs186394629	hsa-miR-626	+	+		C
BID	T/C	rs186394629	hsa-miR-6740-3p	-	+		C
BID	T/C	rs186394629	hsa-miR-6876-3p	-	+		C
BID	T/C	rs186394629	hsa-miR-224-5p	+	-	enhance	
BID	T/C	rs148682143	hsa-miR-1299	+	-	enhance	
BID	G/C	rs113283699	hsa-miR-1303	+	-	create	
BID	G/C	rs113283699	hsa-miR-5683	+	-	break	
BID	-/CTTT	rs8190359	hsa-miR-3133	+	-	create	
BID	-/CTTT	rs8190359	hsa-miR-4773	+	-	create	
BID	-/CTTT	rs78336589	hsa-miR-3133	+	-	create	
BID	-/CTTT	rs78336589	hsa-miR-4773	+	-	create	
BID	C/T	rs8190361	hsa-miR-3177-3p	+	-	create	
BID	C/T	rs8190361	hsa-miR-3677-5p	+	-	enhance	
BID	C/T	rs8190361	hsa-miR-4479	+	-	break	
BID	C/T	rs8190361	hsa-miR-5693	+	-	enhance	
BID	A/G	rs8190362	hsa-miR-3677-5p	+	-	enhance	
BID	-/CTAT	rs144073937	hsa-miR-4477a	+	-	decrease	
BID	-/CTAT	rs144073937	hsa-miR-4662a-3p	+	-	enhance	
BID	-/CTAT	rs144073937	hsa-miR-659-3p	+	-	decrease	
BID	A/G	rs8190360	hsa-miR-4479	+	-	create	
BID	A/G	rs8190360	hsa-miR-4520a-5p	+	-	break	
BID	A/G	rs8190360	hsa-miR-4520b-5p	+	-	break	
BID	T/C	rs140522332	hsa-miR-4489	+	-	create	
BID	T/C	rs140522332	hsa-miR-4721	+	-	break	
BID	T/G	rs184390244	hsa-miR-4489	+	-	decrease	
BID	T/G	rs184390244	hsa-miR-4764-3p	+	-	break	
BID	T/G	rs184390244	hsa-miR-556-3p	+	-	enhance	
BID	T/G	rs184390244	hsa-miR-644b-5p	+	-	break	
BID	-/AA	rs25591	hsa-miR-4502	+	-	decrease	
BID	-/AA	rs25591	hsa-miR-888-5p	+	-	break	
BID	-/A	rs77339790	hsa-miR-4659a-5p	+	-	decrease	

Table 11.(Continued)

D: The derived allele disrupts a protected miRNA region
C: The derived allele creates a new miRNA region
Break: The derived allele breaks a new miRNA- mRNA binding site
Create: The derived allele breaks a conserved miRNA- mRNA binding site and creates a new miRNA- mRNA binding site
Decrease: The derived allele decreases a new miRNA- mRNA binding site
Enhance: The derived allele enhances a new miRNA- mRNA binding site

Table 12. SNPs and miRNAs in *MAPK10* gene predicted by miRNA target prediction databases.

Gene	Variation	dbSNP ID	miRNA	MirSNP	PolymiRTS	MirSNP Effect	PolymiRTS Effect
<i>MAPK10</i>	C/A	rs113524529	hsa-miR-6841-5p	-	+		C
<i>MAPK10</i>	T/C	rs193043601	hsa-let-7i-3p	+	+	create	
<i>MAPK10</i>	T/C	rs193043601	hsa-let-7i-3p	+	+		C
<i>MAPK10</i>	T/C	rs193043601	hsa-let-7i-3p	+	+	create	
<i>MAPK10</i>	T/C	rs193043601	hsa-let-7i-3p	+	+		C
<i>MAPK10</i>	G/A	rs142651370	hsa-miR-613	+	-	decrease	
<i>MAPK10</i>	G/A	rs142651370	hsa-miR-4677-5p	+	-	enhance	
<i>MAPK10</i>	G/A	rs142651370	hsa-miR-4482-3p	+	-	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs142651370	hsa-miR-22-5p	+	+	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs142651370	hsa-miR-22-5p	+	+		D
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs142651370	hsa-miR-4659a-3p	+	+	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs142651370	hsa-miR-4659a-3p	+	+		D
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs142651370	hsa-miR-4659b-3p	+	+	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs142651370	hsa-miR-4659b-3p	+	+		D
<i>MAPK10</i>	C/A	rs183690138	hsa-miR-4482-3p	+	-	decrease	
<i>MAPK10</i>	C/A	rs183690138	hsa-miR-4659b-3p	+	-	decrease	
<i>MAPK10</i>	C/A	rs183690138	hsa-miR-4659a-3p	+	-	decrease	
<i>MAPK10</i>	A/C	rs183690138	hsa-miR-494-3p	-	+		C
<i>MAPK10</i>	A/C	rs183690138	hsa-miR-510-3p	-	+		C
<i>MAPK10</i>	G/A	rs1202	hsa-miR-5197-5p	+	-	decrease	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-3622b-5p	+	+	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-3622b-5p	+	+		D
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-4720-5p	+	+	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-4720-5p	+	+		D
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-4799-3p	+	+	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-4799-3p	+	+		D
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-5588-5p	+	+	break	
<i>MAPK10</i>	G/A G/G	rs1202	hsa-miR-5588-5p	+	+		D
<i>MAPK10</i>	G/A	rs1202	hsa-miR-4774-5p	+	+	create	
<i>MAPK10</i>	G/A	rs1202	hsa-miR-4774-5p	+	+		C
<i>MAPK10</i>	G/A	rs1202	hsa-miR-652-3p	-	+		C
<i>MAPK10</i>	G/A	rs1202	hsa-miR-8074	-	+		C
<i>MAPK10</i>	G/A	rs146020875	hsa-miR-5092	-	+		C
<i>MAPK10</i>	T/C	rs138228504	hsa-miR-520g	+	-	break	
<i>MAPK10</i>	T/C	rs138228504	hsa-miR-4679	+	-	enhance	

Table 12. (Continued)

MAPK10	T/C	rs138228504	hsa-miR-3134	+	-	decrease	
MAPK10	T/C C/T	rs138228504	hsa-miR-3609	+	+	break	
MAPK10	T/C C/T	rs138228504	hsa-miR-3609	+	+		C
MAPK10	C/T	rs138228504	hsa-miR-3973	-	+		C
MAPK10	C/T	rs138228504	hsa-miR-520g-3p	-	+		C
MAPK10	T/C C/T	rs138228504	hsa-miR-520h	+	+	break	
MAPK10	T/C C/T	rs138228504	hsa-miR-520h	+	+		C
MAPK10	T/C C/T	rs138228504	hsa-miR-548ah-5p	+	+	break	
MAPK10	T/C C/T	rs138228504	hsa-miR-548ah-5p	+	+		C
MAPK10	T/C C/T	rs141818233	hsa-miR-3646	+	+	break	
MAPK10	T/C C/T	rs141818233	hsa-miR-3646	+	+		C
MAPK10	T/G	rs113910535	hsa-miR-519e-3p	+	-	enhance	
MAPK10	T/G	rs113910535	hsa-miR-515-3p	+	-	enhance	
MAPK10	T/G	rs113910535	hsa-miR-3681-3p	+	-	decrease	
MAPK10	T/G	rs113910535	hsa-miR-33b-3p	+	-	decrease	
MAPK10	T/G	rs113910535	hsa-miR-27a-3p	+	-	decrease	
MAPK10	G/G	rs113910535	hsa-miR-6778-3p	-	+		D
MAPK10	G/G	rs113910535	hsa-miR-6791-3p	-	+		D
MAPK10	G/G	rs113910535	hsa-miR-6829-3p	-	+		D
MAPK10	G/G	rs113910535	hsa-miR-6836-3p	-	+		D
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-519e-3p	+	-	enhance	
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-518e-3p	+	-	break	
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-515-3p	+	-	decrease	
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-372	+	-	create	
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-3681-3p	+	-	enhance	
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-33b-3p	+	-	enhance	
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-27b-3p	+	-	enhance	
MAPK10	G/A	rs17011312	hsa-miR-27a-3p	+	-	enhance	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302a-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302a-3p	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302b-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302b-3p	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302c-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302c-3p	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302d-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302d-3p	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302e	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-302e	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-372-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-372-3p	+	+		D
MAPK10	A/A	rs17011312	hsa-miR-373-3p	-	+		D
MAPK10	A/A	rs17011312	hsa-miR-3934-3p	-	+		D

Table 12. (Continued)

MAPK10	A/A	rs17011312	hsa-miR-519a-3p	-	+		D
MAPK10	A/A	rs17011312	hsa-miR-519b-3p	-	+		D
MAPK10	A/A	rs17011312	hsa-miR-519c-3p	-	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520a-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520a-3p	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520b	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520b	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520c-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520c-3p	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520d-3p	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520d-3p	+	+		D
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520e	+	+	create	
MAPK10	G/A A/A	rs17011312	hsa-miR-520e	+	+		D
MAPK10	A/G	rs17011312	hsa-miR-518e-3p	-	+		C
MAPK10	T/C C/C	rs188211415	hsa-miR-544b	+	+	create	
MAPK10	T/C C/C	rs188211415	hsa-miR-544b	+	+		D
MAPK10	T/C C/C	rs188211415	hsa-miR-1200	+	+	create	
MAPK10	T/C C/C	rs188211415	hsa-miR-1200	+	+		D
MAPK10	T/C C/C	rs188211415	hsa-miR-3915	+	+	create	
MAPK10	T/C C/C	rs188211415	hsa-miR-3915	+	+		D
MAPK10	C/C	rs188211415	hsa-miR-3928-3p	-	+		D
MAPK10	T/C	rs188211415	hsa-miR-5584-5p	+	-	enhance	
MAPK10	T/C	rs188211415	hsa-miR-5702	+	-	decrease	
MAPK10	C/C	rs188211415	hsa-miR-4324	-	+		D
MAPK10	T/C C/T	rs188211415	hsa-miR-4521	+	+	break	
MAPK10	T/C C/T	rs188211415	hsa-miR-4521	+	+		C
MAPK10	C/T	rs188211415	hsa-miR-651-3p	-	+		C
MAPK10	G/A	rs139770617	hsa-miR-607	+	-	enhance	
MAPK10	G/A	rs139770617	hsa-miR-3200-5p	+	-	create	
MAPK10	G/A G/G	rs139770617	hsa-miR-4324	+	+	break	
MAPK10	G/A G/G	rs139770617	hsa-miR-4324	+	+		D
MAPK10	G/G	rs139770617	hsa-miR-490-3p	-	+		D
MAPK10	G/G	rs139770617	hsa-miR-649	-	+		D
MAPK10	G/A	rs139770617	hsa-miR-3200-5p	-	+		C
MAPK10	G/A	rs139770617	hsa-miR-4251	-	+		C
MAPK10	G/A	rs139770617	hsa-miR-4329	-	+		C
MAPK10	G/A	rs139770617	hsa-miR-6761-5p	-	+		C
MAPK10	T/A	rs7660160	hsa-miR-4795-3p	+	-	decrease	
MAPK10	A/T	rs7660160	hsa-miR-126-5p	-	+		C
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-767-3p	+	-	enhance	
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-587	+	-	create	

Table 12. (Continued)

MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-584-3p	+	-	decrease	
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-525-5p	+	-	break	
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-520a-5p	+	-	break	
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-3180-5p	+	-	break	
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-3976	+	+	creat	
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-3976	+	+		C
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-6758-5p	-	+		C
MAPK10	C/A	rs17011314	hsa-miR-6856-5p	-	+		C
MAPK10	G/G	rs114030030	hsa-miR-7975	-	+		D
MAPK10	G/A	rs114030030	hsa-miR-593-3p	-	+		C
MAPK10	G/A	rs114030030	hsa-miR-6818-3p	-	+		C
MAPK10	G/A	rs114030030	hsa-miR-6895-3p	-	+		C
MAPK10	T/C	rs200043113	hsa-miR-595	-	+		C
MAPK10	T/C	rs200043113	hsa-miR-597-5p	-	+		C
MAPK10	G/C	rs145685583	hsa-miR-4307	+	-	decrease	
MAPK10	G/C	rs145685583	hsa-miR-3679-3p	+	-	decrease	
MAPK10	G/C	rs145685583	hsa-miR-19a-5p	-	+		C
MAPK10	G/C	rs145685583	hsa-miR-19b-1-5p	-	+		C
MAPK10	G/C	rs145685583	hsa-miR-19b-2-5p	-	+		C
MAPK10	G/C	rs145685583	hsa-miR-2052	-	+		C
MAPK10	T/C	rs184732983	hsa-miR-582-5p	+	-	decrease	
MAPK10	T/C	rs184732983	hsa-miR-495	+	-	break	
MAPK10	T/T	rs184732983	hsa-miR-4275	-	+		D
MAPK10	T/T	rs184732983	hsa-miR-495-3p	-	+		D
MAPK10	T/C T/T	rs184732983	hsa-miR-5688	+	+	break	
MAPK10	T/C T/T	rs184732983	hsa-miR-5688	+	+		D
MAPK10	T/T	rs184732983	hsa-miR-7-1-3p	-	+		D
MAPK10	T/T	rs184732983	hsa-miR-7-2-3p	-	+		D
MAPK10	G/A	rs3733367	hsa-miR-203	+	-	enhance	
MAPK10	G/A G/G	rs3733367	hsa-miR-3619-3p	+	+	Break	
MAPK10	G/A G/G	rs3733367	hsa-miR-3619-3p	+	+		D
MAPK10	G/A G/G	rs3733367	hsa-miR-4776-5p	+	+	break	
MAPK10	G/A G/G	rs3733367	hsa-miR-4776-5p	+	+		D
MAPK10	G/A G/G	rs3733367	hsa-miR-591	+	+	break	
MAPK10	G/A G/G	rs3733367	hsa-miR-591	+	+		D
MAPK10	G/A	rs3733367	hsa-miR-299-3p	-	+		C
MAPK10	G/A	rs3733367	hsa-miR-4491	-	+		C
MAPK10	G/A	rs3733367	hsa-miR-4657	-	+		C
MAPK10	G/A	rs3733367	hsa-miR-6503-3p	-	+		C
MAPK10	T/C	rs188386801	hsa-miR-4732-5p	+	-	create	
MAPK10	T/C	rs188386801	hsa-miR-1233	+	-	create	
MAPK10	C/C	rs188386801	hsa-miR-1233-3p	-	+		D
MAPK10	C/C	rs188386801	hsa-miR-3529-5p	-	+		D

Table 12. (Continued)

MAPK10	C/C	rs188386801	hsa-miR-379-5p	-	+		D
MAPK10	T/C C/C	rs188386801	hsa-miR-4451	+	+	create	
MAPK10	T/C C/C	rs188386801	hsa-miR-4451	+	+		D
MAPK10	C/C	rs188386801	hsa-miR-4650-3p	-	+		D
MAPK10	C/C	rs188386801	hsa-miR-4732-5p	-	+		D
MAPK10	G/A	rs958	hsa-miR-1233	+	-	break	
MAPK10	G/G	rs958	hsa-miR-1233-3p	-	+		D
MAPK10	G/A	rs958	hsa-miR-125a	+	-	break	
MAPK10	G/A	rs958	hsa-miR-125b	+	-	break	
MAPK10	G/G	rs958	hsa-miR-125a-5p	-	+		D
MAPK10	G/G	rs958	hsa-miR-125b-5p	-	+		D
MAPK10	G/A G/G	rs958	hsa-miR-4319	+	+	break	
MAPK10	G/A G/G	rs958	hsa-miR-4319	+	+		D
MAPK10	G/A G/G	rs958	hsa-miR-544b	+	+	break	
MAPK10	G/A G/G	rs958	hsa-miR-544b	+	+		D
MAPK10	G/G	rs958	hsa-miR-6779-3p	-	+		D
MAPK10	G/G	rs958	hsa-miR-7976	-	+		D
MAPK10	G/A	rs958	hsa-miR-1224-5p	-	+		C
MAPK10	G/A	rs958	hsa-miR-3915	-	+		C
MAPK10	G/A	rs958	hsa-miR-4689	-	+		C
MAPK10	G/A	rs958	hsa-miR-6858-5p	-	+		C
MAPK10	T/C	rs191358395	hsa-miR-4643	+	-	decrease	
MAPK10	C/C	rs191358395	hsa-miR-4742-3p	-	+		D
MAPK10	A/G	rs3527	hsa-miR-708-3p	+	-	enhance	
MAPK10	A/G	rs3527	hsa-miR-4670-3p	+	-	enhance	
MAPK10	A/G	rs3527	hsa-miR-4643	-	+		C
MAPK10	A/G	rs3527	hsa-miR-466	+	+	create	
MAPK10	A/G	rs3527	hsa-miR-466	+	+		C
MAPK10	A/G	rs3527	hsa-miR-4789-3p	-	+		C
MAPK10	A/A	rs183689080	hsa-miR-6884-3p	-	+		D
MAPK10	T/C	rs146719773	hsa-miR-1182	+	-	decrease	
MAPK10	T/C	rs146719773	hsa-miR-4697-3p	+	-	break	
MAPK10	T/C	rs146719773	hsa-miR-5006-5p	+	-	enhance	
MAPK10	A/T	rs2575674	hsa-miR-1237	+	-	break	
MAPK10	G/A	rs181956061	hsa-miR-1245b-3p	+	-	create	
MAPK10	G/A	rs181956061	hsa-miR-616-3p	+	-	enhance	
MAPK10	G/A	rs181956061	hsa-miR-5683	+	-	create	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-1271-3p	+	-	enhance	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-548a-3p	+	-	break	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-548ar-3p	+	-	break	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-548e	+	-	break	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-548f	+	-	break	

Table 12. (Continued)

MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-548g-3p	+	-	break	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-550a-3-5p	+	-	decrease	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-550a-5p	+	-	decrease	
MAPK10	T/A	rs192987418	hsa-miR-550b-2-5p	+	-	decrease	
MAPK10	T/C	rs143420758	hsa-miR-1289	+	-	break	
MAPK10	T/C	rs143420758	hsa-miR-1915-3p	+	-	create	
MAPK10	T/C	rs143420758	hsa-miR-4433-3p	+	-	break	
MAPK10	T/C	rs143420758	hsa-miR-4772-3p	+	-	decrease	
MAPK10	T/C	rs143420758	hsa-miR-615-5p	+	-	create	
MAPK10	T/C	rs143420758	hsa-miR-665	+	-	break	
MAPK10	T/C	rs113486237	hsa-miR-1304-3p	+	-	break	
MAPK10	T/C	rs113486237	hsa-miR-639	+	-	create	
MAPK10	T/C	rs113486237	hsa-miR-720	+	-	create	
MAPK10	G/A	rs189486762	hsa-miR-1915-3p	+	-	decrease	
MAPK10	G/A	rs189486762	hsa-miR-370	+	-	create	
MAPK10	G/A	rs189486762	hsa-miR-4649-3p	+	-	create	
MAPK10	G/A	rs189486762	hsa-miR-615-5p	+	-	decrease	
MAPK10	G/A	rs189486762	hsa-miR-93-3p	+	-	create	
MAPK10	-/CA	rs72168477	hsa-miR-20a-3p	+	-	enhance	
MAPK10	-/CA	rs72168477	hsa-miR-3650	+	-	create	
MAPK10	-/CA	rs72168477	hsa-miR-4288	+	-	enhance	
MAPK10	-/CA	rs72168477	hsa-miR-5010-3p	+	-	break	
MAPK10	-/CA	rs72168477	hsa-miR-632	+	-	enhance	
MAPK10	-/CA	rs72168477	hsa-miR-632	+	-	decrease	
MAPK10	T/G	rs150641306	hsa-miR-302b-3p	+	-	decrease	
MAPK10	T/G	rs150641306	hsa-miR-372	+	-	decrease	
MAPK10	T/G	rs150641306	hsa-miR-5696	+	-	create	
MAPK10	G/A	rs147506110	hsa-miR-3945	+	-	break	
MAPK10	G/A	rs147506110	hsa-miR-4461	+	-	decrease	
MAPK10	G/A	rs147506110	hsa-miR-4506	+	-	create	
MAPK10	G/A	rs147506110	hsa-miR-539-5p	+	-	enhance	
MAPK10	-/C	rs35473638	hsa-miR-4271	+	-	create	
MAPK10	-/C	rs35473638	hsa-miR-4725-3p	+	-	create	
MAPK10	-/AC	rs72228542	hsa-miR-4288	+	-	break	
MAPK10	-/AC	rs72228542	hsa-miR-4520a-5p	+	-	break	
MAPK10	-/AC	rs72228542	hsa-miR-4520b-5p	+	-	break	
MAPK10	-/AC	rs72228542	hsa-miR-632	+	-	break	
MAPK10	-/CA	rs112287084	hsa-miR-4288	+	-	decrease	
MAPK10	-/CA	rs112287084	hsa-miR-4288	+	-	enhance	
MAPK10	-/CA	rs112287084	hsa-miR-632	+	-	decrease	
MAPK10	-/CA	rs112287084	hsa-miR-632	+	-	enhance	
MAPK10	G/C	rs140220627	hsa-miR-4506	+	-	enhance	

Table 12. (Continued)

MAPK10	T/C	rs1201	hsa-miR-4709-3p	+	-	enhance	
MAPK10	C/G	rs2589515	hsa-miR-4758-3p	+	-	break	
MAPK10	C/G	rs2589515	hsa-miR-548a-3p	+	-	enhance	
MAPK10	C/G	rs2589515	hsa-miR-548ar-3p	+	-	enhance	
MAPK10	C/G	rs2589515	hsa-miR-548e	+	-	enhance	
MAPK10	C/G	rs2589515	hsa-miR-548g-3p	+	-	enhance	
MAPK10	-/CA	rs149235688	hsa-miR-632	+	-	enhance	
MAPK10	-/CA	rs149235688	hsa-miR-632	+	-	decrease	
MAPK10	-/CA	rs149235688	hsa-miR-4288	+	-	enhance	
MAPK10	-/CA	rs149235688	hsa-miR-4288	+	-	decrease	
<p>D: The derived allele disrupts a protected miRNA region C: The derived allele creates a new miRNA region Break: The derived allele breaks a new miRNA- mRNA binding site Create: The derived allele breaks a conserved miRNA- mRNA binding site and creates a new miRNA- mRNA binding site Decrease: The derived allele decreases a new miRNA- mRNA binding site Enhance: The derived allele enhances a new miRNA- mRNA binding site</p>							

IV. DISCUSSION

SNPs are important types of polymorphisms in the early diagnosis of many hereditary or multifactorial diseases or in determining susceptibility to diseases. Therefore, it is of great importance to predict harmful SNPs by computational methods such as *in silico* methods. In this study, the harmful SNPs and mirSNPs of the *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes, which were previously determined to be related to AD, were identified by *in silico* analysis.

A. Discussion of Gene-Gene and Protein-Protein Interactions

Researching protein-protein and gene-gene interactions has become the right approach to investigating the etiology and neuropathology of complex diseases such as AD [47, 48]. With these studies, the complexity of many diseases, including AD, has started to be solved [47, 48]. The treatment is one step closer by identifying the genes and proteins associated with the disease or the molecules critical to treating the disease. With these studies, the researchers identified the candidate genes and signal pathways involved in AD pathogenesis [47, 48].

In this study, the most closely related genes and proteins were identified using GeneMANIA (Figure 2), which provides gene-gene interactions, and STRING tool (Figure 3) which offers protein-protein interactions to determine the possible tasks of genes. In addition, the pathways in which these genes and proteins are found have been determined.

B. Discussion of the Results of Functional Analysis of SNPs

Based on the results obtained from studies, it has been found that programs with various algorithms are systematically used to uncover harmful/disease-related SNPs. Therefore, the use of evolutionary knowledge in the creation of such programs is of great importance [49]. SIFT and PolyPhen-2 programs have been shown to be good results and used to identify the most harmful SNPs [50, 51]. SIFT, PolyPhen-2, PROVEAN, SNPs&GO, Mutation Assessor, SNAP2, PHD-SNP, PANTHER, and META-SNP software tools were used to identify the possible effects of SNPs in this study. The results showed that 7 SNPs in the *BID* gene, 27 SNPs in the *MAPK10* gene, and 3 SNPs in the *AGER* gene are predicted as high-risk SNPs by *in silico* tools (Table 1 and Table 2). There is no experimental studies have been found in the literature on those SNPs that predicted as deleterious in this study. Only one study conducted about the *AGER* gene has shown that the G82S variant (rs2070600) is associated with AD [52]. In this study, it was found that this SNP was associated with harmful/ disease-related in 4 out of 10 results obtained from software tools, and neutral in 6 of them.

C. Discussing the Effects of SNPs on Protein Stabilization

I- Mutant and MUpro software tools were used to detect stability changes made by all identified harmful SNPs in protein structure. All SNPs analyzed in the *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes have been found to reduce

protein stabilization in both programs (Table 3). When protein stability is disrupted, the protein cannot be folded properly. Therefore, a protein must have a stable conformation to fold and perform its function correctly. Due to SNPs in protein structure, ligand binding of proteins, allosteric matches, general folding stability and post-translation modification of natural protein may be impaired [47, 52-54].

D. Discussing the Possible Effects of Amino Acid Substitutions

It is known that the position of amino acids influenced by the SNP is very important to understand the mechanisms of polymorphisms in diseases [55, 56]. The part where the amino acid change occurs can be a very important region for protein. In this case, it can cause the deterioration of hydrogen bonds caused by the change in that region, disruption of its conformation, differentiation of the interaction network, deterioration of the salt bridges created, and serious differences in the protein such as conformation changes and energy changes [56, 57]. Such changes can also cause alteration of protein stability, disruption of folding kinetics, and protein aggregations [57]. Project HOPE software was used to obtain features of wild and variant type residues and three-dimensional structure of the protein (Table 4-9).

The size characteristics of proteins are generally related with larger domains formed by many of their residences [58]. This size difference can cause different results according to the location of the variant amino acid. If the wild type amino acid is larger than the mutant type amino acid such as L19P, L151P, L105P, and F171V variants in the BID protein and Y268C, L95P, R188M, W390R, and R63C variants in the MAPK10 protein, it is thought to cause loss of interactions with other molecules (Table 4-5) [42]. In addition, this may cause an empty area in the core of the protein in positions W272R, M339I, C251Y, W247R, L190S and V53G in the MAPK10 protein (Table 5) [42]. In cases where the mutant type amino acid is larger than the wild type amino acid such as N181K, G8V, and G8D variants in the BID protein, G237E variant in the MAPK10 protein, C144W and C38W variants in the AGER protein, the variant type amino acid may cause bumps (Table 4-6) [42]. However, if wild-type amino acid is located in the core of the protein, the variant amino acid will not fit in that region such as A91V, D189Y, L153F, L190F, A231T, G250R, V244L, D141H, A353D, V145L, C250W, V244M, and N122Y variants in MAPK10 protein (Table 5) [42].

Hydrophobic interactions are not real bonds, they are also defined as a measure of how much the side chains of amino acid push water. Hydrophobicity is estimated to be the most important feature in the provision of protein's 3D structure [59]. In protein structure, hydrophobic amino acids are usually located in the inland regions, while hydrophilic regions are located on the outside, contributing to the stable structure of the protein [60]. Molecules with similar hydrophathy affinity pull each other, while molecules with different hydrophathies push each other so much. The difference in hydrophobicity caused by harmful SNPs between amino acid variants can affect protein structure and function, causing deterioration of protein stability [59-61]. In particular, the disease-causing SNPs have been shown to occur in hydrophobic areas [62]. Wild-type amino acids may be more hydrophobic than variant-type amino acids. In this case, different effects may occur depending on the location of the wild-type amino acid. For example, due to the amino acid substitution in R188M and W390R found in MAPK10 protein and C301S found in the AGER protein, there may be a loss of hydrophobic interactions (Table 5-6). It is also thought that hydrophobic interaction losses may occur due to the W272R, A231T, C251Y, A353D, L190S, N122Y, and V53G variations in the nucleus of the MAPK10 protein (Table 5) [42]. In the D189Y variation of MAPK10 protein, it is thought that as a result of the special functions of wild-type amino acid in the core of the protein, hydrogen bonds may be loss and folding problems may occur in the protein (Table 5) [42].

The charge of amino acids is determined depending on the pH value. Of the 64 existing codons, only 16 encode charged amino acids. Therefore, the effect of electrical charge on the positioning of amino acids is thought to be much less than hydrophobic forces [42]. The charge difference caused by harmful SNPs among amino acid variants can affect its structure and function by disrupting protein stability [59-61]. Variation creates a large charge difference between wild and variant-type amino acids in the N181K variation in the BID protein and the W390R variation in the MAPK10 protein (Table 4 and Table 5). The charge of wild-type amino acid was neutral, while mutant-type has a positive charge so estimated that this may cause the pushing of ligands or other residues with the same load as the mutant residues [42]. In some cases, as in the W272R, G250R, A353D, and W247R variations formed in the MAPK10 protein, it may cause protein folding problems depending on the location of the wild type amino acid (Table 5) [42]. Another case is that the wild-type amino acid in the G8D in the BID protein and G237E in the MAPK10 protein has neutral electrical properties, while the mutant-type amino acid has a negative electrical charge (Table 4 and Table 5). This can lead to the pushing of ligands or other residues with the same load [42]. R188M and R63C variations in the MAPK10 protein can cause loss of charge so cause interaction losses with other molecules (Table 5) [42].

In addition, the degradation of salt bridges or hydrogen bonds in the biochemical structure of amino acids can completely change both the structure and the function of the protein [60, 63]. In particular, disease-causing

SNPs have been shown to occur in hydrogen-bonding amino acids [62]. It is estimated that most polymorphisms in the *MAPK10* gene can disrupt such interactions (Table 10).

E. Discussion of SNP and miRNA Analyses

miRNAs play a role in many biological mechanisms such as disease and infection formation. In addition, they are also involved in many cellular events, such as cell proliferation and cell differentiation. miRSNPs can affect pri-miRNA/pre-miRNA formation and processing. miRSNPs effect the interaction between miRNA and mRNA. Also, they can affect the transcription of the target gene. As a result of many studies, more than 240 rare mutations and SNPs have been identified in pri-miRNA, pre-miRNA, and mature miRNA sequences [64-70]. Genomic and epigenetic as well as SNPs changes are thought to have influenced the reorganization of the pathways of miRNAs [71]. It has been shown by various studies that variations in miRNA sequences or their sequences in target regions cause miRNA to fail to function [72-75]. Previous studies showed that SNPs that disrupt miRNA synthesis are more than SNPs that increase miRNA synthesis [76]. Variations in miRNA binding regions have been determined to be associated with loss of miRNA function [77-82]. Additionally, miRNAs are defined in AD as important elements for regulating lost cognitive functions and memory processes [83].

The effects of SNPs on the miRNA-mRNA sites were obtained from MirSNP and PolyMiRTS software tools and the results were given in the Table 11-12. An in vitro miRNA study conducted in relation to the *BID* gene has shown that decreased mir-124-3p miRNA increases the expression of the *BID* gene. In AD, mir-124-3p miRNA has been shown to decrease and *BID* activity has increased [84]. In this study, it is estimated that rs181869684 polymorphism increases the functional effect of the miRNA- mRNA binding pair for mir-124-3p in the analysis carried out in the MirSNP software (Table 11). An in vitro and in vivo miRNA study associated with the *MAPK10* gene has shown that mir-27a-3p miRNA regulates the expression of the *MAPK10* gene [85]. In this study, it is estimated that rs17011312 polymorphism increases the functional effect of the miRNA- mRNA binding pair for mir-27a-3p, while rs113910535 polymorphism reduces the functional effect of the miRNA- mRNA binding pair (Table 12). Another miRNA study of in vitro and in vivo in relation to the *MAPK10* gene has shown that the reduction of miR-335-5p miRNA increases the expression of the *MAPK10* gene inverse proportion [86]. The programs used in this study did not show the SNP interaction associated with this miRNA.

V. CONCLUSION

The possible effects of 186, 204, and 392 missense SNPs within the *BID*, *MAPK10* and *AGER* genes were evaluated using different computational tools and a total of 7, 27, and 3 of them were suggested as high-risk SNPs, respectively, in this study. In addition, the effects of SNPs in these genes on miRNA-mRNA binding sites were investigated. Although predicting the pathogenic effects of SNPs using bioinformatic tools is advantageous in terms of reducing cost and time, experimental studies are required to understand the effects of SNPs on diseases. This *in silico* study could serve as a basis for targeting pathological SNPs in *BID*, *MAPK10*, and *AGER* genes for genotyping studies.

REFERENCES

- [1] Guerreiro, R., Hardy, J. (2014). Genetics of Alzheimer's Disease. *Neurotherapeutics*, 11, 732-737.
- [2] Liu, X., Han, Z., Yang, C. (2017). Associations of microRNA single nucleotide polymorphisms and disease risk and pathophysiology. *Clin. Genet.* 92(3), 235-242.
- [3] Brookes, A. J. (1999). The essence of SNPs. *Gene*, 234(2), 177-186.
- [4] Lonetti, A., Fontana, M. C., Martinelli, G., Iacobucci, I. (2016). Single Nucleotide Polymorphisms as Genomic Markers for High-Throughput Pharmacogenomic Studies. *Microarray Technology: Methods and Applications*, 143-159.
- [5] Single-nucleotide polymorphism - ISOGG Wiki. https://isogg.org/wiki/Single-nucleotide_polymorphism.
- [6] Battaloğlu, E., Başak, A. N. (2010). Kompleks Hastalık Genetiği Güncel Kavramlar ve Nörolojik Hastalıkların Tanısında Kullanılan Genomik Yöntemler. *Klinik Gelişim dergisi Cilt 23 / NO: 1- NÖROLOJİ* 128-133.
- [7] Kim, V. N. & Nam, J. W. (2006). Genomics of microRNA. *Trends Genet.* 22(3), 165-173.
- [8] Lee, Y., Kim, M., Han, J., Yeom, K.H., Lee, S., Baek, S.H., Kim, V.N., (2004). MicroRNA genes are transcribed by RNA polymerase II. *EMBO J.* 23(20), 4051-60.
- [9] Cogswell, J. P., Ward, J., Taylor, I.A., Waters, M., Shi, Y., Cannon, B., Kelnar, K., Kempainen, C., Brown, D., Chen, C., Prinjha, R.K., Richardson, R.C., Saunders, A.M., Roses, A.D., Richards C.A., (2008). Identification of miRNA Changes in Alzheimer's Disease Brain and CSF Yields Putative Biomarkers and Insights into Disease Pathways. *J. Alzheimer's Dis.* 14(1), 27-41.
- [10] Martino, S., Di Girolamo, I., Orlacchio, A., Datti, A., Orlacchio, A. (2009). MicroRNA Implications across Neurodevelopment and Neuropathology. *J. Biomed. Biotechnol.* 2009, 13.
- [11] GeneMANIA. <http://genemania.org/>.

- [12] NCBI dbSNP database. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/snp/>.
- [13] UniProt database. <https://www.uniprot.org/>.
- [14] Warde-Farley, D., Donaldson, S.L., Comes, O., Zuberi, K., Badrawi, R., Chao, P., Franz, M., Grouios, C., Kazi, F., Lopes, C.T., Maitland, A., Mostafavi, S., Montojo, J., Shao, Q., Wright, G., Bader, G.D., Morris, Q. (2010). The GeneMANIA prediction server: biological network integration for gene prioritization and predicting gene function. *Nucleic acids research*, 38(suppl_2), W214-W220.
- [15] STRING: functional protein association networks. <https://string-db.org/>.
- [16] Szklarczyk, D., Gable, A.L., Lyon, D., Junge, A., Wyder, S., Huerta-Cepas, J., Simonovic, M., Doncheva, N.T., Morris, J.H., Bork, P., Jensen, L.J., Mering, C.V. (2019). STRING v11: protein-protein association networks with increased coverage, supporting functional discovery in genome-wide experimental datasets. *Nucleic Acids Res.* 47(D1):D607–13.
- [17] SIFT - Predict effects of nonsynonymous missense variants. <https://sift.bii.a-star.edu.sg/>.
- [18] Ng PC., Henikoff S. Predicting Deleterious Amino Acid Substitutions (2001). *Genome Res.* 11(5):863-874.
- [19] Veitia, R. (2001). SIFTing the effects of SNPs. *Genome Biol.* 2(7), reports0019.
- [20] PolyPhen-2: prediction of functional effects of human nsSNPs. <http://genetics.bwh.harvard.edu/pph2/>.
- [21] Adzhubei, I. A. Adzhubei IA, Schmidt S, Peshkin L, Ramensky VE, Gerasimova A, Bork P., Kondrashov A.S., Sunyaev, S.E., (2010). A method and server for predicting damaging missense mutations. *Nat. Methods* 7(4), 248–249.
- [22] PROVEAN. <http://provean.jcvi.org/index.php>.
- [23] Choi, Y., Sims, G. E., Murphy, S., Miller, J. R., Chan, A. P. (2012). Predicting the functional effect of amino acid substitutions and indels. *PLoS One* 7.
- [24] Choi, Y., Chan, A. P. (2015). PROVEAN web server: a tool to predict the functional effect of amino acid substitutions and indels. *Bioinformatics* 31(16), 2745–2747.
- [25] SNAP2 - Predicting functional effects of sequence variants. <https://roslab.org/services/snap2web/>.
- [26] Hecht, M., Bromberg, Y., Rost, B. (2015). Better prediction of functional effects for sequence variants. *BMC genomics*, 16(8), 1-12.
- [27] SNPs&GO - Predicting disease associated SNPs using GO terms. <https://snps.biofold.org/snps-and-go/pages/method.html>.
- [28] Capriotti, E., Calabrese, R., Fariselli, P., Martelli, P.L., Altman, R.B., Casadio, R. (2013). WS-SNPs&GO: a web server for predicting the deleterious effect of human protein variants using functional annotation. *BMC Genomics*. *BMC genomics*, 14, 1-7.
- [29] PhD-SNP: Predictor of human Deleterious Single Nucleotide Polymorphisms. <https://snps.biofold.org/phd-snp/phd-snp.html>.
- [30] Capriotti, E., Calabrese, R., Casadio, R. (2006). Predicting the insurgence of human genetic diseases associated to single point protein mutations with support vector machines and evolutionary information. *Bioinformatics* 22, 2729–2734.
- [31] MutationAssessor.org / functional impact of protein mutations. <http://mutationassessor.org/r3/>.
- [32] Reva, B., Antipin, Y., Sander, C. (2011). Predicting the functional impact of protein mutations: Application to cancer genomics. *Nucleic Acids Res.* 39(17):e118.
- [33] PANTHER - Evolutionary analysis of coding SNPs. <http://www.pantherdb.org/tools/csnpScoreForm.jsp>.
- [34] Thomas, P. D., Ebert, D., Muruganujan, A., Mushayahama, T., Albou, L. P., Mi, H. (2022). PANTHER: Making genome-scale phylogenetics accessible to all. *Protein Science*, 31(1), 8–22.
- [35] Meta-SNP - Meta-predictor of disease causing variants. <https://snps.biofold.org/meta-snp/>.
- [36] Capriotti, E., Altman, R. B., Bromberg, Y. (2013). Collective judgment predicts disease-associated single nucleotide variants. *BMC Genomics* 14, S2.
- [37] Welcome to I-Mutant Suite Home Page: <http://gpcr2.biocomp.unibo.it/cgi/predictors/I-Mutant3.0/I-Mutant3.0.cgi>
- [38] Capriotti, E., Fariselli, P., Casadio, R. (2005). I-Mutant2.0: predicting stability changes upon mutation from the protein sequence or structure. *Nucleic Acids Res.* 33(Web Server issue).
- [39] Prediction of Protein Stability Changes upon Mutations: <http://mupro.proteomics.ics.uci.edu/>
- [40] Cheng, J., Randall, A., Baldi, P. (2006). Prediction of protein stability changes for single-site mutations using support vector machines. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 62(4), 1125-1132.
- [41] ProjectHOPE. <https://www3.cmbi.umcn.nl/hope/>.
- [42] Verselaar H., Beek, T.A., Kuipers, R.K., Hekkelman, M.L., Vriend, G., (2010). Protein structure analysis of mutations causing inheritable diseases. An e-Science approach with life scientist friendly interfaces. *BMC Bioinformatics*, 11, 548.
- [43] MirSNP: collection of human SNPs in predicted miRNA target sites. <http://cmbi.bjmu.edu.cn/mirsnp>.
- [44] Liu, C., Zhang F, Li T, Lu M, Wang L, Yue W, Zhang, D. (2012). MirSNP, a database of polymorphisms altering miRNA target sites, identifies miRNA-related SNPs in GWAS SNPs and eQTLs. *BMC Genomics*,

- 13, 661.
- [45] PolymiRTS: <https://compbio.uthsc.edu/miR SNP/>.
- [46] Bhattacharya, A., Ziebarth, J. D., Cui, Y. (2014). PolymiRTS Database 3.0: linking polymorphisms in microRNAs and their target sites with human diseases and biological pathways. *Nucleic Acids Res.* 42(D1), D86-D91.
- [47] Liu, Z-P., Wang, Y., Zhang, X-S., Chen, L., (2010). Identifying dysfunctional crosstalk of pathways in various regions of Alzheimer's disease brains - *BMC Syst Biol.*, 4 (Suppl 2), S11.
- [48] Krauthammer, M., Kaufmann, C. A., Gilliam, T. C. & Rzhetsky, A. (2004). Molecular triangulation: bridging linkage and molecular-network information for identifying candidate genes in Alzheimer's disease. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 101 (42), 15148–15153.
- [49] Mooney, S. D., Krishnan, V. G., Evani, U. S. (2010). Bioinformatic tools for identifying disease gene and SNP candidates. *Methods Mol. Biol.* 628, 307–319.
- [50] Thusberg, J., Vihinen, M. (2009). Pathogenic or not? and if so, then how? Studying the effects of missense mutations using bioinformatics methods. *Hum. Mutat.* 30(5), 703–714.
- [51] Hicks, S., Wheeler, D. A., Plon, S. E., Kimmel, M. (2011). Prediction of missense mutation functionality depends on both the algorithm and sequence alignment employed. *Hum. Mutat.* 32(6), 661–668.
- [52] Li, K., Dai D, Zhao B, Yao L, Yao S, Wang B, Yang, Z. (2009). Association between the RAGE G82S polymorphism and Alzheimer's disease. *J. Neural Transm.* 117(1), 97–104.
- [53] Wang, Z., Moulton, J. (2001). SNPs, protein structure, and disease. *Hum. Mutat.* 17(4), 263–270.
- [54] Xu, J., Zhang, J. (2014). Why Human Disease-Associated Residues Appear as the Wild-Type in Other Species: Genome-Scale Structural Evidence for the Compensation Hypothesis. *Mol. Biol. Evol.* 31(7), 1787–1792.
- [55] Cargill, M., Altshuler D., Ireland J., Sklar P., Ardlie K., Patil N., Shaw, N., Lane, C.R., Lim, E.P., Kalyanaraman, N., Nemesh, J., Ziaugra L., Friedland L., Rolfe A., Warrington, J., Lipshutz, R., Daley, G.Q., Lander, E.S. (1999). Characterization of single-nucleotide polymorphisms in coding regions of human genes. *Nat. Genet.* 22(3), 231–238.
- [56] Teng, S., Srivastava, A. K., Schwartz, C. E., Alexov, E. & Wang, L. (2010). Structural assessment of the effects of amino acid substitutions on protein stability and protein protein interaction. *Int. J. Comput. Biol. Drug Des.* 3(4), 334–349.
- [57] Dill, K. A., Fiebig, K. M. & Chan, H. S. (1993). Cooperativity in protein-folding kinetics. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 90(5), 1942–1946.
- [58] Biro, J. C. (2006). Amino acid size, charge, hydrophathy indices and matrices for protein structure analysis. *Theor. Biol. Med. Model.* 3(1), 1-12.
- [59] Doss, C. G. P., NagaSundaram, N. (2012). Investigating the structural impacts of I64T and P311S mutations in APE1-DNA complex: a molecular dynamics approach. *PLoS One* 7(2), e31677.
- [60] Rose, G. D., Wolfenden, R. (1993). Hydrogen bonding, hydrophobicity, packing, and protein folding. *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* 22(1), 381–415.
- [61] Gromiha, M. M., Oobatake, M., Kono, H., Uedaira, H., Sarai, A. (1999). Role of structural and sequence information in the prediction of protein stability changes: comparison between buried and partially buried mutations. *Protein Eng.* 12(7), 549–555.
- [62] Gong, S., Blundell, T. L. (2010). Structural and Functional Restraints on the Occurrence of Single Amino Acid Variations in Human Proteins. *PLoS One* 5(2), e9186.
- [63] Shirley, B. A., Nick Pace, C., Stanssens, P., Hahn, U. (1992). Contribution of hydrogen bonding to the conformational stability of ribonuclease T1. *Biochemistry* 31(3), 725–732.
- [64] Cai, T. T., Li J, An X, Yan N, Li D, Jiang Y, Wang, W., Shi, L., Qin, Q., Song, R., Wang, G., Jiang, W., Zhang J.A.. (2017). Polymorphisms in MIR499A and MIR125A gene are associated with autoimmune thyroid diseases. *Mol. Cell. Endocrinol.* 440, 106–115.
- [65] Ghanbari, M. Ikram, M.A., De Looper, H.W.J., Hofman, A., Erkeland, S.J., Franco, O.H., Dehghan, A. (2016). Genome-wide identification of microRNA-related variants associated with risk of Alzheimer's disease. *Sci. Rep.* 6(1), 28387.
- [66] Kim, J., Choi GH, Ko KH, Kim JO, Oh SH, Park YS, Kim, O.J., Kim, N.K. (2016). Association of the Single Nucleotide Polymorphisms in microRNAs 130b, 200b, and 495 with Ischemic Stroke Susceptibility and Post-Stroke Mortality. *PLoS One* 11(9):e0162519.
- [67] Morales, S., Gulppi F, Gonzalez-Hormazabal P, Fernandez-Ramires R, Bravo T, Reyes JM, Gomez, F., Waugh, E., Jara, L. (2016). Association of single nucleotide polymorphisms in Pre-miR-27a, Pre-miR-196a2, Pre-miR-423, miR-608 and Pre-miR-618 with breast cancer susceptibility in a South American population. *BMC Genet.* 17.
- [68] Moszyńska, A., Gebert, M., Collawn, J. F., Bartoszewski, R. (2017). SNPs in microRNA target sites and their potential role in human disease. *Open Biol.* 7(4):170019.

- [69] Mullany, L. E., Herrick, J. S., Wolff, R. K., Slattery, M. L. (2017). Single nucleotide polymorphisms within MicroRNAs, MicroRNA targets, and MicroRNA biogenesis genes and their impact on colorectal cancer survival. *Genes. Chromosomes Cancer* 56(4), 285–295.
- [70] Sethupathy, P., Collins, F. S. (2008). MicroRNA target site polymorphisms and human disease. *Trends Genet.* 24(10), 489–497.
- [71] Dzikiewicz-Krawczyk, A. (2015). MicroRNA polymorphisms as markers of risk, prognosis and treatment response in hematological malignancies. *Crit. Rev. Oncol. Hematol.* 93(1), 1–17.
- [72] Gottwein, E., Cai, X., Cullen, B. R. (2006). A novel assay for viral microRNA function identifies a single nucleotide polymorphism that affects Drosha processing. *J. Virol.* 80(11), 5321–5326.
- [73] Duan, R., Pak, C. H., Jin, P. (2007). Single nucleotide polymorphism associated with mature miR-125a alters the processing of pri-miRNA. *Hum. Mol. Genet.* 16(9), 1124–1131.
- [74] Kawahara, Y., Kawahara, Y., Zinshteyn, B., Sethupathy, P., Iizasa, H., Hatzigeorgiou, A.G., Nishikura, K.. (2007). Redirection of silencing targets by adenosine-to-inosine editing of miRNAs. *Science* 315(5815), 1137–1140.
- [75] Saunders, M. A., Liang, H., Li, W. H. (2007). Human polymorphism at microRNAs and microRNA target sites. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104(9), 3300–3305.
- [76] Sun, G., Yan J, Noltner K, Feng J, Li H, Sarkis DA, Sommer, S.S., Rossi, J.J.(2009). SNPs in human miRNA genes affect biogenesis and function. *RNA* 15(9), 1640–1651.
- [77] Abelson, J. F., Abelson, J.F., Kwan, K.Y., O’Roak, B.J., Baek, D.Y., Stillman, A.A., Morgan, T.M., Mathews C.A., Pauls D.L., Rasin M.R., Gunel, M., Davis N.R., Sencicek A.G.E, Guez D.H., Spertus J.A., Leckman J.F., Dure L.S., Kurlan R., Singer H.S., Gilbert D.L., Farhi A., Louvi A., Lifton R.P., Sestan N, State M.W. (2005). Sequence variants in SLITRK1 are associated with Tourette’s syndrome. *Science*, 310(5746), 317–320.
- [78] Arisawa, T., Tahara T, Shibata T, Nagasaka M, Nakamura M, Kamiya Y, Fujita H., Hasegawa, S., Takagi, T., Wang, F.Y. Hirata, I., Nakano, H.. (2007). A polymorphism of microRNA 27a genome region is associated with the development of gastric mucosal atrophy in Japanese male subjects. *Dig. Dis. Sci.* 52, 1691–1697.
- [79] Martin, M. M. Buckenberger, J.A., Jiang, J., Malana, G.E., Nuovo, G.J., Chotani, M., Feldman, D.S., Schmittgen, T.D., Elton, T.S.. (2007). The human angiotensin II type 1 receptor +1166 A/C polymorphism attenuates microRNA-155 binding. *J. Biol. Chem.* 282(33), 24262–24269.
- [80] Mishra PJ, Humeniuk R, Mishra PJ, Longo-Sorbello GSA, Banerjee D, Bertino JR. (2007). A miR-24 microRNA binding-site polymorphism in dihydrofolate reductase gene leads to methotrexate resistance. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104(33), 13513–13518.
- [81] Sethupathy, P., Borel C, Gagnebin, M., Grant, G.R., Deutsch, S., Elton, T.S., Hatzigeorgiou, A.G., Stylianos E Antonarakis, S.E.. (2007). Human microRNA-155 on chromosome 21 differentially interacts with its polymorphic target in the AGTR1 3’ untranslated region: a mechanism for functional single-nucleotide polymorphisms related to phenotypes. *Am. J. Hum. Genet.* 81(2), 405–413.
- [82] Yu, Z., Li Z., Jolicoeur, N., Zhang, L., Fortin Y., Wang, E., Wu, M., Shen, S.H. (2007). Aberrant allele frequencies of the SNPs located in microRNA target sites are potentially associated with human cancers. *Nucleic Acids Res.* 35(13), 4535–4541.
- [83] Ramakrishna, S., Muddashetty, R. S. (2019). Emerging Role of microRNAs in Dementia. *J. Mol. Biol.* 431(9), 1743–1762.
- [84] Zhang, N., Zhao, L., Su, Y., Liu, X., Zhang, F., Gao, Y. (2021). Syringin Prevents A β 25–35 -Induced Neurotoxicity in SK-N-SH and SK-N-BE Cells by Modulating miR-124-3p/BID Pathway. *Neurochem. Res.* 46(3):675–685.
- [85] Li, L., Luo, Z. (2017). Dysregulated miR-27a-3p promotes nasopharyngeal carcinoma cell proliferation and migration by targeting Mapk10. *Oncol. Rep.* 37(5), 2679–2687.
- [86] Wang, D., Fei, Z., Luo, S., Wang, H. (2020). MiR-335-5p Inhibits β -Amyloid (A β) Accumulation to Attenuate Cognitive Deficits Through Targeting c-jun-N-terminal Kinase 3 in Alzheimer’s Disease. *Curr. Neurovasc. Res.* 17(1), 93–101.



Araştırma Makalesi -Research Article

Some Matrix Applications on the Special Integer Number Sequences

Özel Tam Sayı Dizilerinin Bazı Matris Uygulamaları

Ümmügülsün Akbaba^{1*}

Geliş / Received: 15/12/2022

Revize / Revised: 23/02/2023

Kabul / Accepted: 06/03/2023

ABSTRACT

In this paper, the matrices related to Fibonacci, Lucas, Pell, and Pell-Lucas numbers have been examined. By using these matrices new identities related to these integer sequences have been investigated.

Keywords- Matrix Method, Fibonacci Numbers, Pell Numbers, Lucas Numbers, Pell-Lucas Numbers

ÖZ

Bu çalışmada, Fibonacci, Lucas, Pell ve Pell-Lucas sayı dizileri ile ilgili matrisler incelendi. Bu matrisleri kullanarak bu tam sayı dizileri ile ilgili yeni özdeşlikler araştırıldı.

Anahtar Kelimeler- Matris Metodu, Fibonacci Sayıları, Pell Sayıları, Lucas Sayıları, Pell-Lucas Sayıları

^{1*}Corresponding Author Contact: ummugulsum.akbaba@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-5870-6802>)

Department of Mathematics, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey

I. INTRODUCTION

The investigation of Fibonacci, Lucas, Pell, and Pell-Lucas numbers is one of the most important research areas in the number theory. Especially, the matrix applications of these numbers are used in many areas such as the coding theory, security systems, electric network theory. The authors have investigated applications of Fibonacci, Lucas, Pell and Pell-Lucas sequences by using matrices in [1-4]. The authors examine the relation between the suborbital graphs and Fibonacci numbers [5,6]. Then, the author finds new matrices and identities related to Fibonacci and Lucas numbers [7]. The relation between Pell and Pell-Lucas numbers and the suborbital graphs has been investigated in [8]. As a result, the authors produce new matrices related to these integer sequences.

In this paper, these matrices have been characterized. Firstly, the characteristic roots of these matrices have been found in terms of values of $\varphi, \beta, \gamma, \delta$. Then, by using λ -function method and the matrices, the new identities related to these integer sequences have been found. Let $A = (a_{ij})_{n \times n}$ and $A^* = (a_{ij} + k)_{n \times n}$, where $k \in \mathbb{Z}$. λ -function for matrix A is written as $\lambda(A) = |A^*| - |A|$. For example, for matrix $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$, $\lambda(A) = a + d - b - c$ and for matrix $B = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$, $\lambda(B) = \begin{vmatrix} a + e - b - d & b + f - c - e \\ d + h - g - e & e + i - h - f \end{vmatrix}$ are taken [9].

Let's introduce to the special integer sequences which we use in the paper.

For initial conditions $F_0 = 0$ and $F_1 = 1$ by recurrence relation $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$, $n \geq 2$, $\{F_n\}$ is called a Fibonacci sequence. Here, n^{th} Fibonacci number is F_n . Similarly, the n^{th} Lucas number is L_n for recurrence relation $L_n = L_{n-1} + L_{n-2}$, $n \geq 2$, where initial conditions are $L_0 = 2$ and $L_1 = 1$. For details, see [10]. From both integer sequences, there are a lot of identities which have been discovered. Let us give some of them.

$$F_{n-1}F_{n+1} - F_n^2 = (-1)^n, n \geq 1 \text{ (Cassini Formula)}, \quad (1)$$

$$F_{2n} = F_n L_n, n \geq 1, \quad (2)$$

$$L_n = F_{n-1} + F_{n+1} = F_{n+2} - F_{n-2}, n \geq 2, \quad (3)$$

$$L_n^2 = 5F_n^2 + 4(-1)^n, n \geq 1, \quad (4)$$

$$F_{n-1}F_nF_{n+1} = F_n^3 + (-1)^{n-1}F_n, n \geq 1, \quad (5)$$

$$F_m F_n - F_{m+k} F_{n-k} = (-1)^{n-k} F_{m+k-n} F_k, n \geq 1. \quad (6)$$

Let $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ and $\beta = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$. The characteristic equation for the recurrence relation of Fibonacci numbers is $x^2 - x - 1 = 0$. So, its solutions are φ and β , which are characteristic roots of this equation. Also, from the Binet formulas, $F_n = \frac{\varphi^n - \beta^n}{\sqrt{5}}$ and $L_n = \varphi^n + \beta^n$, where φ is known as golden ratio.

P_n is the n^{th} Pell number which satisfies the recurrence relation $P_n = 2P_{n-1} + P_{n-2}$, $n \geq 2$ by initial conditions $P_0 = 0$ and $P_1 = 1$. Similarly, Q_n is the n^{th} Pell-Lucas number by $Q_n = 2Q_{n-1} + Q_{n-2}$, $n \geq 2$ and initial conditions $Q_0 = 1$, $Q_1 = 1$. Binet-like formulas for P_n and Q_n are $P_n = \frac{\gamma^n - \delta^n}{\gamma - \delta}$ and $Q_n = \frac{\gamma^n + \delta^n}{2}$, $n \geq 2$, where $\gamma = 1 + \sqrt{2}$ and $\delta = 1 - \sqrt{2}$. For Pell and Pell-Lucas numbers, the following identities hold [11]:

$$P_n + P_{n-1} = Q_n, \quad (7)$$

$$Q_n + Q_{n-1} = 2P_n, \quad (8)$$

$$P_{n+1} + P_{n-1} = 2Q_n, \quad (9)$$

$$P_{2n} = 2P_n Q_n, \quad (10)$$

$$Q_{n+1} + Q_{n-1} = 4P_n, \quad (10)$$

where $n \geq 1, n \in \mathbb{N}$.

II. MATRICES WITH INTEGER SEQUENCES

In this section, we introduce the matrices which are examined in the paper:

Theorem 2.1. [6] If F_n is the n^{th} Fibonacci number, then

$$S_n = \begin{pmatrix} (-1)^{n-1}F_{2n-2} & (-1)^nF_{2n} \\ (-1)^{n+1}F_{2n} & (-1)^nF_{2n+2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -3 \end{pmatrix}^n, \quad (12)$$

where $n \geq 1$.

Lemma 2.2 [8] If L_n is the n^{th} Lucas number and $tr[S_n]$ is trace of matrix S_n , then

$$L_{2n} = (-1)^n tr[S_n], n \in \mathbb{N},$$

where $n \geq 1$.

By using matrix S_n , we have the following lemma:

Theorem 2.3 [8] If L_n is the n^{th} Lucas number, then

$$T_n = \begin{pmatrix} -3 & 2 \\ -2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -3 \end{pmatrix}^n = \begin{pmatrix} (-1)^{n-1}L_{2n-2} & (-1)^nL_{2n} \\ (-1)^{n+1}L_{2n} & (-1)^nL_{2n+2} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\det(T_n) = L_{2n}^2 - L_{2n-2}L_{2n+2} = -5, \quad (14)$$

where $n \geq 1$.

Theorem 2.4 [5] Let F_n be the n^{th} Fibonacci number, then we have the following equation as

$$P^n = \begin{pmatrix} (-1)^nF_{n-1} & 0 & (-1)^{n+1}F_n \\ 3[(-1)^{n+1}F_{n-2} - 1] & 1 & 3[(-1)^nF_{n-1} - 1] \\ (-1)^{n+1}F_n & 0 & (-1)^nF_{n+1} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

where $P = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -3 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$ and $n > 1, n \in \mathbb{N}$.

Theorem 2.5 [8] Let F_n and L_n be the n^{th} Fibonacci number and the n^{th} Lucas number, respectively. So, we have the following matrix equation as

$$X_n = \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ 3 & -7 \end{pmatrix}^n = \begin{cases} 5^{\frac{n-1}{2}} \begin{pmatrix} L_{2n-2} & -L_{2n} \\ L_{2n} & -L_{2n+2} \end{pmatrix}, & \text{if } n \text{ is odd,} \\ 5^{\frac{n}{2}} \begin{pmatrix} -F_{2n-2} & F_{2n} \\ -F_{2n} & F_{2n+2} \end{pmatrix}, & \text{if } n \text{ is even,} \end{cases} \quad (16)$$

where $n \in \mathbb{N}$ and $n \geq 1$.

Theorem 2.6 [8] If P_n is the n^{th} Pell number, then

$$V_n = \begin{pmatrix} \frac{(-1)^{n-1}}{2}P_{2n-2} & \frac{(-1)^n}{2}P_{2n} \\ \frac{(-1)^{n+1}}{2}P_{2n} & \frac{(-1)^n}{2}P_{2n+2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -6 \end{pmatrix}^n \quad (17)$$

Theorem 2.7 [8] If Q_n is the n^{th} Pell-Lucas number, then we get

$$W_n = \begin{pmatrix} -6 & 2 \\ -2 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -6 \end{pmatrix}^n = \begin{pmatrix} 2(-1)^{n-1}Q_{2n-2} & 2(-1)^nQ_{2n} \\ 2(-1)^{n+1}Q_{2n} & 2(-1)^nQ_{2n+2} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

where $n \geq 2, n \in \mathbb{N}$.

Now, the characteristic roots of S_n, T_n, P^n and X_n matrices are examined.. To find the characteristic roots, we use same motivation in [4]. Since $|Q^n - \lambda I| = \lambda^2 - L_n \lambda + (-1)^n = 0$, then the characteristic roots $\frac{L_n + \sqrt{5}F_n}{2} = \varphi^n$ and $\frac{L_n - \sqrt{5}F_n}{2} = \beta^n$ are obtained by using identity $F_{n-1}F_nF_{n+1} = F_n^3 + (-1)^{n-1}F_n$, where $Q^n = \begin{pmatrix} F_{n+1} & F_n \\ F_n & F_{n-1} \end{pmatrix}$.

Theorem 2.8 [10] The characteristic roots of Q^n are φ^n and β^n .

Firstly, to determine the characteristic roots of S_n , let us find the characteristic equation. So,

$$\begin{aligned} |S_n - \lambda I| &= \begin{vmatrix} (-1)^{n-1}F_{2n-2} - \lambda & (-1)^n F_{2n} \\ (-1)^{n+1}F_{2n} & (-1)^n F_{2n+2} - \lambda \end{vmatrix} \\ &= ((-1)^{n-1}F_{2n-2} - \lambda)((-1)^n F_{2n+2} - \lambda) - (-1)^n F_{2n}(-1)^{n+1}F_{2n} \\ &= -F_{2n-2}F_{2n+2} - \lambda[(-1)^{n-1}F_{2n-2} + (-1)^n F_{2n+2}] + \lambda^2 + F_{2n}^2 \\ &= \lambda^2 - (-1)^n L_{2n} \lambda + 1. \end{aligned}$$

Hence, the characteristic equation is $\lambda^2 - (-1)^n L_{2n} \lambda + 1 = 0$. Then, characteristic roots as $\lambda_{1,2} = \frac{(-1)^n L_{2n} \pm \sqrt{L_{2n}^2 - 4}}{2} = \frac{(-1)^n L_{2n} \pm \sqrt{5}F_{2n}}{2}$ are found by using identity $L_n^2 = 5F_n^2 + 4(-1)^n$. Thus, the following corollary is written:

Corollary 2.9 The characteristic roots of S_n are,

$$\begin{cases} \varphi^{2n} \text{ and } \beta^{2n}, & \text{if } n \text{ is even;} \\ -\beta^{2n} \text{ and } -\varphi^{2n}, & \text{if } n \text{ is odd.} \end{cases} \quad (19)$$

Secondly, the characteristic roots for the matrix T_n with even terms of Lucas numbers are examined. The characteristic equation of T_n is,

$$\begin{aligned} |T_n - \lambda I| &= \begin{vmatrix} (-1)^{n-1}L_{2n-2} - \lambda & (-1)^n L_{2n} \\ (-1)^{n+1}L_{2n} & (-1)^n F_{2n+2} - \lambda \end{vmatrix} \\ &= ((-1)^{n-1}L_{2n-2} - \lambda)((-1)^n F_{2n+2} - \lambda) - (-1)^{2n+1}L_{2n}^2 \\ &= -5 - \lambda(-1)^n(L_{2n+2} - L_{2n-2}) - \lambda^2 \\ &= \lambda^2 - (-1)^n 5F_{2n} \lambda - 5 = \lambda^2 - (-1)^n 5F_{2n} \lambda - 5 = 0. \end{aligned}$$

By using identity $F_{n-1}F_nF_{n+1} = F_n^3 + (-1)^{n-1}F_n$, the characteristic roots are given as

$$\lambda_{1,2} = \frac{(-1)^n 5F_{2n} \pm \sqrt{5}L_{2n}}{2}.$$

Therefore, the following corollary is written:

Corollary 2.10 The characteristic roots of T_n are,

$$\begin{cases} \sqrt{5}\varphi^{2n} \text{ and } -\sqrt{5}\beta^{2n}, & \text{if } n \text{ is even;} \\ \sqrt{5}\beta^{2n} \text{ and } -\sqrt{5}\varphi^{2n}, & \text{if } n \text{ is odd.} \end{cases} \quad (20)$$

Finally, to find the characteristic roots of P^n matrix, let us give the characteristic equation:

$$\begin{aligned} |Z^n - \lambda I| &= \begin{vmatrix} (-1)^n F_{n-1} - \lambda & 0 & (-1)^{n+1}F_n \\ k[(-1)^{n+1}F_{n-2} - 1] & 1 - \lambda & k[(-1)^n F_{n-1} - 1] \\ (-1)^{n+1}F_n & 0 & (-1)^n F_{n+1} - \lambda \end{vmatrix} \\ &= (F_{n-1}F_{n+1} - F_n^2 - \lambda(-1)^n[F_{n-1} + F_{n+1}] + \lambda^2)(1 - \lambda) \\ &= (\lambda^2 - \lambda(-1)^n L_n + (-1)^n)(1 - \lambda). \end{aligned}$$

Then, the characteristic equation is $\lambda^2 - \lambda(-1)^n L_n + (-1)^n = 0$. By using identity $L_n^2 = 5F_n^2 + 4(-1)^n$, the characteristic roots are given as

$$\lambda_1 = 1 \quad \text{and} \quad \lambda_{2,3} = \frac{(-1)^n L_n \pm \sqrt{5} F_n}{2}.$$

Consequently, the following corollary is given:

Corollary 2.11 The characteristic roots of Z^n are,

$$\begin{cases} 1, \varphi^n \text{ and } \beta^n, & \text{if } n \text{ is even;} \\ 1, \beta^n \text{ and } -\varphi^n, & \text{if } n \text{ is odd.} \end{cases} \quad (21)$$

By the same motivation, if the characteristic roots of X_n, V_n and W_n are examined, the following corollary is written:

Corollary 2.12 The characteristic roots of X_n, V_n and W_n are,

$$\begin{cases} 5^{\frac{n}{2}} \varphi^{2n} \text{ and } 5^{\frac{n}{2}} \beta^{2n}, & \text{if } n \text{ is even;} \\ 5^{\frac{n}{2}} \beta^{2n} \text{ and } -5^{\frac{n}{2}} \varphi^{2n}, & \text{if } n \text{ is odd,} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \gamma^{2n} \text{ and } \delta^{2n}, & \text{if } n \text{ is even;} \\ -\delta^{2n} \text{ and } -\gamma^{2n}, & \text{if } n \text{ is odd,} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} 4\sqrt{2}\gamma^{2n} \text{ and } -4\sqrt{2}\delta^{2n}, & \text{if } n \text{ is even;} \\ 4\sqrt{2}\delta^{2n} \text{ and } -4\sqrt{2}\gamma^{2n}, & \text{if } n \text{ is odd,} \end{cases} \quad (24)$$

respectively.

III. FINDING IDENTITIES WITH FIBONACCI AND LUCAS NUMBERS

In this section, some new identities of Fibonacci, Lucas, Pell, and Pell-Lucas numbers are found.

Theorem 3.1. For all $n \geq 1$, let F_n be the n^{th} Fibonacci number. Then,

$$F_{2n-1}[F_{2n+2} + F_{2n}] = 1 + F_{4n}. \quad (25)$$

Proof. To prove the equation, we will use λ -function of a matrix [9]. According to paper, when we write λ -function for S_n matrix; we get $\lambda(S_n) = (-1)^{n-1}F_{2n-2} + (-1)^n F_{2n+2} - (-1)^n F_{2n} - (-1)^{n-1} F_{2n} = (-1)^n L_{2n}$ by using recurrence relation of Fibonacci numbers and identity $L_n = F_{n-1} + F_{n+1} = F_{n+2} - F_{n-2}$ and $|S_n^*| = |S_n| + k\lambda(S_n)$, where $k = (-1)^n F_{2n}$ and $S_n^* = S_n + k$;

$$S_n^* = \begin{pmatrix} (-1)^{n-1}F_{2n-2} + (-1)^n F_{2n} & (-1)^n F_{2n} + (-1)^n F_{2n} \\ (-1)^{n+1}F_{2n} + (-1)^n F_{2n} & (-1)^n F_{2n+2} + (-1)^n F_{2n} \end{pmatrix}.$$

The determinant of matrix S_n is $|S_n| = F_{2n}^2 - F_{2n-2}F_{2n+2} = 1$ and the determinant of matrix S_n^* is

$$|S_n^*| = |(-1)^n| \begin{vmatrix} -F_{2n-2} + F_{2n} & 2F_{2n} \\ 0 & F_{2n+2} + F_{2n} \end{vmatrix} = F_{2n-1}[F_{2n+2} + F_{2n}].$$

If we write them in the equation $|S_n^*| = |S_n| + k\lambda(S_n)$ and use the identity $F_{2n} = F_n L_n$, we get $F_{2n-1}[F_{2n+2} + F_{2n}] = 1 + (-1)^n F_{2n} (-1)^n L_{2n} = 1 + F_{4n}$.

Theorem 3.2 For all $n \geq 1, n \in \mathbb{N}$, let F_n and L_n be n^{th} Fibonacci number and n^{th} Lucas number, respectively, then

$$L_{2n-1}[L_{2n+2} + L_{2n}] = 5[-1 + F_{4n}]. \quad (26)$$

Proof. For the proof, we will use the same motivation as proof of Theorem 3.1. When we take matrix T_n , then we get $|T_n^*| = |T_n| + k\lambda(T_n)$ and $\lambda(T_n) = (-1)^{n-1}L_{2n-2} + (-1)^n L_{2n+2} - (-1)^n L_{2n} - (-1)^{n-1} L_{2n}$. After simplification, that is $\lambda(T_n) = 5(-1)^n F_{2n}$. From equation (2.1), we get $|T_n| = -5$. Therefore, $|T_n^*| = 1 + k(-1)^n L_{2n}$. Now, if $k = (-1)^n L_{2n}$, then for $T_n^* = T_n + k$,

$$T_n^* = \begin{pmatrix} (-1)^{n-1}L_{2n-2} + (-1)^n L_{2n} & (-1)^n L_{2n} + (-1)^n L_{2n} \\ (-1)^{n+1}L_{2n} + (-1)^n L_{2n} & (-1)^n L_{2n+2} + (-1)^n L_{2n} \end{pmatrix}$$

and

$$|T_n^*| = |(-1)^n| \begin{vmatrix} -L_{2n-2} + L_{2n} & 2L_{2n} \\ 0 & L_{2n+2} + L_{2n} \end{vmatrix}$$

are obtained. If we write them in the equation $|T_n^*| = |T_n| + k\lambda(T_n)$, $L_{2n-1}[L_{2n+2} + L_{2n}] = -5 + (-1)^n L_{2n} 5(-1)^n F_{2n}$ is obtained. By using identity $F_{2n} = F_n L_n$, that is $L_{2n-1}[L_{2n+2} + L_{2n}] = 5[-1 + F_{4n}]$.

Theorem 3.3 For all $n \geq 1$, let F_n be the n^{th} Fibonacci number. Then,

$$F_{2n} + 2F_n^2 = F_n F_{n+3} \tag{27}$$

holds.

Proof. Here, we will use λ - function for 3×3 types of matrices. If we take P^n matrix, we have $|P^{n*}| = |P^n| + k\lambda(P^n)$ and

$$\lambda(P^n) = \begin{vmatrix} 3(-1)^n F_{n-2} + (-1)^n F_{n-1} + 4 & 3(-1)^n F_{n-1} + (-1)^n F_n - 4 \\ 3(-1)^{n+1} F_{n-2} - (-1)^{n+1} F_n - 4 & -3(-1)^n F_{n-1} + (-1)^n F_{n+1} + 4 \end{vmatrix}$$

When we use identity $F_{n+h} F_{n+k} - F_n F_{n+h+k} = (-1)^n F_h F_k$, then $\lambda(P^n) = (-1)^n [4F_{n+3} - 1]$

is obtained and from Cassini formula $|P^n| = (-1)^n$ is written. Therefore, $|P^{n*}| = (-1)^n + k(-1)^n [4F_{n+3} - 1]$.

Now, if $k = (-1)^n F_n$, then from $P^{n*} = P^n + k$,

$$P^{n*} = \begin{pmatrix} (-1)^n F_{n-1} + (-1)^n F_n & (-1)^n F_n & 0 \\ 3(-1)^{n+1} F_{n-2} + (-1)^n F_n - 3 & 1 + (-1)^n F_n & 3(-1)^n F_{n-1} + (-1)^n F_n - 3 \\ 0 & (-1)^n F_n & (-1)^n F_{n+1} + (-1)^n F_n \end{pmatrix}$$

By using identities $L_n = F_{n-1} + F_{n+1} = F_{n+2} - F_{n-2}$, $P_n + P_{n-1} = Q_n$, $Q_n + Q_{n-1} = 2P_n$ and Cassini formula; that is $|P^{n*}| = 4F_{2n} + 8F_n^2 + (-1)^n - 5F_n$. So, $4F_{2n} + 8F_n^2 + (-1)^n - 5F_n = (-1)^n + (-1)^n F_n (-1)^n [4F_{n+3} - 5]$. After simplification, that is $F_{2n} + 2F_n^2 = F_n F_{n+3}$.

IV. SUM OF MATRICES RELATED TO INTEGER SEQUENCES

By using sum of the matrices S_n and X^n , new identities can be obtained;

Theorem 4.1 The following equalities are provided for $n, m \in \mathbb{Z}^+$,

$$\begin{aligned} i. & & F_{2m+2n} &= F_{2n} F_{2m+2} - F_{2n-2} F_{2m}, \\ ii. & & F_{2n-2m} &= F_{2n} F_{2m+2} - F_{2n+2} F_{2m}. \end{aligned}$$

Proof. By using matrix S_n , matrix S^{n+m} is written as

$$S^{n+m} = \begin{pmatrix} (-1)^{n+m-1} F_{2n+2m-2} & (-1)^{n+m} F_{2n+2m} \\ (-1)^{n+m+1} F_{2n+2m} & (-1)^{n+m} F_{2n+2m+2} \end{pmatrix} \tag{28}$$

Now, let us take multiplication of the matrices S^n and S^m ,

$$S^n S^m = (-1)^{m+n} \begin{pmatrix} F_{2n-2} F_{2m-2} - F_{2n} F_{2m} & F_{2n} F_{2m+2} - F_{2n-2} F_{2m} \\ F_{2n} F_{2m+2} - F_{2n+2} F_{2m} & F_{2n+2} F_{2m+2} - F_{2n} F_{2m} \end{pmatrix} \tag{29}$$

By comparing equation (4.1) with equation (4.2), a new identity $F_{2m+2n} = F_{2n} F_{2m+2} - F_{2n-2} F_{2m}$ is obtained.

Now, let us take the inverse of the matrix S^{-m} ,

$$S^{-m} = \begin{pmatrix} (-1)^m F_{2m+2} & (-1)^{m+1} F_{2m} \\ (-1)^{m+2} F_{2m+2} & (-1)^{m-1} F_{2m-2} \end{pmatrix}$$

When we compute the equality $S^{n-m} = S^n S^{-m}$, by using the same motivation as above, the following identity is obtained; $F_{2n-2m} = F_{2n} F_{2m+2} - F_{2n+2} F_{2m}$.

Theorem 4.2 The following equalities are provided for $n, m \in \mathbb{Z}^+$;

$$i. \quad 5F_{2m+2n} = L_{2m} L_{2n+2} - L_{2m-2} L_{2n},$$

- ii. $L_{2m+2n} = L_{2m+2}F_{2n} - L_{2m}F_{2n-2}$,
- iii. $L_{2m-2n} = L_{2m-2}F_{2n} - L_{2m}F_{2n-2}$,
- iv. $5F_{2m-2n} = L_{2m}L_{2n-2} - L_{2m-2}L_{2n}$.

Proof. For the proof we use the matrix X_n . Here, we represent that matrix as X . Firstly, let's write the matrix X^{m+n} :

$$X^{m+n} = \begin{cases} 5^{\frac{m+n-1}{2}} \begin{pmatrix} L_{2m+2n-2} & -L_{2m+2n} \\ L_{2m+2n} & -L_{2m+2n+2} \end{pmatrix}, & \text{if } m+n \text{ is odd,} \\ 5^{\frac{m+n}{2}} \begin{pmatrix} -F_{2m+2n-2} & F_{2m+2n} \\ -F_{2m+2n} & F_{2m+2n+2} \end{pmatrix}, & \text{if } m+n \text{ is even.} \end{cases} \quad (30)$$

When we take odd n and m values, we get the following matrix for $X^n X^m$,

$$5^{\frac{m+n}{2}} 5^{-1} \begin{pmatrix} L_{2m-2}L_{2n-2} - L_{2m}L_{2n} & -L_{2m-2}L_{2n} + L_{2m}L_{2n+2} \\ L_{2m}L_{2n-2} - L_{2m+2}L_{2n} & -L_{2m-2}L_{2n} + L_{2m+2}L_{2n+2} \end{pmatrix}. \quad (31)$$

By comparing the matrices in (4.3) and (4.4), the following equation is given:

$$5F_{2m+2n} = L_{2m}L_{2n+2} - L_{2m-2}L_{2n}.$$

For even m and odd n values or odd m and even n values, we write for $X^n X^m$,

$$5^{\frac{m+n-1}{2}} \begin{pmatrix} -L_{2m-2}F_{2n-2} + L_{2m}F_{2n} & L_{2m-2}F_{2n} - L_{2m}F_{2n+2} \\ -L_{2m}F_{2n-2} + L_{2m+2}F_{2n} & L_{2m}F_{2n} - L_{2m+2}F_{2n+2} \end{pmatrix} \quad (32)$$

When we compare the matrices in (4.3) and (4.5), the following equation is obtained; $L_{2m+2n} = L_{2m+2}F_{2n} - L_{2m}F_{2n-2}$. Now, let us take inverse of the matrix X^n ,

$$X^{-n} = \begin{cases} 5^{\frac{-n-1}{2}} \begin{pmatrix} L_{2n+2} & -L_{2n} \\ L_{2n} & -L_{2n-2} \end{pmatrix}, & \text{if } n \text{ is odd,} \\ 5^{-\frac{n}{2}} \begin{pmatrix} -F_{2n+2} & F_{2n} \\ -F_{2n} & F_{2n-2} \end{pmatrix}, & \text{if } n \text{ is even.} \end{cases}$$

So,

$$X^{m-n} = \begin{cases} 5^{\frac{m-n-1}{2}} \begin{pmatrix} L_{2m-2n-2} & -L_{2m-2n} \\ L_{2m+2n} & -L_{2m+2n+2} \end{pmatrix}, & \text{if } m-n \text{ is odd,} \\ 5^{\frac{m-n}{2}} \begin{pmatrix} -F_{2m-2n-2} & F_{2m-2n} \\ -F_{2m-2n} & F_{2m-2n+2} \end{pmatrix}, & \text{if } m-n \text{ is even.} \end{cases}$$

is written. When we examine for odd m and even n , we obtain $L_{2m-2n} = L_{2m-2}F_{2n} - L_{2m}F_{2n-2}$,

for odd m, n values, we get $5F_{2m-2n} = L_{2m}L_{2n-2} - L_{2m-2}L_{2n}$.

REFERENCES

- [1] Sylvester, J.R. (1979). Fibonacci properties by matrix methods. *The Mathematical Gazette*, 63(425), 188-191.
- [2] Ercolano, J. (1979). Matrix generator of Pell sequence. *Fibonacci Quarterly*, 17(1), 71-77.
- [3] Hoggatt, V.E. (1969). *Fibonacci and Lucas Numbers*. Palo Alto: CA: Houghton- Mifflin.
- [4] Köken, F., & Bozkurt D. (2010). On Lucas numbers by the matrix method. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 39, 471-475.
- [5] Akbaba, Ü., Değer, A.H., & Tuylu, T. (2018). On some connections between suborbital graphs and special sequences. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 10,134-143.
- [6] Değer, A.H. (2017). Vertices of paths of minimal lengths on suborbital graphs. *Filomat*, 31,913-923.
- [7] Değer, A.H. (2017). Relationships with the Fibonacci numbers and the special vertices of the suborbital graphs. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7, 168-180.
- [8] Akbaba, Ü. & Değer A.H. (2022). Relation between matrices and the suborbital graphs by the special number sequences. *Turkish Journal of Mathematics*, 46 (3), 753-767.

- [9] Bicknell, M., & Hoggatt, V.E. (1963). Fibonacci Matrices and Lambda Functions. *Fibonacci Quarterly*, 1(2) 47-52.
- [10] Koshy, T. (2001). *Fibonacci and Lucas numbers with applications*, A Wiley- Interscience Publication, Canada.
- [11] Koshy, T. (2014). *Pell and Pell-Lucas Numbers with Applications*. New York: Springer.



Derleme Makalesi – Review Article

Tel Ark Katmanlı İmalat (TAKİ) Yöntemi ve Farklı Malzemelerde Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Method and Investigation of Mechanical Properties for Different Materials

Ersin Çakır¹, Mustafa Ulutan^{2*}

Geliş / Received: 24/03/2022

Revize / Revised: 29/09/2022

Kabul / Accepted: 10/10/2022

ÖZ

Katmanlı (eklemeli) imalat yöntemi geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiş ve araştırılmaya devam etmektedir. Bu yöntem, üç boyutlu bilgisayar destekli yazılımlardan doğrudan parça üretimi temeline dayanmaktadır. Üç boyutlu (3D) yazıcı olarak da adlandırılan katmanlı imalat, kullanılan metal malzeme türüne göre toz ve tel olarak ikiye ayrılmaktadır. Toz esaslı sistemde metal altlık üzerine biriktirilen tozların; elektron, lazer veya ark ısı kaynağı ile ergitilmesi veya sinterlenmesi ile parça üretilmektedir. Tel esaslı sistemde ise, MIG/MAG, TIG veya plazma kaynak sistemleri kullanılarak tel malzemenin ergitilmesi ve üst üste biriktirilmesi yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yöntemi açıklanarak kullanılan ısı kaynağına göre sınıflandırılması yapılmıştır. Yöntem, üretim zamanında sağladığı azalmalar, net şekle yakın üretim sağlaması ve tel hammaddenin toza göre ucuz olması gibi avantajları ile endüstri için önemli araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada, sanayide ticari olarak kullanılan paslanmaz çelik, alüminyum, nikel süper alaşımları, magnezyum ve Ti6Al4V alaşımları için yapılan araştırmalar incelenmiştir. Mekanik özellikleri döküm-dövme gibi geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan üretimler ile elde edilen mekanik özelliklerde çelik alaşımları için soğuma şartlarının önemli olduğu ancak geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilen değerlerin karşılanabileceği not edilmiştir. Alüminyum alaşımlarında üretimde veya sonrasında yapılan işlemlerin(hadde, dövme vb.) mekanik özelliklerin gelişmesini olumlu etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımları için yapılan üretimlerde istenilen mekanik özelliklerin yeterli seviyede sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Tel ark katmanlı imalat (TAKİ), Paslanmaz çelik, Alüminyum, Magnezyum, Ti6Al4V

ABSTRACT

The additive manufacturing method has been developed and continues to be investigated as an alternative to conventional manufacturing methods. This method is based on part production from 3D computer aided software. Additive manufacturing, also called a three-dimensional (3D) printing technology, is divided into two sections as powder and wire according to the type of used material. Powder-based system, the powder accumulated on the metal substrate; parts are produced by melting or sintering them with electron, laser, or arc heat source. In wire-based system, the method of melting and depositing the wire material using MIG / MAG, TIG or plasma welding systems is used. In this study, Wire arc additive manufacturing (WAAM) method is explained and classified

¹ İletişim: dr.ersincakir@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2902-624X>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Batı Meşelik Kampüsü Odunpazarı/Eskişehir

^{2*} Sorumlu yazar iletişimi: mulutan@ogu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-1821-6486>)

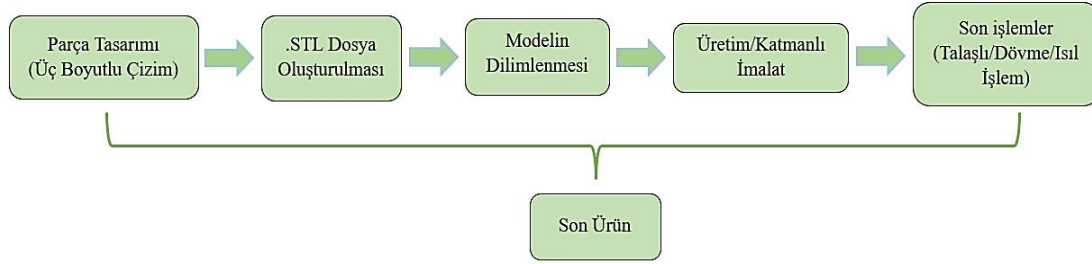
Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Batı Meşelik Kampüsü Odunpazarı/Eskişehir

according to the type of heat source. This method has become an important research topic for the industry with its advantages, such as reductions in production time, production close to net shape and cheapness of wire raw material compared to powder. In this study, research about stainless steel, aluminium, nickel super alloys, magnesium, and Ti6Al4V alloys which are used commercially in industry were reviewed. Mechanical properties were compared with traditional manufacturing methods such as casting and forging. It has been noted that the cooling conditions for steel alloys are important for mechanical properties obtained in the productions. It has been determined for aluminium alloys that the processes performed during or after production (rolling, forging, etc.) positively affect mechanical properties. In addition, it has been seen that the desired mechanical properties can be achieved for Ti6Al4V alloys.

Keywords- Wire arc additive manufacturing (WAAM), Stainless steel, Aluminum, Magnesium, Ti6Al4V

1. GİRİŞ

Katmanlı/eklemeli imalat, eksiltmeli veya biçimlendirici olan geleneksel imalat süreçlerinin aksine malzemelerin, katmanlı olarak üst üste biriktirilmesiyle oluşturulduğu imalat yöntemidir [1]. Bu yöntem, imal edilmesi planlanan parçanın üç boyutlu (3D) katı modelinin oluşturulması, yazılım programları kullanılarak birden fazla katmanlara dilimlenmesi, elde edilen verilerin üç boyutlu yazıcı sistemine aktarılması ve istenilen modelin bu sistemde malzeme besleme ünitesi ve ısı kaynağı vasıtasıyla katmanlı olarak imal edilmesi işlemidir[2]. Yöntemin uygulanmasında kullanılan akış prensibi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Katmanlı imalat yönteminin şematik akışı

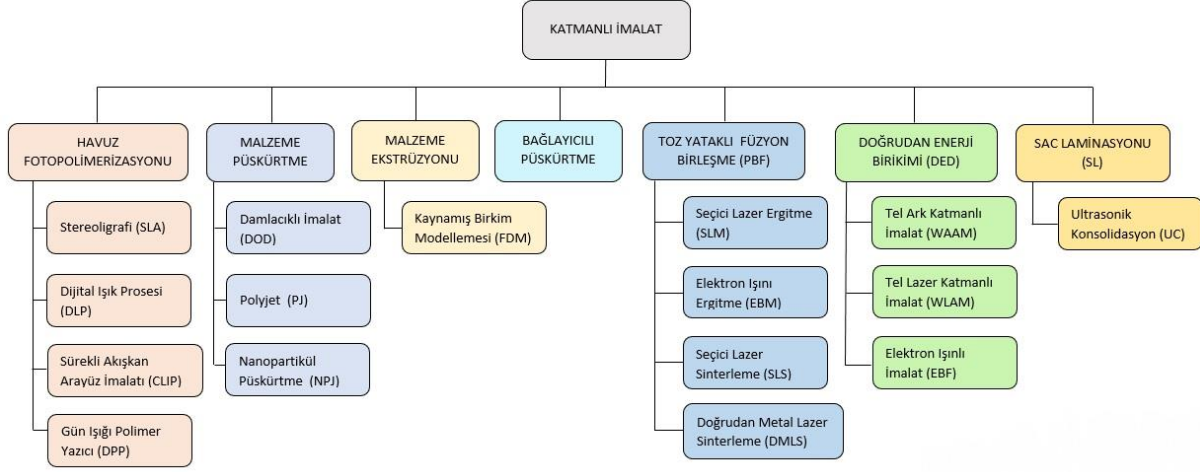
Katmanlı imalat, üç boyutlu olarak hazırlanan bilgisayar destekli tasarımlardan doğrudan fiziksel modeller elde etmeyi sağlayan imalat teknolojisidir. Bu sistemler temel olarak, hareket ünitesi, malzeme besleme sistemi ve ısı kaynağından oluşmaktadır [3]. Katmanlı imalat teknolojileri, karmaşık parçaların net şekle yakın üretimi, üretim süresindeki kısaltmalar, malzeme atığının minimum olması ve düşük maliyetler ile parça üretimi sağlamaktadır. Belirtilen bu üstünlükleriyle son yıllarda üzerinde yoğun çalışılan konu haline gelmiştir [4]. 1980'lerin başlarında polimer malzeme modellerine yönelik ilk çalışmalar gerçekleştirilirken [5], günümüzde titanyum [6], alüminyum [7], nikel [8] ve düşük karbonlu çelikler [9] dahil olmak üzere birçok mühendislik malzemesi için çalışmalar yapılmaktadır. Katmanlı imalat yöntemlerinde elde edilmesi planlanan ürün ile malzeme kullanım oranı (buy to fly ratio) birbirine çok yakındır [10]. Bundan dolayı malzeme atığı sifıra yakındır ve titanyum alaşımları gibi değerli malzemelerde önemli oranda maliyet kazançları sağlanabilmektedir.

Bu üretim yöntemlerinde birikimler katmanlı olarak gerçekleştiğinden karmaşık termal çevrimler olmaktadır. Bu çevrimler dolayısıyla oluşan kalıntı gerilmeler önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca kalıntı gerilmelerin etkisiyle malzemelerde distorsiyon oluşabilmektedir [11]. Isı yığılmaları ve termal davranışlar üretilen malzemenin mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir[12]. Günümüze kadar katmanlı imalat yöntemleri ile ilgili yirmiden fazla farklı yöntem geliştirilmiş olup [13], ASTM standardına göre katmanlı imalat yöntemleri yedi (7) kategoride sınıflandırılmıştır [1]. Şekil 2’de katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Toz yataklı füzyon birleşmede, serili halde duran toz üzerine enerji uygulanması ile malzeme üretimi gerçekleştirilirken, doğrudan enerji birikim metodunda; odaklanmış enerji kaynağına doğrudan toz veya tel besleme işlemi yapılmaktadır. Tel besleme yönteminin kullanıldığı doğrudan enerji birikim metodları uygulanan ısı kaynağı türlerine göre; Tel ark katmanlı imalat, Tel lazer katmanlı imalat ve Elektron ışınli serbest üretim şeklinde sınıflandırılmaktadır [14].

Ülkemizde katmanlı imalat yöntemlerinin genel olarak açıklandığı ve kullanım alanlarının incelendiği çalışmaların [15,16] yanında, havacılık uygulamaları [17], yapı üretimi [18] ve gemi inşaatı [19] gibi sektörel düzeyde kullanım alanlarının araştırıldığı derleme çalışmaları bulunmaktadır. Ayrıca yöntemin geliştirilmesi ile

alakalı olarak üretimde ısıl değişimleri ve modellemesi [20], alüminyum alaşımları için parametre etkileri [21] ve Ti6Al4V alaşımlarında mekanik özelliklerin incelendiği [22] derleme çalışmaları da yapılmıştır. Bu araştırmalar yoğun olarak tozun ilave malzeme olarak kullanıldığı katmanlı imalat yöntemleri üzerine gerçekleştirilmiş olup Tel ark katmanlı imalat yönteminin araştırıldığı çalışmalar [23,24] sınırlı kalmıştır.

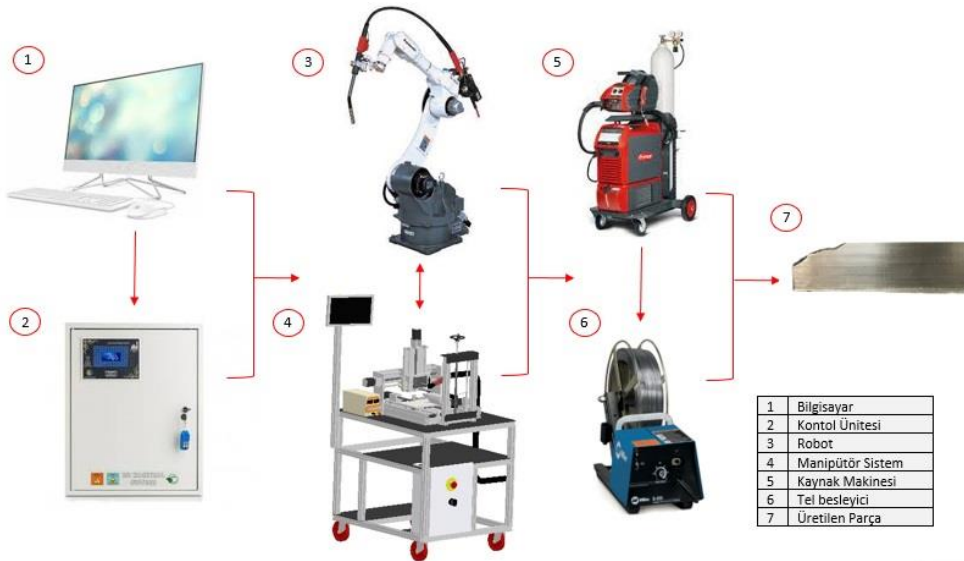


Şekil 2. Katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması

Bu derleme çalışmasında öncelikle katmanlı (eklemeli) imalat yöntemi açıklanarak yaygın olarak kullanılan katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Daha sonra ise tel besleme yönteminin kullanıldığı Tel ark katmanlı imalat yöntemi tanıtılmış ve bu yöntem ile çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımlarından üretilen malzemelerin mekanik özellikleri geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırılarak detaylı olarak incelenmiştir.

II. TEL ARK KATMANLI İMALAT (TAKİ) YÖNTEMİ

Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yöntemi elektrik arkının enerji kaynağı olarak kullanıldığı ve tel besleme sisteminin ilave malzeme olarak kullanıldığı doğrudan enerji ile birikim yöntemidir. Bu yöntemde toz yataklı füzyon birleşme yöntemlerinin aksine yüksek oranda malzeme birikimi yapıldığından büyük parçaların imalatı mümkün olabilmektedir [25]. Yöntemin çalışma sistemine bir örnek Şekil 3'te gösterilmiştir.

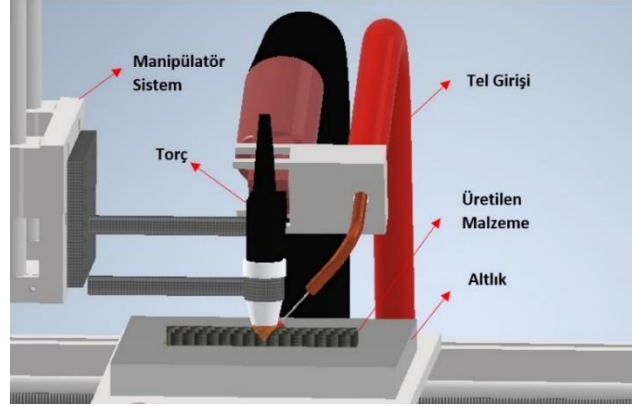


Şekil 3. Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) sistemine bir örnek

TAKİ sisteminde; imal edilecek parçaların üç boyutlu modellerinin oluşturulması ve bu modellerin dilimlenerek uygun dosya türüne (.stl) dönüştürülmesinde bir bilgisayar ara yüzü ① kullanılmaktadır. Kontrol paneli ② üretimde kullanılacak parametrelerin yüklenmesi ve işlenmesinde, robot ③ veya manipülör sistem

④ ise hareket ünitesi olarak kullanılmaktadır. Kaynak makinesi torcu ⑤ ile tel besleyicinin ⑥ hareket ünitesine monte edilmesi ve uygun parametrelerin işlenmesi ile parça ⑦ imal edilebilmektedir.

Bu imalat yöntemi 1926 yılında Baker'in elektrik arkının ısı kaynağı olarak kullanılması ile katı cisimler üretmeyi başararak patentlenmiş olup [26], son yıllarda artan maliyetler ve üretimde zaman kayıplarının önüne geçilmesi bakımından dikkat çekici bir hal almıştır [27]. Bu yöntem ile malzeme birikim örneği Şekil 4'te gösterilmiştir. Günümüze kadar TAKİ yöntemiyle havacılık sanayi [28], denizcilik endüstrisi [29] ve mimari yapılar [30] gibi alanlarda üretimler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) malzeme birikimi şematik gösterimi

Toz yataklı füzyon birleşme prosesleri ile karşılaştırıldığında TAKİ yöntemi önemli avantajlar ve dezavantajlar gösterebilmektedir. Kullanılan enerji kaynaklarına göre yaygın kullanıma sahip katmanlı imalat yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Katmanlı imalat yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Enerji Kaynağı	Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar	Kaynaklar
Tel Ark Katmanlı İmalat (WAAM)	Plazma TIG MIG/MAG	Birikim oranı:50-130 gr/dk Kurulum maliyeti:7000\$ Geniş ergime havuzu: ~5-10 mm Orta/Büyük ölçekte malzeme üretimi	Yüksek birikim oranı Düşük ekipman maliyeti	Yüksek ısı girişi Kalıntı gerilme ve distorsiyon	[31]
Seçici Lazer Ergitme (SLM)	Lazer Işını	Birikim oranı:2-10 gr/dk Kurulum maliyeti:500 bin \$ Küçük ölçekte malzeme üretimi Daha dar ergime havuzu	Net şekle daha yakın üretim Karmaşık parçaların üretimi	Düşük birikim oranı Yüksek ekipman maliyeti	[32] [33]
Elektron Işını Ergitme (EBM)	Elektron Işını	Birikim oranı: 2-10 gr/dk Kurulum maliyeti:1 milyon \$ Küçük ölçekte malzeme üretimi Daha dar ergime havuzu	Net şekle daha yakın üretim Karmaşık parçaların üretimi	Düşük birikim oranı Yüksek ekipman maliyeti	[34]

Birikim oranları SLM ve EBM gibi toz yataklı füzyon proseslerinde yaklaşık 2-10 g/dk iken bu yöntemde 50-130 g/dk 'ya ulaşabilmektedir [31]. Tel Ark Katmanlı İmalat (TAKİ) sistemi için kurulum maliyeti yaklaşık 7000\$ iken, lazer katmanlı imalat metodunda 500 000\$, elektron ışını katmanlı imalat yöntemi için ise 1 milyon \$ civarında rakamlara ulaşabilmektedir [32]. Bu avantajlarının yanında karmaşık parçaların üretim zorlukları ve net şeklin istenilen doğrulukta olmaması dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır [33]. Birikimler katmanlı olduğundan karmaşık termal çevrimler ortaya çıkmaktadır. Bu çevrimler dolayısıyla oluşan ısı yığılmaları ve

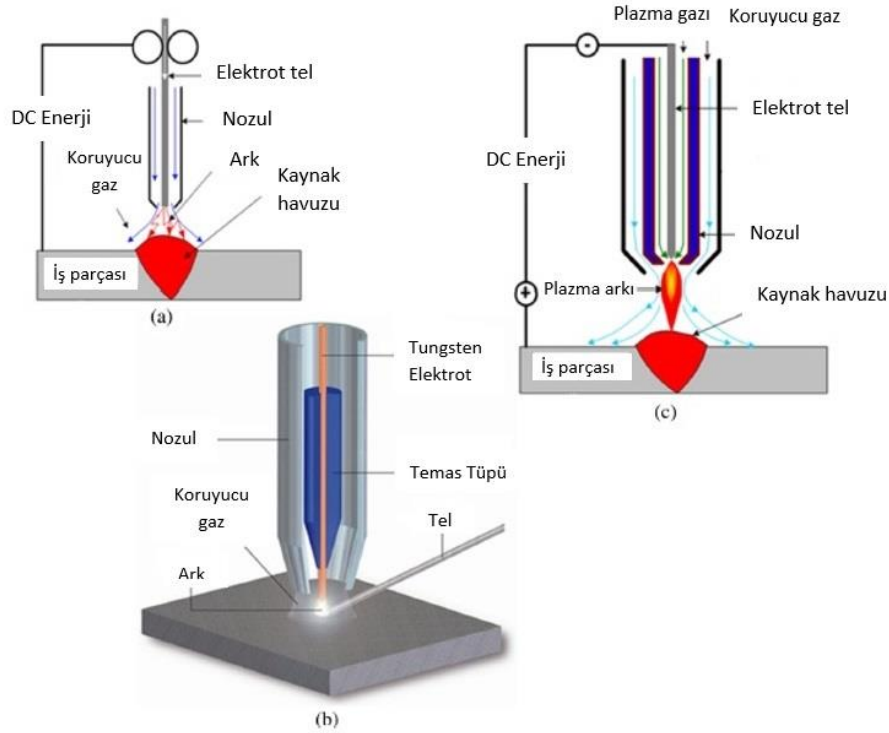
termal davranışların uniform olmayan birikimlere yol açtığı ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirtilmiştir [35, 36].

TAKİ yönteminde ark ve plazma gazının oluşturduğu ergiyik havuzu boyutları ve soğuma oranları farklıdır. Ergiyen havuz genişliğinin mikroyapıda homojenliği azalttığı ve katman bantlarının belirginliğini arttırdığı belirtilmiştir. Daha düşük olan soğuma hızı ile martenzit oluşumu düşük olduğundan bu durumun mekanik özelliklere olumlu etkideği raporlanmıştır [34, 37].

III. TEL ARK KATMANLI İMALAT (TAKİ) YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

TAKİ teknolojilerinde; gaz altı kaynak makineleri (MIG/MAG), gaz tungsten ark kaynak makineleri (TIG) ve plazma ark kaynak makineleri (PAW) olmak üzere üç farklı türde kaynak makinesi kullanılmaktadır [38]. Bu kaynak makinelerinin sistematik çalışma prensipleri Şekil 5’te gösterilmiştir.

Gaz altı kaynak makineleri tükenen bir tel ve iş parçası arasında elektrik arkının oluşması prensibiyle çalışırken, gaz tungsten ark ve plazma ark kaynak makinelerinde tükenmeyen elektrot ve iş parçası arasında elektrik arkı üretilir. Dolayısıyla bu sistemlerde tel dışarıdan bir cihaz yardımıyla ark bölgesine beslenmektedir [39]. Katmanlı imalat yönteminde kullanılan gaz altı kaynak makinelerinde beslenen tel ve oluşan ark eş eksenli iken, diğer yöntemlerde tel dışarıdan beslenmekte ve telin girişi için sisteme yeni bir parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu durum dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5. (a)Gaz altı kaynak makinesi (MIG/MAG), (b) Gaz tungsten ark kaynak makinesi (TIG) torcu, (c) Plazma ark kaynak makinesi (PAW) çalışma prensipleri [38]

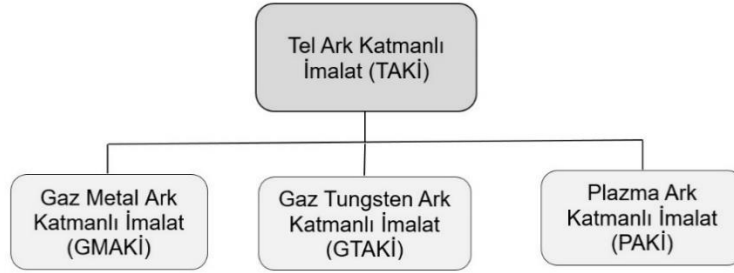
Kullanılan kaynak makinesi türlerine göre katmanlı imalat yöntemleri; Gaz metal ark katmanlı imalat (GMAKİ), Gaz tungsten ark katmanlı imalat (GTAKİ), Plazma ark katmanlı imalat (PAKİ) şeklinde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma Şekil 6’da gösterilmiştir.

Plazma ark katmanlı imalat yönteminde kullanılan ark 0,1-15 A aralığında olduğunda işlem mikroplazma olarak isimlendirilir. Bu yöntem kullanılarak yapılan üretimlerde birikim oranı 1gr/dk’ ya kadar düşmesine rağmen yüzey kalitesinin diğer ark katmanlı imalat yöntemlerine göre daha iyi olduğu görülmektedir [40]. Ayrıca mikroplazma yönteminde ısıdan etkilenen bölge daha küçük olduğundan distorsiyon oluşumlarının daha az olduğu tespit edilmiştir [41].

Yeni bir yöntem olarak geliştirilmekte olan darbeli (pulsed) plazma ark katmanlı imalat yöntemi, çalkantılı bir ergiyik havuzu oluşturduğundan daha ince mikroyapının elde edilmesini sağlamaktadır [42].

Soğuk metal transfer (SMT) yöntemi; gaz altı kaynak teknolojilerinden geliştirilmiş, tel besleme mekanizması hareket kontrollerinin sağlanması esasına dayanan, düşük ısı girdileri ile daha az sıçramaların görüldüğü kaynak sistemleridir[43]. Bu yöntem katmanlı imalat araştırmalarında son dönemlerde yaygın olarak çalışılmaktadır [44, 45].

GMAKİ yönteminde, malzeme birikim oranı GTAKİ ve PAKİ yöntemlerine göre 2-3 kat daha fazladır. Ancak GMAKİ yönteminde görülen üretim esnasındaki sıçramalar, distorsiyon ve gözenek oluşumları daha fazladır[32]. Büyük oranda titanyum alaşımlarından oluşan havacılık malzemelerinde ısı girişi yüksek olan PAKİ yönteminin kullanılmasının diğer metodlarının kullanımına göre daha verimli olabileceği belirtilmiştir[46].



Şekil 6. Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yönteminin kullanılan kaynak türlerine göre sınıflandırılması

IV. FARKLI MALZEMELERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

TAKİ yöntemiyle bir çok farklı malzeme için çalışma yapılmıştır. Savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanlarına sahip alüminyum ve titanyum alaşımları için yoğun çalışmalar gerçekleştirilirken; otomotiv sanayi, denizcilik endüstrisi ve konstrüksiyon malzemeleri gibi alanlarda genel kullanıma sahip farklı türdeki çelikler için de çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmamızın bu bölümünde; TAKİ yöntemiyle üretilen çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırılarak incelenecektir.

A. Çelik

Çelik alaşımları; otomotiv, gemicilik, konstrüksiyon ve gaz endüstrisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır[47]. Katmanlı imalat yöntemlerinde, geleneksel üretim yöntemleriyle üretimleri yüksek maliyetli olan titanyum ve nikel alaşımları gibi değerli malzemeler yaygın olarak çalışılmasına rağmen; SS304 [48], SS308L [49] ve SS316L [50] gibi paslanmaz çelikler, ER70S-6 [51] düşükkarbonlu çelik alaşımı, 2Cr13 [52] ve maraging [53] gibi özel alaşımlı çelikler için de araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Le vd., çalışmalarında SS308L paslanmaz çeliği kullanarak TAKİ yöntemiyle ürettikleri numunelerde soğuma şartlarının etkilerini araştırmışlardır. Kuru hava soğuma şartlarında üretilen numunelerin akma ve çekme değerleri, serbest ortamda soğutulan numunelere göre daha yüksek elde edilirken, uzama(%) değerlerinin ise daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Üretimde katmanlar arası kuru hava ile soğutmanın mekanik özellikleri ve yüzey özelliklerini geliştirebileceğini belirtmişlerdir [54].

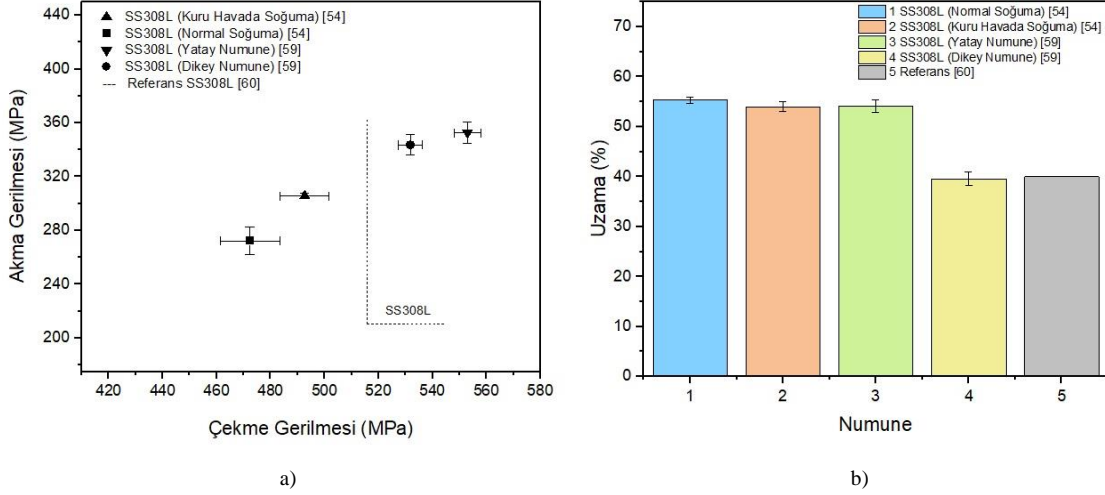
Wang vd., SMT katmanlı imalat yöntemiyle S316L teli kullanarak 100x100x100 boyutlarında blok üretmişler ve üç eksen için mekanik özellikleri karşılaştırmışlardır. Enine birikim yönünde çekme gerilmelerinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca birikim esnasında yeniden ergiyen bölge ve geçiş bölgelerinde mekanik olarak tutarsızlıklar olduğunu, çekme deneylerinde boyun vermelerin ve kırılmaların katman geçiş bölgelerinde olduğunu tespit etmişlerdir [55].

Xu vd., maraging çeliği ile üretim yapmışlar ve elde ettikleri mekanik değerlerde yatay-dikey numuneler için anizotropik özellikler olduğunu tespit etmişlerdir. Dövme maraging çeliği için uygulanan (çözeltiyeye alma+yaşlandırma) ısıl işlemi TAKİ yöntemi ile üretilen numuneye uygulamışlar ve gerilme değerlerinde %24,7 artış olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu işlem ile mikroyapıdaki heterojen yapının homojen hale geldiğini raporlamışlardır [56].

Haden vd., çalışmalarında ürettikleri düşük karbonlu çelik(ER70S) ve paslanmaz çelik (SS304) alaşımlarının, akma/çekme gerilmelerini, aşınma değerleri ve üretimde oluşabilecek gözenek durumlarını incelemişlerdir. SS304 için, aşınma dirençleri ve çekme gerilmelerinde kademeli değerler elde etmişlerdir. ER70S için, numunede yatay ve dikey yönde akma gerilme değerlerinde farklılıklar görülmemesine rağmen, çekme gerilmesi değerleri için anizotropik özellikler olduğunu tespit etmişlerdir [57].

Wang vd. H13 teli kullanarak yaptıkları üretimde, sertlik değerlerinin 300-360 HV aralığında yaklaşık tüm malzemede homojen olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak mekanik değerlerde anizotropik değerler ile karşılaşmışlardır. 830 °C-4 saat süre ile yapılan tavlama işleminde mekanik özelliklerin izotropik düzene girdiğini belirtmişlerdir[58].

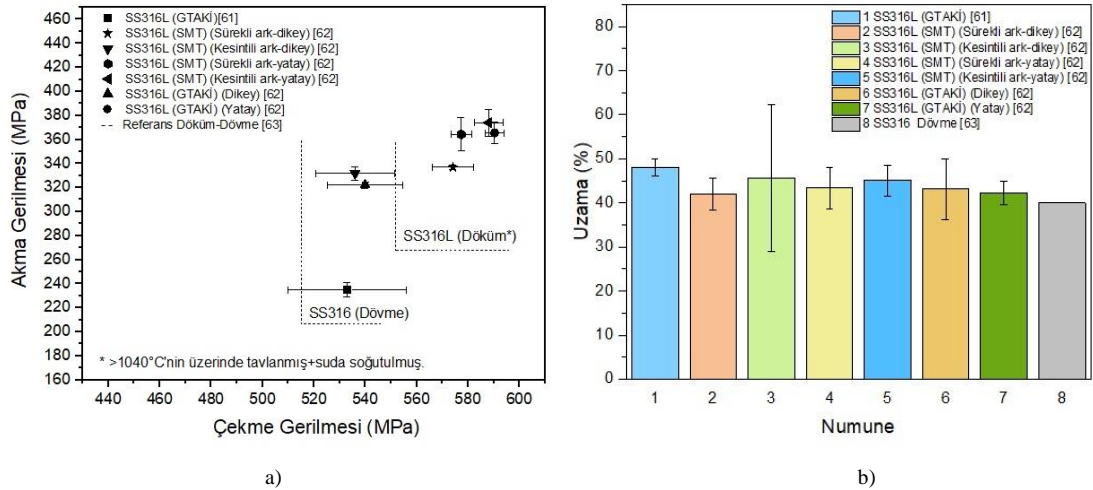
SS308L [54,59] numuneleri ile referans olarak alınan tavllanmış SS308L [60] paslanmaz çeliği kıyaslamaları gerçekleştirilmiş, çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için bu grafikler Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş SS308L için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [54,59,60]

Üretimlerde SS308L için akma gerilmelerinin referans değerlerden yüksek olduğu ancak çekme gerilmelerinin üretim şartları ve parametrelere göre önemli farklılıklar gösterebileceği tespit edilmiştir. Uzama (%) değerleri için referans değerlere yakın olarak üretim yapıldığı ancak anizotropi sebebiyle yatay ve dikey numunelerde farklı değerlerin elde edildiği görülmektedir.

TAKİ yöntemlerinden SMT ve GTAKİ yöntemiyle üretilen SS316L paslanmaz çeliği için elde edilen grafikler Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş SS316L için a) akma-çekme gerilme değerleri b)uzama (%) değerleri[61-63]

SS316L için TAKİ yöntemi ile üretilen numunelerde akma-çekme gerilmelerinin dövme referans değerleri karşıladığı görülmektedir. Uzama (%) değerlerinin tamamı referans değerlerden yüksek olarak tespit edilmiştir. Ayrıca SS308L ve SS316L malzemeleri kullanılarak üretilen malzemelerden elde edilen sertlik değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilen çelikler için sertlik değerleri

Malzeme	Özellikler	Sertlik Değerleri (Hv)	Kaynaklar
SS308L	Kuru havada soğuma	160.04±5.58	[54]
	Normal Soğuma	156.56±4.72	
	Alt kısım	169±5.67	[59]
	Orta kısım	163±5.36	
Üst kısım	155±1.20		
	Dövme (SS308)	92,6	[63]
SS316L	Gaz tungsten ark katmanlı imalat (GTAKİ)	190.37*	[61]
	Döküm	158#	[63]
	Dövme (SS316)	95	

(* : Ortalama değer alınmıştır.)(# : >1040°C'nin üzerinde tavllanmış ve suda soğutulmuş.)

TAKİ yöntemi ile üretilen SS308L ve SS316L malzemelerin sertlik değerleri geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilen sertlik değerlerini karşılamaktadır.

B. Alüminyum

Alüminyum alaşımları üstün mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri sebebiyle havacılık, gemi endüstrisi ve otomotiv gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır[64]. Maliyet kazançları ve üretim zamanında sağladığı önemli kısalmalar gibi avantajlı özellikleriyle TAKİ yöntemi bu malzemeler için önemli çalışma konusu olmuştur.

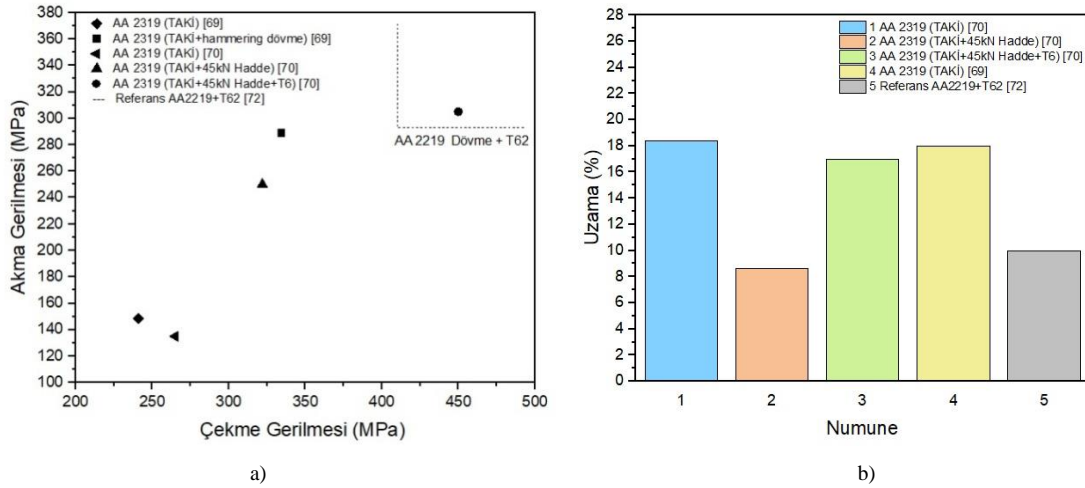
TAKİ yöntemiyle AA2319 [65], AA4043 [66] ve AA 5087[67] gibi farklı alüminyum alaşımları için araştırmalar yapılmıştır. Üretimlerde oksitlenme ile gözenekler oluştuğu ve yüksek ısı iletkenliği sebebiyle ergimeyen malzemelerin heterojen birikime neden olduğu belirlenmiştir [68]. Bu durumlar değerlendirildiğinde daha homojen üretim yapılabilmesi ve mekanik özelliklerin geliştirilebilmesi için üretim sırası veya üretim sonrası işlemler içeren farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Fang vd. çalışmalarında SMT yöntemini kullanarak katmanlar arası dövme işlemlerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Bu dövme işlemini pnömatik dövme metodu ile gerçekleştirmişlerdir. AA2319 alüminyum alaşımı için üretimde kullanılan bu yöntemin mekanik özellikleri geliştirdiğini raporlamışlardır [69].

Gu vd. havacılık endüstrisinde alüminyum 2000 serisinin özellikle AA2219 alaşımının yaygın olarak kullanıldığını belirtmişler ve TAKİ yöntemiyle istenilen mekanik özelliklerin sağlanması için soğuk işlem (haddeleme) ve üretim sonrası ısıtma işlemlerini araştırmışlardır. Çalışmalarında katmanlar arası 15kN-30kN-45kN şeklinde üç farklı yük uygulamışlardır. Ayrıca 45kN yük uygulanan numune için ilaveten T6 ısıtma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları değerlendirdiklerinde haddeleme işlemi uygulanan yük ile mekanik özelliklerin orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. T6 ısıtma işlemi ve 45kN şeklinde üretilen numunenin ise akma ve çekme gerilmesi değerlerini 305MPa ve 405MPa olarak tespit etmişlerdir. Bu değerlerin 2219+T6 dövme alaşım malzeme değerlerinden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir[70].

Geng vd. çalışmalarında 5A06 alüminyum alaşımı için karmaşık parça üretiminde geometrik sınırları ve malzemenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Seçtikleri parametreler için açılı birikimlerde 20° üzerinin tercih edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir. X ve Y düzlemlerinde çekme gerilmelerinin izotropik değerlere sahip olduğunu, çekme gerilmesini 273MPa akma gerilmesini 124 MPa ve uzama değerini ise %34 olarak raporlamışlardır [71].

AA2319 ve AA5087 alüminyum alaşımları için TAKİ yöntemi ile üretimde elde edilen mekanik değerler geleneksel imalat yöntemiyle üretimde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. TAKİ yöntemiyle üretilen AA2319 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 9'da gösterilmiştir.

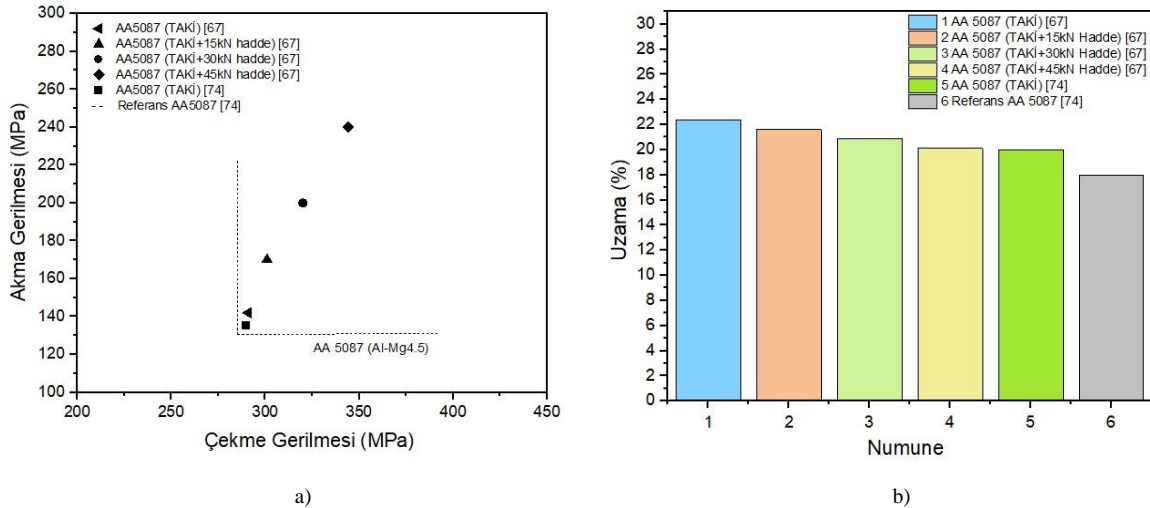


Şekil 9. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AA2319 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [69,70,72]

AA2319 alüminyum alaşımları için üretim esnasında uygulanan dövme yöntemi mekanik özellikleri geliştirmiştir. Ayrıca 45kN haddeme işlemi sonrasında yapılan ısıl işlem(T6) ile akma ve çekme gerilmelerinin dövme yoluyla üretilen AA2219+T6 alaşımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin uzama (%) değerleri ise genel olarak referans değerleri karşılamaktadır.

TAKİ yöntemiyle üretilen AA5087 numuneleri için elde edilen akma-çekme gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 10'da gösterilmiştir.

AA5087 alaşımlarında katmanlar arası hadde işleminde yükün artması ile mikro boşluk sayısı, hacim, boyut ve pürüzlülük değerlerinde orantılı olarak azalma olduğu tespit edilmiştir [73]. Buna bağlı olarak 15kN, 30kN ve 45kN şeklinde yüklerin artması ile orantılı olarak akma ve çekme gerilmesi değerleri artış göstermektedir.



Şekil 10. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AA5087 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b)uzama (%) değerleri [67,74]

AA5087 alüminyum alaşımı için TAKİ ile yöntemiyle üretilen numuneler geleneksel üretim metotları ile üretilen numunelerden daha iyi akma ve çekme gerilmesi değerleri sağlamaktadır. Ayrıca uzama (%) oranlarının da daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

C. Nikel

Nikel ve nikel esaslı alaşımlar; korozyon dayanımı, sıcaklık direnci ve yüksek mukavemet özellikleri bakımından modern endüstri için önemli malzemelerdendir. Bu üstün özellikleri sebebiyle petrokimya endüstrisi, havacılık sanayi ve nükleer santral gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [75]

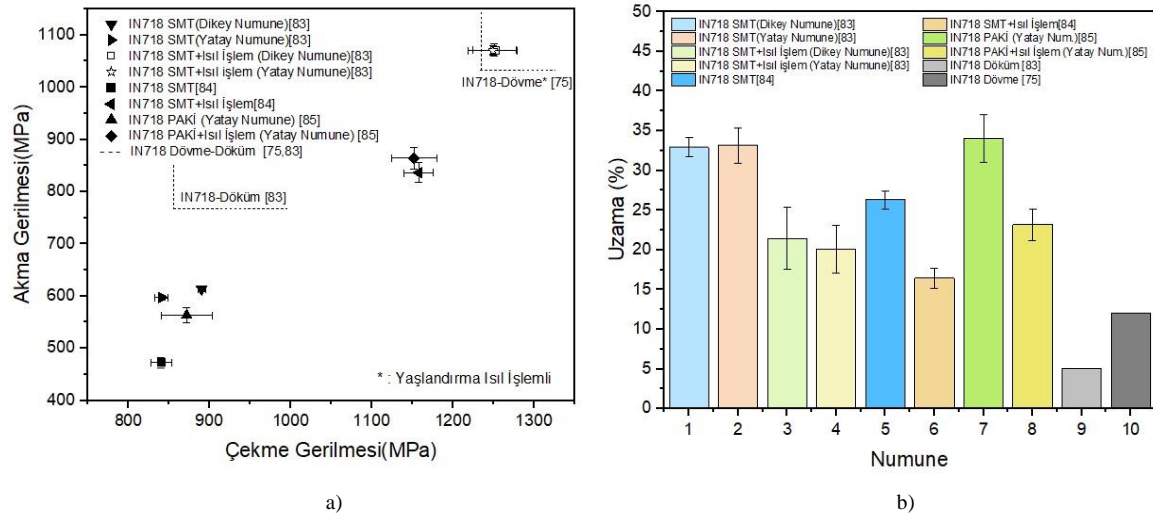
TAKİ yöntemiyle IN718 [76], IN625 [77], IN825 [78] ve Hastelloy C276 [79] gibi nikel süper alaşımları için birçok araştırma gerçekleştirilmiştir.

Seow vd. IN718 alaşımından PAKİ yöntemiyle yaptıkları çalışmada, üretim esnasında mikro yapıda oluşan anizotropinin giderilmesi için yeni bir ısıl işlem modeli araştırmışlardır. Üretimlerden sonra uygulanan 1186°C’de 40dk olarak uygulanan homojenizasyon ısıl işlemi ile tane yapısında anizotropinin azaldığı ve çekme gerilmeleri için elde edilen değerlerin geleneksel imalat yöntemlerinden döküm yöntemini karşıladığını ancak dövme değerlerinin elde edilemediğini belirtmişlerdir [80].

Safarzade vd. çalışmalarında IN625 alaşımları için GMAKİ yöntemiyle üretim gerçekleştirmişler ve üretimden sonra uygulanan çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemlerinin etkilerini araştırmışlardır. Çözeltiye alma ısıl işlemi ile malzeme akma gerilmesi ve sertlik değerlerinde artış olduğu sünekliği azaldığı ve çekme gerilmesinde önemli bir değişiklik olmadığını, sonra uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi ile akma-çekme gerilmeleri, süneklik ve sertlik değerlerinde azalmalar olduğunu raporlamışlardır [81].

Qiu vd. GTAKİ yöntemiyle ürettikleri nikel esaslı Hastelloy C276 alaşımında ısıl işlemin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Üretim sonrasında 1177°C’de çözeltiye alma ısıl işlemi ile Molibdenin (Mo) mikroyapıda çözündüğü ve dayanımın arttığını, mekanik özelliklerde görülen anizotropinin kaybolduğunu ve süneklik değerinin arttığını tespit etmişlerdir [82].

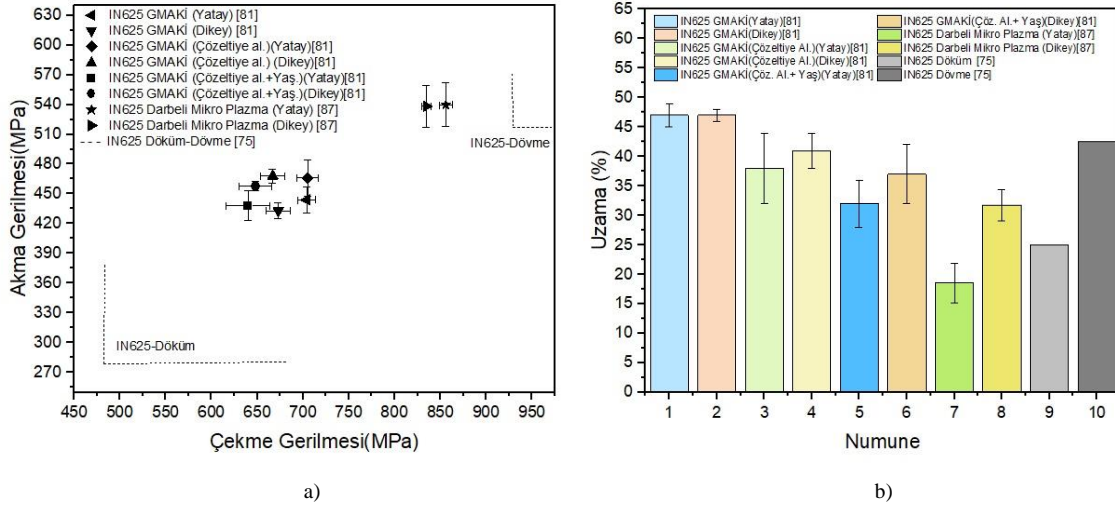
IN718 ve IN625 nikel süper alaşımları için TAKİ yöntemi ile üretimde elde edilen mekanik değerler geleneksel imalat yöntemiyle üretimde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. TAKİ yöntemiyle üretilen IN718 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş IN718 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [75,83-85]

SMT ve PAKİ yöntemiyle üretilen IN718 numuneleri için akma-çekme gerilmelerinin referans değerleri karşılamadığı görülmektedir. Numunelere uygulanan ısıl işlemin sonucunda akma-çekme gerilmeleri döküm değerleri karşıladığı ancak dövme değerlerinin altında kaldığı tespit edilmiştir. Uzama (%) değerlerinin tamamı dövme ve döküm referans değerlerinden yüksek olarak tespit edilmiştir.

IN625 nikel süper alaşımı, çözeltiye alma sertleştirme uygulanabilen yüksek sürünme dayanımı ve korozyon direnci sebebiyle endüstride yoğun olarak kullanılan alaşımlardandır [86]. TAKİ yöntemiyle üretilen IN625 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş IN625 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [75,81,87]

GMAKİ yöntemiyle üretilen IN625 alaşımları için çözeltiyeye alma ısıl işleminin akma gerilmesi değerlerine olumlu etki ettiği ancak çözeltiyeye alma + yaşlandırma ısıl işleminin akma-çekme değerlerinde azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu ısıl işlemlerin uzama (%) değerlerinde azalmalara neden olduğu görülmüştür.

Darbeli mikro plazma ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilen numunelerde akma-çekme gerilmeleri daha yüksek olarak tespit edilmiş ancak uzama (%) miktarlarında anizotropik değerlere ulaşılmış ve yatay numunenin referans değerleri karşılamadığı, dikey numunenin dövme değerlerini sağladığı tespit edilmiştir.

GMAKİ yöntemi ile üretilen IN625 alaşımları için ısıl işlemlerin akma-çekme gerilmelerine olumlu yönde etki ettiği ancak uzama (%) değerlerinde azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir.

D. Magnezyum

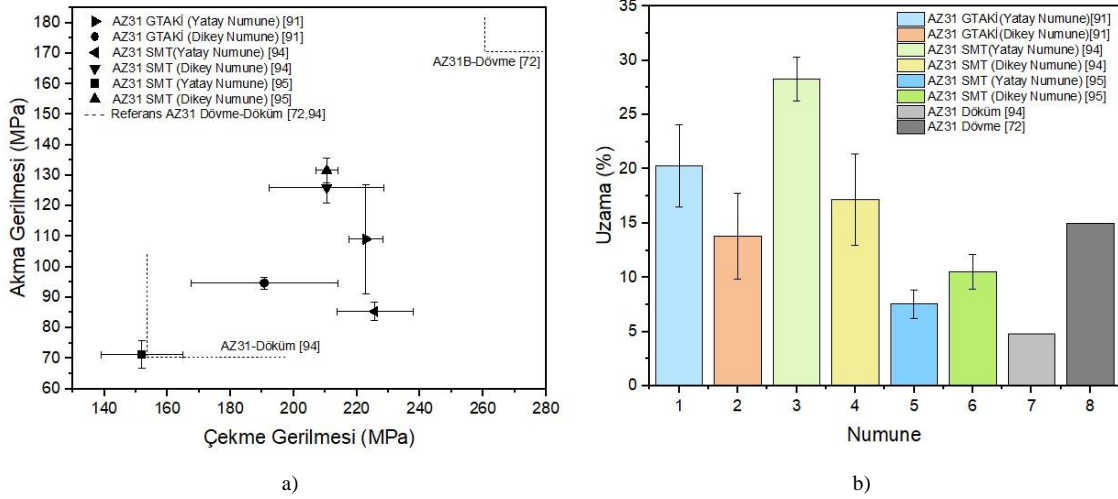
Magnezyum alaşımları, düşük yoğunluğuna ($1,74 \text{ gr/cm}^3$) rağmen yüksek çekme gerilmesi (160-365 MPa) ve elastik modülü (45MPa) özelliği gösterdiği için otomotiv ve havacılık endüstrisinde yoğun olarak kullanılmaktadır [75]. TAKİ yöntemiyle AZ31 [88], AZ61 [89] ve AZ80M [90] gibi birçok farklı magnezyum alaşımı için araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Fang vd. GTAKİ imalat yöntemiyle AZ31 magnezyum alaşımı numune üretmişlerdir. Mekanik özelliklerin geleneksel imalat yöntemlerinden döküm ile elde edilen değerleri sağladığını ve dövme değerlerine yaklaştığını tespit etmişlerdir [91].

Ying vd. çalışmalarında farklı proses parametreleri kullanarak AZ61 magnezyum alaşımı üretmişlerdir. Mikroyapıda ince tanelerin elde edildiği ve gözeneklerin azaltılabildiği proses parametrelerini 130A akım, 12.5 kV voltaj ve 820 mm/dk tel besleme hızı değerleri olarak raporlamışlardır [92].

Guo vd. GTAKİ yöntemiyle ürettikleri AZ80M alaşımları için, çözeltiyeye alma (T4), yaşlandırma (T5) ve çözeltiyeye alma+yaşlandırma (T6) ısıl işlemlerinin mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. T4 ısıl işlemi ile en yüksek süneklik değerlerine ulaştıklarını ve T6 ısıl işlemi ile T5 ısıl işlemine göre çekme gerilmesi ve süneklik değerlerinin arttığını, mekanik özellikler için yatay ve dikey numunelerde görülen anizotropik özelliklerin neredeyse kalmadığını raporlamışlardır [93].

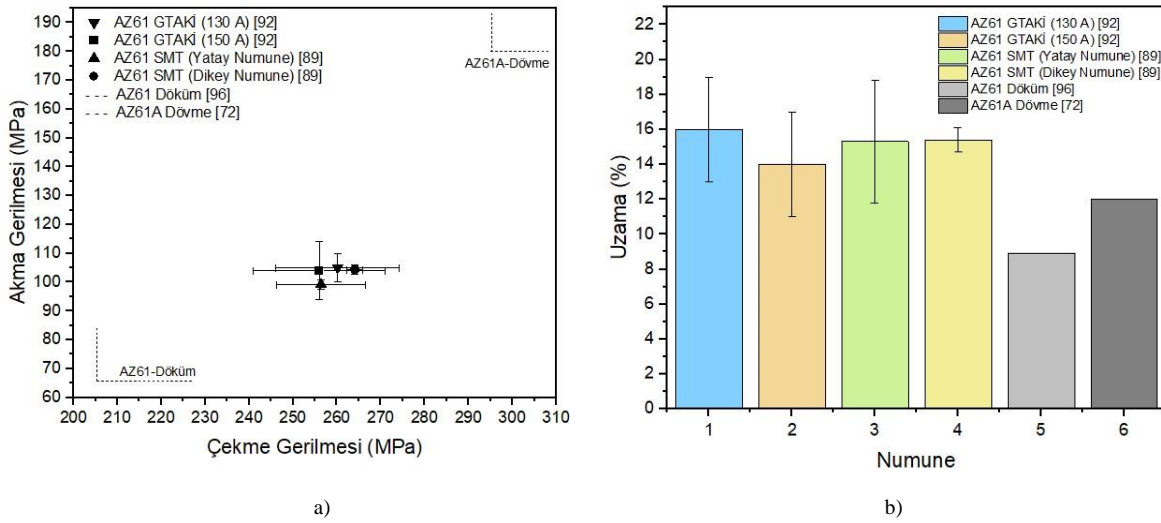
AZ31 ve AZ61 magnezyum alaşımları için TAKİ yöntemi ile üretimde elde edilen mekanik değerler geleneksel imalat yöntemiyle üretimde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. TAKİ yöntemiyle üretilen AZ31 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AZ31 magnezyum alaşımı için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [72, 91,94, 95]

AZ31 alaşımı için TAKİ yöntemiyle üretilen numunelerin mekanik özelliklerinde anizotropik özellikler görülmektedir. Elde edilen akma-çekme gerilmesi değerleri döküm yöntemi ile elde edilen değerleri karşılarken, dövme yöntemi değerlerinin altında kaldığı tespit edilmiştir. Yöntem kullanılarak elde edilen uzama (%) değerleri döküm ve dövme malzeme değerlerini sağlamaktadır.

TAKİ yöntemiyle üretilen AZ61 magnezyum alaşımları için elde edilen akma-çekme gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AZ61 magnezyum alaşımı için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [72, 89,92, 96]

AZ61 magnezyum alaşımları için mekanik özelliklerde anizotropi [89] ve farklı proses parametreleri [92] üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve akma-çekme gerilmelerinin döküm ile elde edilen değerleri karşıladığı ancak dövme ile elde edilen değerlerden düşük olduğu tespit edilmiştir. Uzama (%) değerleri için ise TAKİ yöntemi ile elde edilen veriler döküm ve dövme değerlerini karşılamaktadır.

Magnezyum, oksijen ile reaksiyona girebildiği için bu alaşımın katmanlı imalat yöntemleriyle imalatında atmosferik ortamdan korunması imalat zorluğu olarak açıklanmış ancak gerekli olduğu belirtilmiştir [97].

E. Titanyum

Geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak üretilen titanyum alaşımlarında malzeme kaybı önemli bir sorun olmaktadır. Bu nedenle katmanlı imalat yöntemleri titanyum alaşımları için özellikle yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı için dikkat çekici olmuştur. TAKİ yönteminde diğer katmanlı imalat yöntemlerinde

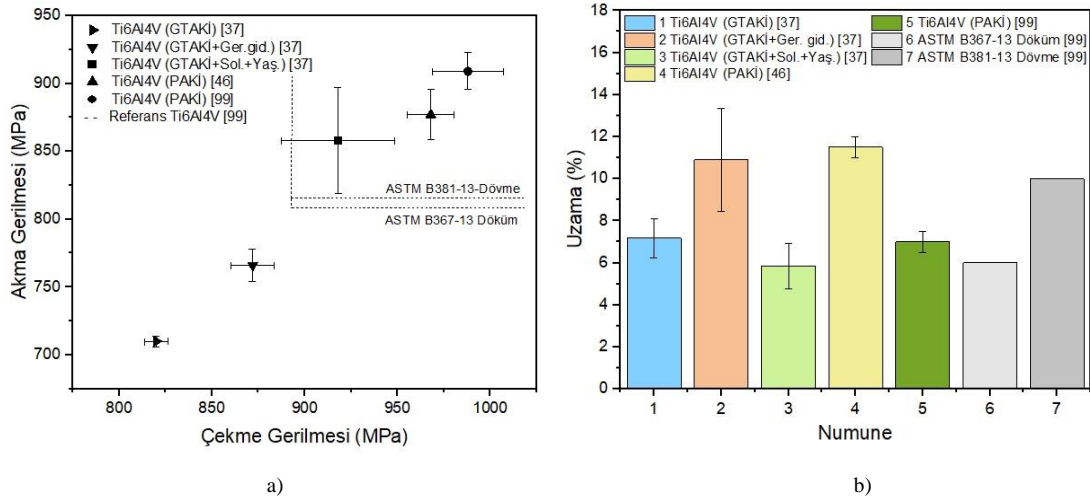
olduğu gibi ürün ile ham malzeme kullanım oranı birbirine yakındır ve titanyum gibi malzemelerde maliyet kazançları sağlanmaktadır. Bu yöntem ile yapılan çalışmalarda, Ti6Al4V alaşımı için elde edilen mekanik özelliklerin geleneksel imalat yöntemlerine yakın düzeyde olduğu [10], ayrıca dövme ve döküm malzemelerden istenilen mekanik özellikleri de sağladığı bildirilmiştir [98]. TAKİ yöntemi ile Ti6Al4V alaşımı için birçok farklı çalışma gerçekleştirilmiştir.

Lin vd. yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerini incelemiştir. Akma ve çekme gerilmelerinin sırasıyla 909 MPa ve 988MPa olduğunu ve zamanın yaklaşık %7,5'e ulaştığını tespit etmişlerdir. Katman geçişlerinde alfa fazı yığılması sebebiyle sertliğin düştüğünü ve daha düşük uzama görüldüğünü belirtmişlerdir. Üretilen malzemenin oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin klasik döküm malzemeden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir[99].

Martina vd. Ti6Al4V alaşımı için PAKİ yöntemiyle yaptıkları çalışmalarında efektif duvar genişliği için en uygun işlem parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Maksimum malzeme biriktirme hızını 1,8 kg/sa olarak elde etmişlerdir. Üretilen numunelerin sertlik değerini 387 Hv olarak ölçmüşler ve üretilen malzemenin birikim yapılan altlığa oranla da %12 daha yüksek sertlik değerine ulaştığını tespit edilmişlerdir. Plazma ark katmanlı imalat yönteminin büyük boyutlu havacılık bileşenleri için uygun olduğunu belirtmişlerdir [100].

Yong Xie vd. çalışmalarında, Ti-6Al-4V malzemesi kullanarak ürettikleri malzemede yorulma çatlak ilerlemesini ve çatlak ilerleme yönünün etkilerini araştırmışlardır. Gerilme yoğunluk faktörü geçiş noktasının δ_{kt} yatay numunelerde 10,3 MPa $m^{1/2}$ dikey numunelerde 11,3 MPa $m^{1/2}$ olduğunu tespit etmişlerdir. Gerilim şiddeti faktörü geçiş noktasının δ_{kt} , δ_k değerinden küçük olduğunda dikey numunenin yatay numuneye göre yorulma çatlak ilerlemesi %5 daha yüksek olduğunu ve yorulma çatlak ilerlemesindeki farkın mikro yapı karakterizasyonu ve yorulma çatlak büyüme yönünden kaynaklandığını tespit etmişlerdir [101].

Ti6Al4V alaşımı için TAKİ yöntemi ile üretilen malzemelerden elde edilen akma-çekme gerilmesi ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımları için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [37, 46, 99]

Ti6Al4V alaşımları için TAKİ yöntemiyle üretimlerde kullanılan yöntemin önemli olduğu ve PAKİ ile üretilen Ti6Al4V alaşımları için dövme ve döküm gibi geleneksel imalat yöntemlerinden elde edilen akma-çekme ve uzama (%) gibi mekanik değerlerin sağlanabildiği tespit edilmiştir. GTAKI ile yapılan üretimlerde gerilme giderme ve çözültüye alma + yaşlandırma ısıl işlemlerinin akma ve çekme gerilmelerinde önemli artışlar sağladığı, çözültüye alma + yaşlandırma ısıl işlemi yapılan numunede uzama (%) değerinde azalma olduğu görülmüştür.

TAKİ yöntemiyle imal edilen parçalarda kalıntı gerilme, oksitlenme, gözenek ve çatlak oluşumu gibi imalat hataları ile karşılaşılabilir. Titanyum ve magnezyum alaşımları yoğun oksitlenme gösterirken alüminyum alaşımlarında gözenek oluşumu, çelik alaşımları imalatında çatlak oluşumları görülebilmektedir[102]. Ayrıca nikel alaşımlarının bu yöntemle imalatında gözenekler, gaz boşlukları ve termal çatlaklar görülebilmektedir. Bu problemlerin çözümü için birikim sonrası ısıl işlem uygulamaları, proses parametrelerinin optimize edilmesi ve sıcak deformasyon gibi farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [76].

Üretim zamanında tasarruf sağlamak ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi için TAKİ yöntemleri ile talaşlı imalatın uyumlaştırılması [103] ve birikim esnası haddeleme işlemleri [104] gibi hibrit çalışmalar yöntemin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Yöntemin geliştirilmesinde malzeme araştırmalarının yanında, farklı birikim

stratejileri [105], topoloji optimizasyonu[106] ve akıllı öğrenme algoritması [107] gibi yenilikler ile araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışmaların yoğunlaşması ile yöntemin yakın gelecekte endüstride yaygın olarak kullanılacağı düşünülmektedir.

V. SONUÇLAR

Bu derleme çalışması ile; Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yönteminin açıklanması, sınıflandırılması ve yapılan araştırmalarda üretilen çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımları için elde edilen mekanik özelliklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir.

- SS308L ve SS316L paslanmaz çelik alaşımları için TAKİ yöntemi ile yapılan üretimlerde soğuma koşulları ve katmanlar arası geçiş sıcaklığı mekanik özellikleri önemli oranda etkilemektedir.
- Alüminyum alaşımları için üretimlerde birikim sırası veya sonrasında haddeleme işlemleri mekanik özelliklere olumlu etki etmektedir. Ayrıca haddeleme sonrasında uygulanan ısıl işlem ile akma-çekme gerilmesi değerlerinin arttığı görülmüştür.
- IN718 nikel alaşımları için birikim sonrası ısıl işlemler akma-çekme gerilmelerinde önemli artışlar sağlarken, bu alaşımlar için geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilen verilen sağlanması için ısıl işlemlerin önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. IN625 alaşımlarına uygulanan ısıl işlemlerin mekanik değerleri çok az etkilediği görülmüştür.
- Magnezyum alaşımları için yapılan çalışmalarda elde edilen mekanik veriler döküm yöntemi akma-çekme gerilme değerlerini sağlarken, dövme yöntemi ile elde edilen verilerin çok aşağısında kalmıştır. Bu alaşımlar oksitlenme özelliği gösterdiği için atmosfer ortamından arındırılmış kapalı ortamlarda yapılacak çalışmalar ile istenilen mekanik değerlerin sağlanabileceği düşünülmektedir.
- Ti6Al4V alaşımları için Plazma ark katmanlı imalat (PAKİ) yöntemiyle yapılan üretimlerde geleneksel yöntemlerle (döküm-dövme) üretilen referans değerler sağlanabilmektedir.

Tüm bu durumlar değerlendirildiğinde, TAKİ yöntemi kullanılarak üretilen çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımları için üretimler ve üretim sonrası yapılan işlemler ile geleneksel imalat yöntemleri mekanik değerlerinin sağlanabileceği ve bu yöntemin önümüzdeki yıllarda imalat teknolojisinde önemli bir konu olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ASTM International. (2021). *52900:2021 Additive manufacturing-general principles-fundamentals and vocabulary*. ASTM International, USA.
- [2] Turhan, S., & Özsoy, A. (2016). DMLS yöntemiyle imal edilen Ti6Al4V alaşım özelliklerine işlem parametrelerinin etkisi. *SDU International Journal of Technological Science*, 8 (2),15-27.
- [3] Aktimur, B., & Gökpınar, E. S. (2015). Katmanlı üretimin havacılıktaki uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (2), 463–469.
- [4] Zhang, J., Wang, X., Paddea, S., & Zhang, X. (2016). Fatigue crack propagation behavior in wire+arc additive manufactured Ti6Al4V: Effects of microstructure and residual stress. *Materials and Design*, 90, 551-561.
- [5] Oesterreicher, A., Wiener, J., Roth, M., Moser, A., Gmeiner, R., Edler, M., Pinter, G., & Griesser, T. (2016). Tough and degradable photopolymers derived from alkyne monomers for 3D printing of biomedical materials. *Polymer Chemistry*, 32, 5169-5180.
- [6] Zhou, Y., Qin, G., Li, L., Lu, X., Jing, R., Xing, X., & Yang, Q. (2020). Formability, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V deposited by wire and arc additive manufacturing with different deposition paths. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138654.
- [7] Hauser, T., Silva, A., Reisch, R., T., Volpp, J., Kamps, T., & Kaplan, A. (2020). Fluctuation effects in wire arc additive manufacturing of aluminum analyzed by high-speed imaging. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1088–1098.
- [8] Dinovazer, M., Chen, X., Lallberte, J., Huamg, X., & Frei, H. (2019). Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure, *Additive Manufacturing*, 26, 138-146.
- [9] Gonzalez, J., Rodriquez, I., Prado-Cerqueira, J. L., Diequez, J. L., & Pereira, A. (2017). Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology, *Procedia Manufacturing*, 13, 840-847.
- [10] Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32 (7), 641-647.
- [11] Taberero, I., Paskual, A., Álvarez, P., & Suárez, A. (2018). Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 68, 358-362.

- [12] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., & Li, H. (2018). Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 23, 151–160.
- [13] Yılmaz, O., & Ugla, A. A. (2016). Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230 (10), 1781-1798.
- [14] Wang, C., Suder, W., Ding, J., & Williams, S. (2021). Wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti6Al4V, *Journal of Materials Processing Tech.*, 293, 117080.
- [15] Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1): 606 – 621.
- [16] Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24, 2, 373-392.
- [17] Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018). Havacılık komponentlerinin bakım uygulamalarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı. *Mühendis ve Makina* 59, 691, 59-69.
- [18] Çalışkan, C. İ., & Arpacıoğlu, Ü. (2020). Yapı üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılmalı değerlendirmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25, 2, 1117-1136.
- [19] Güngör, A. (2020). Türkiye’de katmanlı imalat ve gemi inşaatı üzerine etkileri. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 218, 36-53.
- [20] Özsolak, O. (2019). Thermal changes and modelling in additive manufacturing. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3, 2, 33-38.
- [21] Aktürk, M., & Korkmaz, M. E. (2021). Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş alüminyum alaşımlarının malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi üzerine bir derleme, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları* 2, 1, 49-60.
- [22] Gülcan, O., Konukseven, E. İ., & Temel, S. (2017). Katmanlı imalatla üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 15, 1, 27-37.
- [23] Güler, S., Serindağ, H. T., & Çam, G. (2022). Tel ark eklemeli imalat: son gelişmeler ve değerlendirmeler, *Mühendis ve Makina* 63, 706, 82-116.
- [24] Ayan Y., & Kahraman N. (2018). Metal eklemeli imalat: Tel ark yöntemi ve uygulamaları, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 2, 3, 74-84.
- [25] Hönnige, J. R., Colegrove, P., & Williams, S. (2017). Improvement of microstructure and mechanical properties in wire+arc additively manufactured Ti6Al4V with machine hammer peening, *Procedia Engineering* 216, 8–17.
- [26] Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D., & Liu, W. (2020). Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A Review, *Applied Sciences*, 10, 1563.
- [27] Wang, J., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2019). Phase constituent control and correlated properties of titanium aluminide intermetallic alloys through dual-wire arc additive manufacturing, *Materials Letters*, 242, 111–114.
- [28] Omiyale, B. O., Olugbade, T. O., Abioye, T. E. & Farayibi, P. K. (2022). Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys for aerospace and automotive applications: a review. *Materials Science and Technology*, 38, 7, 391-408.
- [29] Queguineur A, Rückert G, Cortial F, & Hascoet J. Y. (2018). Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *Welding in the World*, 62, 259–266.
- [30] Buchanan, C., & Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 180, 332–348.
- [31] Li, F., Chen, S., Wu., Z., & Yan, Z. (2018). Adaptive process control of wire and arc additive manufacturing for fabricating complex-shaped components, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 871-879.
- [32] Stavinoha, J. N. (2012). Investigation of plasma arc welding as a method for the additive manufacturing of titanium-(6) aluminum-(4) vanadium alloy components. Master Thesis, Montana Tech of the University of Montana, Master of Science General Engineering, USA.
- [33] Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., & Gault, R. (2010). Additive manufactured Ti- 6Al- 4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Phys. Procedia* 5, 595–606.
- [34] Ho, A., Zhao, H., Fellowes, J.W., Martina, F., Davis, A.E., & Pragnell, P.B. (2019). On the origin of microstructural banding in Ti-6Al4V wire-arc based high deposition rate additive manufacturing. *Acta Materialia*, 166, 306-323.
- [35] Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., & Fei, Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *J. Mater. Process Technol.* 250, 304–312.

- [36] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., & Fei, Z. (2018). The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *J. Mater. Process Technol.* 258, 97–105.
- [37] Bermingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y., & Dargusch, M. S. (2018). Optimizing the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 753, 247–255.
- [38] Ding, D. H., Pan, Z. X., Cuiuri, D., & Li, H. J. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 465-481.
- [39] Li, J. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A. B., Hasan, R., Sudin, M. N., & Ramli, F., R. (2019). Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing. *Int. J. of Automation Technology*, 13 (3), 346-353.
- [40] Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R. M., V., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Materials*, 12(7), 1121.
- [41] Sawant, M. S., & Jain, N. K. (2017). Characteristics of single-track and multi-track depositions of stellite by Micro-plasma Transferred Arc Powder Deposition Process, *J. of Materials Engineering and Performance*, 26,8, 4029-4039.
- [42] Correa, E. O., Costa, S. C., & Santos, J. N. (2008). Weldability of iron-based powder metal materials using pulsed plasma arc welding process, *J. Mater. Process. Technol.* 198, 323–329.
- [43] Feng, J., Zhang, H. & He, P. The CMT short circuiting metal transfer process and its use in thin aluminum sheets welding. (2009). *Materials and Design*, 30, 1850-1852.
- [44] Mou, G., Hua, X., Wang, M., & Li, F. (2019). Effects of Ni addition on removing Fe-Ti intermetallic compounds in cold metal transfer arc-brazed TC4/304L dissimilar joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 104-112.
- [45] Wang, L., Suo, Y., Liang, Z., Wang D., & Wang, Q. (2019). Effect of titanium powder on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al-Mg alloy, *Materials Letters*, 241, 231-234.
- [46] Lin, J., Lv, Y., Liu, Y., Sun, Z., Wang, K., Li, Z., Wu, Y., & Xu, B. (2017). Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 69, 19–29.
- [47] McGuire, M. (2008). *Stainless Steels for Design Engineers*. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 304.
- [48] Gordon, J. V., & Harlow, D. G. (2019). Statistical modeling of wire and arc additive manufactured stainless steel 304: microstructure and fatigue. *International Journal of Reliability Quality and Safety Engineering*, 26, 4 1950016.
- [49] Bekker, A. C. M. & Verlinden, J. C. (2018). Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and cnc milling in stainless steel. *Journal of Cleaner Production*, 177, 438-447.
- [50] Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., & Seely, D. W. (2015). Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel. *Materials Science & Engineering A*, 644, 171-183.
- [51] Aldalur, E., Veiga, F., Suarez, A., Bilbao, J., & Lamikiz, A. (2020). High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes* 58, 615–626.
- [52] Ge, J., Lin, J., Chen, Y., Lei, Y., & Fu, H. (2018). Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties. *Journal of Alloys and Compounds* 748, 911-921.
- [53] Yang, G., Deng, F., Zhou, S., Wu, B., Qin, L. & Zheng, J. (2022). Influence of shielding gas nitrogen content on the microstructure and mechanical properties of Cu reinforced maraging steel fabricated by wire arc additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A*, 832, 142463.
- [54] Le, V. T., Mai, D. S., & Hoang, Q. H. (2020). Effects of cooling conditions on the shape, microstructures, and material properties of SS308L thin walls built by wire arc additive manufacturing, *Materials Letters*, 280, 128580.
- [55] Wang, C., Liu, T. G., Zhu, P., Lu, Y. H., & Shoji, T. (2020). Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A*, 796, 140006.
- [56] Xu, X., Ganguly, S., Ding, J., & Guo, S., Williams, S., & Martina, F. (2018). Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire+arc additive manufacture process, *Materials Characterization* 143, 152–162.
- [57] Haden C. V., Zeng, G., Carter, F. M., Ruhl, C., Krick, B. A., & Harlow, D. G., (2017). Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, 16, 115–123.

- [58] Wang, T., Zhang, Y., Wu, Z., & Shi, C. (2018). Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire. *Vacuum*, 149, 185-189.
- [59] Le, V. T. & Mai, D. S. (2020). Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing. *Materials Letters* 271, 127791.
- [60] Li, M., Lu, T., Dai, J., Jia, X., Gu, X., & Dai, T. (2020). Microstructure and mechanical properties of 308L stainless steel fabricated by laminar plasma additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A* 770, 138523.
- [61] Chen, X., Li, J., Cheng, X., He, B., Wang, H., & Huang, Z. (2017). Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A*, 703, 567–577.
- [62] Rodriguez, N., Vázquez, L., Huarte, I., Arruti, E., Tabernero, L., & Alvarez, P. (2018). Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. *Welding in the World*, 62, 1083–1096.
- [63] ASM International. (2008). *Stainless Steels*, Metals Handbook Desk Edition. Materials Park, USA, 368-388.
- [64] Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., & Akselsen, O. M., (2018). Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of Materials Processing Tech*, 259, 68-74.
- [65] Yongjie, L., Shengfu, Y., Ying, C., Runzhen, Y. & Yusheng, S. (2020). Wire and arc additive manufacturing of aluminum alloy lattice structure. *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 510-519.
- [66] Campatellia, G., Campanella, D., Barcellona, A., Fratini, L., Grossia, N., & Ingarao, G. (2020). Microstructural, mechanical and energy demand characterization of alternative WAAM techniques for Al-alloy parts production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 492-499.
- [67] Gu, J., Wang, X., Bai, J., Ding, J., Williams, S., Zhai, Y., & Liu, K., (2018). Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire +arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling. *Materials Science & Engineering A*, 712, 292–301.
- [68] Ding, Y., Muñoz-Lerma, J.A., Trask, M., Chou, S., Walker, A. & Brochu, M. (2016). Microstructure and mechanical property considerations in additive manufacturing of aluminum alloys. *MRS Bulletin*, 41, 745–751.
- [69] Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Huang, K., Xue, F., Wang, L., Zhao, J., & Lu, B. (2021). Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering. *Materials Science & Engineering A*, 800, 140168.
- [70] Gu, J., Ding, J., Williams, S., Gu, H., Bai, J., Zhai, Y., & Ma, P. (2016). The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3Cu alloy. *Materials Science & Engineering A*, 651, 18–26.
- [71] Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., & Zhang, F. (2017). Geometric limitation and tensile properties of wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminum alloy parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 621–629.
- [72] ASM International. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Volume 2, Metals Handbook. USA, 29-122.
- [73] Gu, J., Yang, S., Gao, M., Bai, J., Zhai, Y., & Ding, J. (2020). Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling. *Materials & Design*, 186, 108288.
- [74] Hauser T., Reisch, R. T., Seebauer S., Parasar, A., Kamps T., Casati, R., Volpp, J., & Kaplan, A. F. H., (2021). Multi-Material Wire Arc Additive Manufacturing of low and high alloyed aluminum alloys with in-situ material analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 378-390.
- [75] ASM International. (2008). *Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Metals Handbook, Desk Edition. *The Materials Information Society, USA*, 415-639.
- [76] Lan, B., Wang, Y., Liu, Y., Hooper, P., Hooper, C., Zhang, G., Zhang, X., & Jiang, J. (2021). The Influence of microstructural anisotropy on the hot deformation of wire arc additive manufactured (WAAM) Inconel 718. *Materials & Engineering A*, 823, 141733.
- [77] Wang, Y., Chen, X., Shen, Q., Su, C., Zhang, Y., Jayalakshmi, S. & Singh, R. A., (2021). Effect of magnetic field on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 10-19.
- [78] Rajkumar, V., Visnukumar, M., Sowrirajan, M. & Kannan A. R. (2022). Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Incoloy 825 manufactured using wire arc additive manufacturing. *Vacuum*, 203, 111324.
- [79] Qiu, Z., Wu, B., Zhu, H., Wang, Z., Hellier, A., Ma, Y., Li, H., Muransky, O., & Wexler, D. (2020). Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy. *Materials and Design*, 195, 100007.

- [80] Seow, C. E., Coules, H. E., Wu, G., Khan, R., Xu, X., & Williams, S. (2019). Wire+arc additively manufactured Inconel 718: Effect of post-deposition heat treatments on microstructure and tensile properties. *Materials and Design*, 183, 108157.
- [81] Safarzade, A, Sharifitabar, M. & Afarani, M. S. (2020). Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30, 3016-3030.
- [82] Qiu, Z., Wu., B., Wang., Z., Wexler, D., Carpenter, K., Zhu, H., Muransky, O., Zhang, J. & Li, H. (2021). Effects of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy. *Materials Characterization*, 177, 111158.
- [83] Xi, N., Fang, X., Duan, Y., Zhang, Q.& Huang, K. (2022). Wire arc additive manufacturing of Inconel 718: Constitutive modelling and its microstructure basis. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 1134-1143.
- [84] Zhang, T., Li, H., Gong, H., Wu, Y., Ahmad, A. S. & Chen, X. (2021). Effect of rolling force on tensile properties of additively manufactured Inconel 718 at ambient and elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 884, 161050.
- [85] Wang, K., Liu, Y., Sun, Z., Lin, J., Lv, Y. & Xu, B., (2020). Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 718 superalloy thin wall fabricated by pulsed plasma arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and compounds*, 819, 152936.
- [86] Sharifitabar, M., Khorshahian, S., Afarani, M. S., Kumar, P. & Jain, N. K. (2022). High temperature oxidatiton performance of Inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Corrosion Science*, 197,110087.
- [87] Yuan, X., Qiu, H., Zeng, F., Luo, W., Li, H., Wang, X., Guan, N. & Cui, F. (2022). Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed microplasma rapid additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 63-74.
- [88] Wang, P., Zhang, H., Zhu, H., Li, Q., & Feng, M. (2021). Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: processing, microstructure, and mechanical behavior. *Journal of Materials Processing Tech.*, 288,116895.
- [89] Klein, T., Arnoldt, A., Schnall, M., & Gneiger, S. (2021). Microstructure formation and mechanical properties of wire-arc additive manufactured magnesium alloy, *JOM*, 73, 4, 1126-1134.
- [90] Guo, Y., Pan, H., Ren, L., & Quan, G. (2019). Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy. *Materials Letters*, 247,4-6.
- [91] Fang, X., Yang, J., Wang, S., Wang, C., Huang, K., Li, H., & Lu, B. (2022). Additive manufacturing of high performance AZ31 magnesium alloy with full equiaxed grains: Microstructure, mechanical property, and electromechanical corrosion performance. *Journal of Materials Processing Tech.*, 300, 117430.
- [92] Ying, T., Zhao, Z., Yan, P., Wang, J., & Zeng, X. (2022). Effect of fabrication parameters on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured AZ61 alloy. *Materials Letters*, 307, 131014.
- [93] Guo, Y., Quan, G., Çelikin, M., Ren, L., Zhan, Y., Fan, L.& Pan, H. (2022). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of AZ80M magnesium alloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Journal of magnesium and alloys*, 10, 7, 1930-1940.
- [94] Yang, X., Liu, J., Wang, Z., Lin, F., Huang, W., & Liang, E. (2020). Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process. *Materials Science & Engineering A*, 774, 138942.
- [95] Li, J., Qiu, Y., Yang, J., Sheng, Y., Yi, Y., Zeng, X., Chen, L., Yin, F., Su, J., Zhang, T., Tong, X., & Guo, B. (2021). Effect of grain refinement induced by wire and arc additive manufacture (WAAM) on the corrosion behaviors of AZ31 magnesium alloy in NaCl solution. *Journal of Magnesium Alloys*, basimda.
- [96] Xia, X., Chen, M., Lu, Y., Fan, F., Zhu, C., Huang, J., Deng, T. & Zhu, S. (2013). Microstructure and mechanical properties of isothermal multi-axial forging formed AZ61 Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 3186-3192.
- [97] Karunakaran, R., Ortgies, S., Tamayol, A., Bobaru, F., & Sealy, M. P. (2020). Additive manufacturing of magnesium alloys. *Bioactive Materials*, 5, 44-54.
- [98] Baufeld, B., & Biest, O. (2009). Mechanical properties of Ti6Al4V specimens produced by shaped metal deposition. *Science and Technology of Advanced Materials*, 10 (1).
- [99] Lin, J. J., Lv, Y. H., Liu, Y. X., Xu, B. S., Sun, Z., Li, Z. G., & Wu, Y. X. (2016). Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing, *Materials and Design*, 102, 30–40.
- [100] Martina, F., Mehnen, J., Williams, S., Colegrove, P., & Wang, F. (2012). Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti6Al4V. *Journals of Materials Processing Technology*, 212 (6), 1377-1386.
- [101] Xie, Y., Gao, M., Wang, F., Zhang, C., Hao, K., Wang, H., & Zeng, X. (2018). Anisotropy of fatigue crack growth in wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science & Engineering A*, 709, 265-269.

- [102] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects, and quality improvement. *Journal of manufacturing processes*, 35 127-139.
- [103] Li, F., Chen, S., Shi, J., & Tian, H. (2018). Investigation on Surface Quality in a Hybrid Manufacturing System Combining Wire and Arc Additive Manufacturing and Machining, *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 127-137.
- [104] Lu, Y., Wang, G, Zhang, M., Li, R., & Zhang, H. (2022). Microstructures, heat treatments and mechanical properties of AerMet100 steel fabricated by hybrid directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, 56, 102885.
- [105] Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Aguilar, D., & Álvarez, P. (2022). Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminum WAAM components, *Materials & Design*, 221, 110974.
- [106] Mishra, V., Ayas, C., Langelaar, M., & Keulen, F. (2022). Simultaneous topology and deposition direction optimization for Wire and Arc Additive Manufacturing, *Manufacturing Letters*, 31, 45–51.
- [107] Ding, D., He, F., Yuan, L., Zengxi Pan, Z., Wang, L., & Ros, M. (2021). The first step towards intelligent wire arc additive manufacturing: An automatic bead modelling system using machine learning through industrial information integration, *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100218.



Derleme Makalesi - Review Article

Bazı İterasyon Yöntemleri için Cesàro Ortalamasının Kuvvetli ve Zayıf Yakınsaklığı

Strong and Weak Convergence of Cesàro Mean for Some Iteration Methods

Lale Cona^{1*}, Çiğdem Kaygusuz²

Geliş / Received: 17/10/2022

Revize / Revised: 11/01/2023

Kabul / Accepted: 16/01/2023

ÖZ

Bu makalede, ilk olarak toplanabilme teknikleri ve iterasyon yöntemleri araştırılmıştır. Ayrıca, bazı iterasyon yöntemleri için Cesàro anlamında toplanabilme tekniğine bağlı olarak ergodik teori üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Son olarak asimptotik genişlemeyen dönüşümler için Halpren iterasyonu ile Cesàro ortalamasının güçlü yakınsaklığı üzerine yapılan bir çalışma irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Cesàro Toplanabilme, Ergodik Teori, İterasyon Yöntemleri, Kuvvetli Yakınsaklık, Sabit Nokta Yaklaşımları

ABSTRACT

In this article, firstly, summability techniques and iteration methods are investigated. In addition, studies on ergodic theory which are related to the Cesàro mean summability technique are examined for some iteration methods. Finally, a study on the strong convergence the Cesàro mean with the Halpren iteration for asymptotic non-expanding transformations is discussed.

Keywords- Cesàro Summability, Ergodic Theory, Iteration Methods, Strong Convergence, Fixed Point Approaches

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: lalecona@gumushane.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2744-1960>)

Matematik Mühendisliği, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Türkiye

²İletişim: cigdem.kaygusuz61@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1420-7443>)

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

I. GİRİŞ

Seriler, iraksak ve yakınsak olarak iki gruba ayrılırlar. Bir serinin kısmi toplamlar dizisi bir limit değerine sahip ise bu seri yakınsaktır. Kısmi toplamlar dizisinin limiti yoksa bu seri iraksak bir seridir. Literatür incelendiğinde 17. yüzyıl öncesinde iraksak seriler ile ilgili çalışmalar yapıldığı görülmüştür, ancak iraksak serileri ilk kullanan araştırmacılar Newton ve Leibnitz'dir. 17. yüzyılın sonlarında Grandi seriler hakkındaki ilk tartışmayı

$$1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots$$

serisi ile başlatmıştır. Grandi, 1703 yılındaki çalışmasında;

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + x^4$$

serisinde $x = 1$ yazarak $\frac{1}{2}$ sonucunu bulmuştur [1]. Yine 17. yüzyılda Bernoulli sezgisel argümanları kullanarak iraksak serilere değer bulmaya çalışmıştır. 18. yüzyılda matematikçiler iraksak serilerin tam değerinin olamayacağını belirterek daha çok yakınsak sonsuz seriler üzerinde çalışmışlardır. Cauchy, 1821 yılında serilerin yakınsaklığını formülize etmiştir ve Algebric Analysis kitabında bunlara yer vermiştir [2].

Cesàro, 1890 yılında Hardy'nin Divergent Series adlı kitabında iraksak serileri toplayabilmenin temelini atan ilk matematikçi olmuştur [3]. Cesàro, $\sum a_n$ serisinin kısmi toplamlar dizisi (s_n) olmak üzere; “ (s_n) kısmi toplamlar dizisinin aritmetik ortalama dizisi bir s değerine yakınsar ise $\sum a_n$ serisi de aynı s değerine yakınsar” şeklinde ifade eder. Bu ifadeye Cesàro toplanabilirlik denir ve $(C, 1)$ şeklinde gösterir [3].

Flett, 1957 yılında α ncı mertebeden Cesàro toplanabilmeyi tanımlamıştır [4]. 1969 yılında ise mutlak toplanabilme tanımını vermiştir [5]. Toplanabilme çarpanını Kishore ve Hotta tanımlamışlardır [6]. $|A|_k$ toplanabilme tanımını alt üçgensel matrislerden yararlanarak Tanovic-Miller yapmıştır [7].

Gelişen literatürde Cesàro toplanabilmenin yanı sıra daha genel olan Riesz, Nörlund, Borel, Euler matris metotlarını tanımlanmışlardır [8]. Bu metotların dışında yine Hausdorf, Abel ve Tauber gibi bazı toplanabilme metotları da mevcuttur [9]. Ancak genel olarak bir toplanabilme metodunun kabul görmesi için bazı sağlaması gereken özellikler vardır:

- Regülerlik: Toplanabilme metodu sonunda bulunan değer, serinin yakınsadığı değerle aynı olmalıdır.
- Genişletme: Belirsiz iraksak serilerin en az birini toplayabilen bir toplama metodu olmalıdır.
- Tutarlılık: Farklı iki toplanabilme metodu bir iraksak seriye uygulandığında aynı sonuç bulunmalıdır.

Galileo “Doğanın muazzam kitabının dili matematiktir” cümlesini kullanmıştır. Tarih boyunca bilimsel bilgi Kimya, Fizik, Tıp, Bilgisayar ve Ekonomi gibi değişik isimlerle karşımıza çıkmıştır. Bu bilimsel bilgiler kendi içlerinde ya da birinin diğeri ile ilişkisi sonucunda soyut veya pratik birçok problem kapsamaktadır. Bu tür problemlerin matematiksel modellerinin çözümünde bilinmeyenleri belirlemek için cebirsel, fonksiyonel, diferansiyel ve integral denklemlerin kullanıldığı birçok yöntem mevcuttur. Galileo'nun yukarıdaki sözü bize matematiğin günlük hayattaki önemini bir kez daha hatırlatmıştır. Toplanabilme teorisi ise analiz ve uygulamalı matematikte sıkça kullanılmaktadır.

Sabit nokta teorisi, diferansiyel denklemler, integral denklemler, dinamik programlama ve kısmi diferansiyel denklemler ve sistem analizine ait birçok problemin çözümü ile ilgili araştırmalarda oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Sabit nokta teorisi, yaklaşım teorisi, oyun teorisi, matematiksel ekonomiler ve uygulamalı bilimlerdeki problemlere de uygulanabilir. Ayrıca, optimizasyon, hesaplama algoritmaları, ekonomi, fizik, denge problemleri gibi birçok bilimsel alanda kullanılan önemli bir teodir [10-15]. Sabit noktanın, bir tek ve kesin hesaplama ile elde edilebilir olması büyük yarar sağlamış olsa da, dönüşümün daralma olma koşulu teoremin uygulamalarında önemli zorluklar getirmiştir. Bu nedenle birçok bilim insanı, bu teoremden uzayın yapısını genelleştirerek veya yeni dönüşüm sınıfları tanımlayarak, bu teoremin farklı genelleştirmelerini elde etmişlerdir [16, 17]. Bu konuda yapılan çalışmalara ayrıntılı olarak ikinci bölümde yer verilecektir.

İterasyon dizisi yakınsak olması durumunda dizinin limit noktası dönüşümün sabit noktasıdır. Mann, Cesàro matrisini kullanarak elde edilen iterasyon dizisinin klasik anlamda yakınsak olduğunu göstermiştir. Böylece iraksak iterasyon dizilerinin yakınsaklığını hesaplamak için toplanabilme yöntemini ortaya koymuştur [17]. Daha sonra birçok araştırmacı farklı iterasyonlarla Cesàro anlamında güçlü ve zayıf yakınsaklık üzerine çalışmalar yapmışlardır [18-21]. Literatürde Ergodik teori olarak bilinen ve oldukça geniş uygulama alanına sahip olan bu konuda yapılan birçok çalışmaya ayrıntılı olarak üçüncü bölümde yer verilecektir.

II. TEMEL KAVRAMLAR

Bu bölümde sırasıyla fonksiyonel analiz, toplanabilme, sabit nokta ve iterasyon yöntemleri ile ilgili bazı temel kavramlara yer verilmiştir.

A. Fonksiyonel Analizin Temel Kavramları

Tanım 1: L boş olmayan bir küme ve \mathbb{F} bir cisim olsun. $\forall x, y \in L$ ve $\lambda \in \mathbb{F}$ için;

$$+ : L \times L \rightarrow L$$

$$(x, y) \rightarrow x + y$$

$$\cdot : \mathbb{F} \times L \rightarrow L$$

$$(\lambda, y) \rightarrow \lambda y$$

fonksiyonları tanımlansın. $\forall x, y, z \in L$ ve $\lambda, \beta \in \mathbb{F}$ için;

$$(L1) \quad x + y = y + x$$

$$(L2) \quad (x + y) + z = x + (y + z)$$

(L3) Her $x \in L$ için $x + \theta = \theta + x = x$ olacak şekilde bir $\theta \in L$ vardır.

(L4) Her $x \in L$ için $x + (-x) = (-x) + x = \theta$ olacak şekilde bir $(-x) \in L$ vardır.

$$(L5) \quad (\lambda + \beta)x = \lambda x + \beta x$$

$$(L6) \quad \lambda(x + y) = \lambda x + \lambda y$$

$$(L7) \quad (\lambda\beta)x = \lambda(\beta x)$$

$$(L8) \quad 1x = x$$

sağlanıyorsa L kümesine, \mathbb{F} cismi üzerinde bir lineer uzay denir [22].

Tanım 2: L , \mathbb{F} cismi üzerinde bir lineer uzay ve M, L nin bir alt kümesi olsun. Eğer her $x, y \in M$ ve her $\alpha, \beta \in \mathbb{F}$ için $\alpha x + \beta y \in M$ ise, M ye L nin bir lineer alt uzayı denir. Kısaca alt uzay da denir [22].

Tanım 3: L ve M, \mathbb{F} cismi üzerinde iki lineer uzay olmak üzere her $x, y \in L$ ve $\alpha \in \mathbb{F}$ için,

$$T(\alpha x + \beta y) = \alpha T(x) + \beta T(y)$$

eşitliği var ise, $T: L \rightarrow M$ fonksiyonuna bir lineer dönüşüm denir [23].

Tanım 4: L, \mathbb{F} cismi üzerinde bir lineer uzay olmak üzere;

$$\|\cdot\| : L \rightarrow \mathbb{R}^+$$

fonksiyonu, $\forall x, y \in L$ ve $\alpha \in \mathbb{F}$ için,

$$(N_1) \quad \|x\| \geq 0,$$

$$(N_2) \quad \|x\| = 0 \Leftrightarrow x = \theta,$$

$$(N_3) \quad \|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|,$$

$$(N_4) \quad \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|,$$

koşullarını sağlıyorsa, $\|\cdot\|$ fonksiyonuna L üzerinde bir norm ve $(L, \|\cdot\|)$ ikilisine de normlu uzay (normlu lineer uzay) adı verilir [22].

Tanım 5: $(L, \|\cdot\|)$ normlu uzayında bir dizi (x_n) olsun. Her $\varepsilon > 0$ için $n > n_0(\varepsilon)$ olduğunda $\|x_n - x\| < \varepsilon$ olacak şekilde bir $n_0(\varepsilon) \in \mathbb{N}$ doğal sayısı mevcutsa, (x_n) dizisine L de yakınsak dizi denir. $\lim_n x_n = x$ veya $(x_n) \rightarrow x, n \rightarrow \infty$ şeklinde gösterilir [26].

Tanım 6: $(x_n), (L, \|\cdot\|)$ normlu uzayında bir dizi olmak üzere, her $\varepsilon > 0$ için $m, n > n_0(\varepsilon)$ olduğunda $\|x_m - x_n\| < \varepsilon$ olacak şekilde bir $n_0(\varepsilon) \in \mathbb{N}$ doğal sayısı mevcutsa, (x_n) dizisine bir Cauchy dizisi denir [23].

Tanım 7: $(L, \|\cdot\|)$ normlu uzayında her Cauchy dizisi L deki bir noktaya yakınsak oluyorsa, bu durumda $(L, \|\cdot\|)$ normlu uzayına tam normlu uzay denir [22].

Örnek 1: \mathbb{R} alışılmış norma göre tamdır.

Örnek 2: \mathbb{C} alışılmış norma göre tamdır.

Tanım 8: $(L, \|\cdot\|)$ normlu lineer uzayı olsun. $L, d(x, y) = \|x - y\|$ norm metriğine göre tam uzay ise, bu uzaya Banach uzay adı verilir [26].

Tanım 9: L, \mathbb{F} cismi üzerinde bir lineer uzay olmak üzere, $f: L \rightarrow \mathbb{F}$ lineer dönüşümüne lineer fonksiyonel denir. Buradan anlaşılacağı gibi lineer fonksiyonel, kompleks ya da reel değerli lineer bir dönüşüm olur [24].

Tanım 10: L, \mathbb{F} cismi üzerinde bir normlu uzay olmak üzere L üzerinde tanımlı tüm sınırlı lineer fonksiyonellerden oluşan Banach uzayına, L nin normlu duali denir. L' şeklinde ifade edilir [24].

Tanım 11: L' Banach uzayının normlu duali $L'' = (L')'$ uzayına, L nin ikinci duali denir. İkinci dual uzay da bir Banach uzaydır [24].

Tanım 12: L, \mathbb{F} cismi üzerinde bir normlu uzay olsun. Eğer $L = L''$ ise L uzayına yansımali (reflektif) uzay denir [24].

Tanım 13: $(L, \|\cdot\|)$ normlu uzayında bir dizi (x_n) olsun. Eğer,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$$

olan $x \in L$ varsa, (x_n) dizisi x e kuvvetli yakınsaktır denir. Kısaca $(x_n) \xrightarrow{k} x$, $n \rightarrow \infty$ ile gösterilir [22].

Tanım 14: $(L, \|\cdot\|)$ normlu uzayında bir dizi (x_n) olsun. Eğer her $f \in L'$ için

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(x_0)$$

olmak üzere bir $x_0 \in L$ elemanı varsa (x_n) dizisi x_0 a zayıf yakınsaktır denir [22].

Tanım 15: Bir E Banach uzayının birim yuvarı $B_x(E) := \{x \in E : \|x\| = 1\}$ olarak tanımlasın. Eğer $x \in B_x$ için;

$$\frac{d}{dt} (\|x + ty\|) |_{t=0} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\|x + ty\| - \|x\|}{t}$$

limiti var ise, bu durumda L uzayının normu $x \in B_x$ noktasında Gateaux diferansiyellenebilir olarak ifade edilir. B_x in her bir noktasında Gateaux diferansiyellenebilir ise bu durumda L ye Gateaux diferansiyellenebilirdir denir. Her $y \in B_x$ için $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\|x+ty\| - \|x\|}{t}$ limiti $x \in B_x$ den bağımsız olarak mevcut ise, L ye düzgün Gateaux diferansiyellenebilirdir denir [25].

B. Toplanabilme ile İlgili Temel Kavramlar

Bu kesimde toplanabilme ile ilgili temel kavramlara yer verilmiştir.

Tanım 1: $\mathbb{F} = (\mathbb{R}$ veya $\mathbb{C})$ bir cismi ve (s_n) , $\sum a_n$ serisinin kısmi toplamlar dizisi olsun. $n, k = 1, 2, \dots$ için $a_{nk} \in \mathbb{F}$ olmak şartı ile $A = (a_{nk})$ sonsuz matrisi verilsin. Öte yandan, (s_n) dizisinden (E_n) dizisine bir dönüşüm;

$$E_n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{nk} s_k$$

şeklinde tanımlansın. Bu taktirde (E_n) dizisine, (s_n) kısmi toplamlar dizisinin A – dönüşüm dizisi, A ya ise diziden diziye bir dönüşüm adı verilir [22].

Tanım 2: Herhangi bir $A = (a_{nk})$; $n, k = 1, 2, \dots$ matrisi verilsin. A matrisi ile oluşturulan dönüşüm yakınsak olan her diziyi yine yakınsak olan bir diziye dönüştürüyor ve aynı zamanda limiti de koruyorsa, A matrisine regülerler denir. Regüler matrislerin sınıfı $(c, c)_{reg}$ ile gösterilir [9].

Şimdi yukarıdaki regülerlik tanımını karakterize eden ve Silverman–Toeplitz Teoremi olarak bilinen teoremi ifade edelim [9].

Teorem 1: Bir $A = (a_{nk})$ $n, k = 1, 2, \dots$ matrisi regülerdir, ancak ve ancak

- i) $\forall k$ için $\lim_{n \rightarrow \infty} a_{nk} = 0$
- ii) $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{\infty} a_{nk} = 1$
- iii) $\forall n$ için $\sum_{k=0}^{\infty} |a_{nk}| < \infty$.

Tanım 3: Kısmi toplamlar dizisi (s_n) olan bir $\sum a_n$ serisi verilsin. $A = (a_{nk})$ matrisi yardımıyla (s_n) kısmi toplamlar dizisinin (E_n) dönüşüm dizisi

$$E_n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{nk} s_k$$

şeklinde tanımlansın. Eğer $\lim_{n \rightarrow \infty} E_n = s$ ise $\sum a_n$ serisine (yani (s_n) dizisine) s değerine A toplanabilir denir [27].

Tanım 4: Kısmi toplamlar dizisi (s_n) olan bir $\sum a_n$ serisi verilsin. (s_n) kısmi toplamlar dizisinin matris elemanları

$$a_{nv} = \begin{cases} \frac{1}{n+1} & , \quad v \leq n \text{ için} \\ 0 & , \quad v > n \text{ için} \end{cases}$$

ile verilen A matrisi ile oluşturulan (b_n) dönüşüm dizisi;

$$b_n = \frac{1}{n+1} \sum_{v=0}^n s_v$$

olarak tanımlanırsa, buna Cesàro ortalama denir ve $(C, 1)$ ile gösterilir;

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = s$$

ise $\sum a_n$ serisi s değerine $(C, 1)$ toplanabilir denir [27].

Tanım 5:

$$b_n = \frac{1}{n+1} \sum_{v=0}^n s_v$$

şeklinde tanımlansın. Eğer,

$$\sum_{n=1}^{\infty} |b_n - b_{n-1}| < \infty$$

ise $\sum a_n$ serisi $[C, 1]$ toplanabilir denir [28].

Tanım 6: (p_n) ,

$$P_n = \sum_{v=0}^n p_v \rightarrow \infty, \quad n \rightarrow \infty$$

şartını sağlayan pozitif sayıların bir dizisi olacak şekilde (s_n) dizisinden (r_n) dizisine

$$r_n = \frac{1}{P_n} \sum_{v=0}^n p_v s_v$$

olarak tanımlanan (r_n) dizisine Riesz ortalaması veya Riesz dönüşümü denir ve (R, p_n) şeklinde gösterilir [29].

Tanım 7: Kısmi toplamlar dizisi $s = (s_n)$ olan $\sum a_n$ serisi verilsin.

$$P_n = p_0 + p_1 + p_2 + \dots + p_n \neq 0 \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

ve

$$r_n = \frac{p_n s_0 + p_{n-1} s_1 + \dots + p_0 s_n}{P_n} = \frac{1}{P_n} \sum_{v=0}^n p_{n-v} s_v$$

olmak üzere

$$\lim_{n \rightarrow \infty} r_n = s$$

ise (s_n) dizisi s değerine (N, P_n) – limitlenebilir veya N_p limitlenebilir (Nörlund limitlenebilir) denir [27].

C. Sabit Nokta ve İterasyon Yöntemleri

Banach'ın 1922 de ortaya koyduğu sabit nokta teoremi (Banach daralma prensibi), özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısında birçok araştırmacının geliştirdiği iterasyon yöntemleri, daralma dönüşümleri ve farklı uzay seçimleri ile birçok sabit nokta teoremlerinin tanımlanmasına olanak sağlamıştır. Zamanla bu gelişmeler konunun literatüre sabit nokta teorisi olarak yerleşmesine neden olmuştur [16, 20, 21].

Lineer olmayan problemlerin çözümünde, iterasyon yöntemleri oldukça yaygın kullanılan çok faydalı matematiksel bir yöntemlerdir. İterasyon yöntemi Liouville tarafından tanıtılmış ve Cauchy tarafından kullanılmıştır [2, 16]. Banach'ın sabit nokta teoreminde kullandığı ve başlangıç değeri problemlerinin varlık ve teklik ispatında kullanılan bu yöntem, ilk olarak Picard tarafından sistematik olarak geliştirildi [30]. Literatüre bakıldığında hem sabit nokta teorisi hem de iterasyon yöntemleri üzerine yapılan çalışmalara paralel olarak birçok iterasyon yönteminin geliştirildiği görülmektedir.

Şimdi sabit nokta teorisi ile ilgili tanım, teorem ve sık kullanılan dönüşüm sınıfları ile çeşitli iterasyon yöntemleri verilecektir.

Tanım 1: $X \neq \emptyset$ bir küme ve $T: X \rightarrow X$ dönüşümü verilsin. Bu takdirde,

$$Tx = x$$

şartını sağlayan bir $x \in X$ varsa, bu x noktasına T nin sabit noktası (fixed point) denir. T dönüşümünün sabit noktalarının kümesi F_T , $F(T)$ ya da $Fix(T)$ şeklinde gösterilir [31]. Bu çalışma boyunca F_T gösterimi kullanılacaktır.

Örnek 1: $X = [0,1]$ ve $T: X \rightarrow X$, $Tx = x^2$ ise $F_T = \{0,1\}$ olur.

Tanım 2: (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir dönüşüm olsun. $\forall x, y \in X$ için;

$$d(Tx, Ty) \leq \lambda d(x, y)$$

olacak şekilde bir $\lambda > 0$ sayısı mevcut ise T ye bir Lipschitz dönüşümü denir [31].

Tanım 3: (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir Lipschitz dönüşümü olmak üzere $\forall x, y \in X$ için,

$$d(Tx, Ty) \leq d(x, y)$$

ise T ye bir genişlemeyen (nonexpansive) dönüşüm denir [31].

Tanım 4: (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir dönüşüm olmak üzere $x, y \in X$ ve $x \neq y$ için,

$$d(Tx, Ty) < d(x, y)$$

ise T ye kesin daralma (strict contraction) dönüşümü denir [31].

Tanım 5: (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir Lipschitz dönüşümü olmak üzere, $\forall x, y \in X$ için,

$$d(Tx, Ty) \leq \lambda d(x, y)$$

koşulunu sağlayan en az bir $\lambda \in [0,1)$ sayısı varsa, T daralma (contraction) dönüşümü olarak adlandırılır [31].

Yukarıda tanımlanan dönüşümler arasında,

Daralma \Rightarrow Kesin Daralma \Rightarrow Genişlemeyen \Rightarrow Lipschitz

şeklinde bir bağıntı vardır.

Aşağıda bir iterasyon yönteminin en genel şekildeki tanımı verilerek, en yaygın kullanılan bazı iterasyon yöntemleri tanıtılacaktır.

(X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir dönüşüm olsun, en genel şekli ile bir sabit nokta iterasyon yöntemi, f bir fonksiyon olmak üzere

$$\begin{cases} x_0 \in X, \\ x_{n+1} = f(T, x_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

olarak tanımlanır.

Tanım 6: (1) ile verilen ifade de her $n \in \mathbb{N}$ için Picard iterasyonu (ardışık yaklaşıklar dizisi)

$$x_{n+1} = f(T, x_n) = Tx_n$$

şeklinde tanımlanır [30].

Picard iterasyon yöntemi, başlangıç değer problemleri ve integral denklemlerinin çözümü için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Picard iterasyonunun genişlemeyen (nonexpansive) dönüşümlerin sabit noktasına yakınsamadaki problemi Krasnoselskii aşağıdaki iterasyon yöntemi ile ortadan kaldırmıştır [32].

Schaefer, Krasnoselskii iterasyon yöntemini genelleştirmiştir [33].

Genişlemeyen (nonexpansive) dönüşümlerin sabit noktalarına yaklaşırken kullandığımız en genel iterasyon Mann iterasyon yöntemidir. Bu yöntem Krasnoselskii iterasyonundan yaklaşık iki yıl önce bir matris formunda tanımlanmasına rağmen, şekilsel olarak Krasnoselskii iterasyonunun genelleştirilmiş bir şeklidir.

Tanım 7 (Mann İterasyon Yöntemi): $(\alpha_n) \subset [0,1]$ şartını sağlayan bir reel sayı dizisi olmak üzere (1) ile verilen ifadede $\forall n \in \mathbb{N}$ için Mann iterasyonu;

$$\begin{cases} x_0 \in X, \\ x_{n+1} = f(T, x_n) = (1 - \alpha_n)x_n + \alpha_nTx_n \end{cases}$$

şeklinde tanımlanır (Mann, 1953).

Tanım 8 (Halpern İterasyon Yöntemi): $x_0 \in X, u \in X, (\alpha_n) \subset [0,1]$ şartını sağlayan bir reel sayı dizisi olmak üzere (1) ile verilen ifadede $\forall n \in \mathbb{N}$ için Halpern iterasyonu;

$$x_{n+1} = \alpha_n u + (1 - \alpha_n)Tx_n$$

şeklinde tanımlanır [34].

Aşağıda verilen ve sabit nokta teorisinde yaygın bir şekilde kullanılan Ishikawa iterasyon yöntemi, 1974 yılında ilk olarak Shiro Ishikawa tarafından geliştirildi [35].

Tanım 9 (Ishikawa İterasyon Yöntemi): $\forall n \in \mathbb{N}$ için $(\alpha_n), (\beta_n) \subset [0,1]$ şartlarını sağlayan reel sayı dizileri olmak üzere (1) ile verilen ifadede Ishikawa iterasyonu;

$$\begin{cases} x_{n+1} = f(T, x_n) = (1 - \alpha_n)x_n + \alpha_nTy_n \\ y_n = (1 - \beta_n)x_n + \beta_nTx_n \end{cases}$$

şeklinde tanımlanır [35].

2000 yılında M. A. Noor tarafından üç adımlı iterasyon yöntemi tanımlanmıştır [36]. Daha sonra Agarwal S-iterasyon yöntemini [37]; Thianwan iki adımlı Mann iterasyon yöntemini [38]; Karahan ve Özdemir S^* -iterasyon yöntemini geliştirmişlerdir [39].

Ayrıca, bu iterasyon yöntemlerine dayanan çok kullanışlı birçok hibrit iterasyon yöntemi geliştirilmiştir. Picard-Mann iterasyon yöntemi; Picard-S iterasyon yöntemi; SP- İterasyon yöntemi; Abbas-Nazır iterasyon yöntemi gibi yöntemler bunlardan bazılarıdır.

Mevcut iterasyon yöntemlerinden daha sade ve hızlı olan yeni üç adımlı iterasyon yöntemi ise Karakaya ve arkadaşları tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [40].

Tanım 10 (Yeni Üç Adımlı İterasyon Yöntemi): $\forall n \in \mathbb{N}$ için $(\alpha_n) \subset [0,1]$ şartlarını sağlayan reel sayı dizisi olmak üzere (1) ile verilen ifadede yeni üç adımlı iterasyon yöntemi

$$\begin{cases} x_{n+1} = Ty_n \\ y_n = (1 - \alpha_n)z_n + \alpha_nTz_n \\ z_n = Tx_n \end{cases}$$

şeklinde tanımlanır.

Daralma dönüşümlerde X bir tam metrik uzay alınırsa, bu dönüşümün tek olan bir sabit noktası vardır. Bu teorem lineer ve lineer olmayan denklemlerin çözümünde birçok uygulamada kolaylıklar sağlamaktadır. Şimdi bu durumu karakterize eden teoremi verelim [41].

Teorem 1 (Banach Daralma Prensipli veya Banach Sabit Nokta Teoremi): X bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir daralma dönüşümü olsun. Bu halde;

- T, X te bir tek x sabit noktasına sahiptir.
- Herhangi bir $x_0 \in X$ için $x_{n+1} = Tx_n$ $n = 0,1,2, \dots$ ile tanımlanan Picard iterasyonu tarafından üretilen $(x_n)_{n=0}^{\infty}$ dizisi x noktasına yakınsar.

Tam olmayan metrik uzaylar için ise kesin daralma (strict contraction) dönüşümü tanımlanır. Tam olmayan metrik uzaylarda tanımlanan kesin daralma dönüşümlerin sabit noktaları olmayabilir. Bu dönüşümlerde sabit noktalarının varlığını garanti altına almak için, çalışılan uzayı kompakt almak yeterlidir. Teorem 1 deki (i) ve (ii) şartlarını sağlayan bir dönüşüme bir Picard operatörü denir [31].

Banach daralma Prensibinde T dönüşümü sürekli olmalıdır. Bazı araştırmacılar çalışmalarında süreklilik gerektirmeyen daralma şartları tanımlayarak aşağıdaki sabit nokta teoremlerini geliştirmişlerdir.

Teorem 2 (Kannan Teoremi): (X, d) bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ dönüşümü verilsin. Eğer T dönüşümü $\forall x, y \in X$ için

$$d(Tx, Ty) \leq \alpha [d(x, Tx) + d(y, Ty)]$$

olacak şekilde en az bir $\alpha \in [0, \frac{1}{2})$ vardır koşulunu sağlıyorsa T bir Picard operatörüdür [42].

Teorem 3 (Chatterjea Teoremi): (X, d) bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ dönüşümü verilsin. Eğer T dönüşümü $\forall x, y \in X$ için

$$d(Tx, Ty) \leq \beta [d(x, Ty) + d(y, Tx)]$$

olacak şekilde en az bir $\beta \in [0, \frac{1}{2})$ vardır koşulunu sağlıyorsa T bir Picard operatörüdür [43].

Teorem 4 (Zamfirescu Teoremi): (X, d) bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir dönüşümü verilsin. $\forall x, y \in X$ için;

- i) $d(Tx, Ty) \leq \lambda d(x, y)$
- ii) $d(Tx, Ty) \leq \alpha [d(x, Tx) + d(y, Ty)]$
- iii) $d(Tx, Ty) \leq \beta [d(x, Ty) + d(y, Tx)]$

şartlarından en az birisi doğru olsun. Eğer $\lambda \in [0, 1)$, $0 < \alpha$, $\beta < \frac{1}{2}$ koşullarını sağlayan λ, α ve β reel sayıları mevcut ise, bu durumda T bir Picard operatörüdür [44].

En genel daralan şartlarından biri ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Teorem 5: (X, d) bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir dönüşümü verilsin. $\forall x, y \in X$ için;

$$d(Tx, Ty) \leq h \cdot \max\{d(x, y), d(x, Tx), d(y, Ty), d(x, Ty), d(y, Tx)\}$$

olmak üzere, bir $h \in (0, 1)$ mevcut ise T dönüşümüne yarı daralma (quasi contraction) denir. Ayrıca T bir Picard operatörüdür.

Berinde, Zamfirescu Teoremindeki (i) ve (iii) koşullarından daha genel olan ve T dönüşümünün sürekliliğini gerektirmeyen Tanım 11 de ifade edilen hemen hemen daralma dönüşümünü tanımladı ve bu daralma dönüşümüne bağlı olarak literatürdeki birçok sabit nokta teoreminin genellemesi olan Teorem 5 i elde etti [45].

Tanım 11: (X, d) bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ dönüşümü verilsin. $\forall x, y \in X$ için

$$d(Tx, Ty) \leq \delta d(x, y) + Ld(y, Tx)$$

veya

$$d(Tx, Ty) \leq \delta d(x, y) + Ld(x, Ty)$$

olacak şekilde bir $\delta \in (0, 1)$ ve $L \geq 0$ sayıları varsa, T ye bir hemen hemen daralma dönüşümü (almost contraction) denir.

Teorem 6: (X, d) bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir dönüşüm olmak üzere, T dönüşümü;

$$d(Tx, Ty) \leq \delta d(x, y) + Ld(y, Tx)$$

şartını sağlayan bir hemen hemen daralma dönüşümü olduğunda,

- i) $F_T = \{x \in X : Tx = x\} \neq \emptyset$;
- ii) Herhangi bir $x_0 \in X$ için $x_{n+1} = Tx_n$; $n = 0, 1, 2, \dots$ şeklinde verilen $(x_n)_{n=0}^{\infty}$ dizisi, bazı x_* F_T ye yakınsar.

Teoremden de anlaşılacağı gibi hemen hemen daralma dönüşümleri tek bir sabit noktaya sahip olmak zorunda değildirler. Aşağıda verilen teorem ile bir hemen hemen daralma dönüşümünün sabit noktası tek yapılabilmektedir [45].

Teorem 7: X bir tam metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir hemen hemen daralma dönüşümü olsun. $\forall x, y \in X$ için

$$d(Tx, Ty) \leq \rho d(x, y) + L_1 d(x, Tx)$$

olmak üzere, $\rho \in (0,1)$ sabiti ve $L_1 \geq 0$ vardır. Bu takdirde,

- i) T dönüşümünün tek bir sabit noktası vardır. Yani $F_T = \{x_*\}$ dir.
- ii) Herhangi bir $x_0 \in X$ için $x_{n+1} = Tx_n$ $n = 0,1,2, \dots$ şeklinde verilen $(x_n)_{n=0}^{\infty}$ Picard iterasyonundan elde edilen dizi $x_* \in F_T$ ye yakınsar.

III. ASİMPTOTİK OLARAK GENİŞLEMİYEN DÖNÜŞÜMLER İÇİN CESARO ORTALAMASININ GÜÇLÜ YAKINSAKLIĞI

Fiziksel düşüncenin matematiksel bir gelişimi olan ergodik teori ilk olarak istatistiksel mekanik ile ilgili düşüncelerden ortaya çıkmıştır. Daha sonra denge problemleri, ölçü teorisi, olasılık teorisi vs. gibi bir çok alanda sıkça kullanılmıştır [46, 47].

Ergodik teori çalışmaları fonksiyonel analiz ve toplanabilme teorisi ile ilgilidir. Ergodik teori en genel şekliyle aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

T, X Banach uzayı üzerinde lineer operatör ve $(T^n)_{n \in \mathbb{N}}, T^0 = I$ ve $T^n = TT^{n-1}$ iterasyon dizisi olmak üzere,

$$\left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} T^j \right\}$$

şeklindeki dönüşüm dizilerinin yakınsaklığını ve bununla ilgili sonuçları inceler.

Genişlemeyen dönüşümlerin önemli bir sınıfının doğal bir genellemesi olan asimptotik olarak genişlemeyen dönüşüm kavramı, Goebel ve Kirk tarafından ortaya konmuş ve bu dönüşüm sınıfı için ilk sabit nokta teoremi elde edilmiştir [48]. Bu teoremden; eğer C bir düzgün konveks Banach uzayın boş olmayan kapalı konveks ve sınırlı bir alt kümesi ise, bu takdirde C nin her asimptotik olarak genişlemeyen kendi üzerine tanımlı dönüşümü bir sabit noktaya sahiptir. Kirk vd. ne göre; eğer bir yansılmalı (reflexive) E Banach uzayı (ve E nin her bir kapalı sınırlı konveks kümeleri) genişlemeyen dönüşümler için sabit nokta özelliğine sahip ise, bu takdirde ayrıca bir genişlemeyen iterasyona sahip herhangi bir asimptotik olarak genişlemeyen dönüşüm de sabit nokta özelliğine sahip olacaktır [49]. Asimptotik olarak genişlemeyen dönüşümler kullanılarak günümüze kadar ergodik teori üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Burada ilk olarak bu konuda literatürde yer alan bazı önemli çalışmalara yer verilecektir.

Baillon ilk olarak aşağıdaki lineer olmayan ergodik teoremi ispatlamıştır [18].

Teorem 1: E Hilbert uzayının boş olmayan kapalı konveks bir alt kümesi C ve $F_T \neq \emptyset$ olacak şekilde $T: C \rightarrow C$ bir dönüşüm olsun. Bu takdirde $\forall x \in C$ için,

$$T_n x = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n T^i x \quad (2)$$

Cesàro anlamında toplanabilme T dönüşümünün bir sabit noktasına zayıf yakınsar.

Bruck Frechet diferansiyellenebilen normlar ile tanımlı düzgün konveks Banach uzaylarında genişlemeyen dönüşümler için lineer olmayan ergodik teoremini ortaya koymuştur [50]. Daha sonra genişlemeyen dönüşümler için Baillon'un teoremi genişletilmiştir [51]. Birçok yazar asimptotik olarak genişlemeyen dönüşümlerin Cesàro ortalamalarının iteratif yaklaşımı üzerinde çalışmıştır [52-54].

Halpern ($u = 0$) ilk olarak Halperen iterasyonu olarak bilinen bir genişlemeyen T dönüşümü için aşağıdaki iterasyon şemasını ortaya koymuştur [34]:

$$\begin{aligned} u, x_0 \in C, \alpha_n \in [0,1], \\ x_{n+1} = \alpha_n u + (1 - \alpha_n) T x_n, \quad \forall n \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Son kırk yıl içinde çeşitli ek koşullarla T nin yaklaşık sabit noktaları için bu şemanın güçlü yakınsaması üzerine birçok önemli araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda, (3) nolu iterasyonun;

$$\alpha_n = \frac{1}{n^a}, \quad (a \in (0,1))$$

şartı ile Lions tarafından [72] çalışmasında;

- i) $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$
- ii) $\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n = \infty$
- iii) $\sum_{n=1}^{\infty} |\alpha_n - \alpha_{n+1}| < \infty$

şartları ile Wittmann tarafından güçlü yakınsaklığı elde edilmiştir [55]. Yine (3) nolu iterasyon, bir Hilbert uzayında [56-58]; bir düzgün Gateaux diferansiyellenebilen normu ile düzgün konveks Banach uzaylarında çalışılmıştır [52]. Ayrıca, farklı çalışmalarda bir (T_n) genişlemeyen dönüşüm dizisi için veya bir genişlemeyen dönüşüm yarı grubu için (3) ün güçlü yakınsaklığı elde edilmiştir [59-63].

Düzgün konveks ve düzgün Banach uzaylarda, Xu çalışmasında bir genişlemeyen T dönüşümü için,

$$x_{n+1} = \alpha_n u + (1 - \alpha_n) \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n T^j x_n, \quad (4)$$

Cesàro ortalamasının (x_n) Halpern iterasyonunun güçlü yakınsaklığını elde etmiştir [64].

Xu, $(\alpha_n) \subset [0,1]$ olmak üzere

- i) $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$
- ii) $\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n = \infty$
- iii) Ya $\sum_{n=0}^{\infty} |\alpha_{n+1} - \alpha_n| < \infty$ ya da $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\alpha_{n+1}}{\alpha_n}\right) = 1$

şartlarını sağlayan

$$x_{n+1} = \alpha_n f(x_n) + (1 - \alpha_n) T x_n \quad (5)$$

ile verilen (x_n) viscosity iterasyon şemasını tanımlamıştır [65].

Yine Xu, (x_n) explicit iterasyonun düzgün Banach uzaylarda ki T dönüşümün bir p sabit noktasına güçlü yakınsadığını ispatlamıştır.

Song ve Chen genişlemeyen T dönüşümü için Cesàro anlamında (x_n) viscosity iterasyonunu

$$x_{n+1} = \alpha_n f(x_n) + (1 - \alpha_n) \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n T^i x_n, \quad (6)$$

olarak tanımlamıştır [66]. Ayrıca aynı kişiler (x_n) dizisinin bir düzgün konveks Banach uzayında tanımlı zayıf dizisel sürekli dual dönüşümlerinin bazı F_T sabit noktalarına güçlü yakınsadığını ispatlamışlardır.

Yao vd. tarafından yapılan çalışmalarda, (x_n) iterasyonunu

$$x_{n+1} = \alpha_n u + \beta_n x_n + \gamma_n T x_n, \quad n \geq 0 \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmıştır [67]. Aynı yazarlar, (x_n) dizisinin her $n \geq 0$ için

- i) $\alpha_n + \beta_n + \gamma_n = 1$
- ii) $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$ ve $\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n = \infty$
- iii) $\lim_{n \rightarrow \infty} \gamma_n = 0$

olarak verilen kontrol şartları altında T nin bir sabit noktaya güçlü yakınsadığını ispatlamışlardır.

Song, aşağıda ifade edilen asimptotik genişlemeyen T dönüşümü için Cesàro anlamında Mann iterasyonunun güçlü ve zayıf yakınsaklığını elde etmiştir [21]:

E düzgün Gateaux diferansiyellenebilen normu ile verilen bir düzgün konveks Banach uzay ve C, E nin boştan farklı, kapalı, konveks alt akümesi olsun. x_0 keyfi başlangıç değeri için asimptotik genişlemeyen T dönüşümün Cesàro anlamında Mann iterasyonunu aşağıdaki gibi tanımlamıştır:

$$x_{n+1} = \alpha_n x_n + (1 - \alpha_n) \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n T^j x_n, \quad n \geq 0,$$

olmak üzere

$$\sum_{n=0}^{\infty} b_n < +\infty$$

ve (α_n) , $(0,1)$ açık aralığında bir reel dizi olsun. Eğer,

- i) $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$
- ii) $\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n(1 - \alpha_n) = +\infty$
- iii) $0 < \liminf_{n \rightarrow \infty} \alpha_n \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \alpha_n < 1$

şartlarından biri sağlanıyorsa (x_n) nin güçlü ve zayıf yakınsaklığı ispatlanmış olur.

Song ve Zhang tarafından yapılan bir başka çalışmada ise aşağıdaki sonuç elde edilmiştir [68].

E düzgün Gateaux diferansiyellenebilen normu ile verilen bir düzgün konveks Banach uzay ve C ise E nin boştan farklı, kapalı, konveks bir alt kümesi olsun. $T: C \rightarrow C$ asimptotik olarak genişlemeyen bir dönüşüm ve (x_n) ;

$$x_{n+1} = \alpha_n u + (1 - \alpha_n) \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n T^j x_n, \quad n \geq 0 \quad (8)$$

olarak tanımlansın. Kabul edelim ki $(\alpha_n) \in (0,1)$ dizisi aşağıdaki şartları sağlasın.

- i) $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$,
- ii) $\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n = \infty$,
- iii) $b_n = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n (k_j - 1)$ olmak üzere $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{\alpha_n} = 0$.

Bu taktirde $n \rightarrow \infty$, (x_n) dizisi T nin bazı x_* sabit noktalarına güçlü yakınsaktır.

Zhu ve Chen, genişlemeyen dönüşümler için Cesàro anlamında

$$x_{n+1} = \alpha_n u + \beta_n x_n + \gamma_n \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n T^i x_n, \quad n \geq 0 \quad (9)$$

iterasyonunu ve

$$x_{n+1} = \alpha_n f(x_n) + \beta_n x_n + \gamma_n \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n T^i x_n, \quad n \geq 0 \quad (10)$$

viscosity iterasyonunu tanımlamışlardır [19].

Şimdi Cesàro anlamında Halpren iterasyonun kuvvetli yakınsaklığını ortaya koyan Song'un çalışmasını ayrıntılı olarak inceleyelim [20].

Burada E , reel skaler cisim üzerinde tanımlı bir Banach uzay ve E' ise E nin dual uzayı olarak kullanılacaktır. E den $2^{E'}$ nin içine tanımlı J dual dönüşümü her $x \in E$ için;

$$J(x) = \{f \in E' : \langle x, f \rangle = \|x\| \|f\|, \|x\| = \|f\|\},$$

olarak tanımlansın.

$B_x(E) := \{x \in E : \|x\| = 1\}$ bir E Banach uzayının birim yuvarını tanımlasın. E nin konvekslik modülü ise her $\varepsilon \in (0,2]$ için

$$\delta_E(\varepsilon) = \inf \left\{ 1 - \frac{\|x+y\|}{2} : \|x\| \leq 1, \|y\| \leq 1, \|x-y\| \geq \varepsilon \right\}$$

olarak tanımlanır.

Her $\varepsilon \in (0,2]$ için $\delta_E(\varepsilon) > 0$ ise E Banach uzayına düzgün konveks denir.

Eğer E düzgün konveks ise, bu taktirde $\|x\| \leq r$, $\|y\| \leq r$ ve $\|x - y\| \geq \varepsilon > 0$ olacak şekilde ki her $x, y \in E$ için;

$$\left\| \frac{x+y}{2} \right\| \leq r \left[1 - \delta_E \left(\frac{\varepsilon}{r} \right) \right]$$

dir.

Tanım 1: $(X, \|\cdot\|)$ normlu uzay, $C \subset X$ boş olmayan bir küme ve $T: C \rightarrow C$ bir dönüşüm olsun. $\forall x, y \in C$ ve $n \in \mathbb{N}$ için;

$$\|T^n x - T^n y\| \leq L \|x - y\|$$

olacak şekilde $L > 0$ mevcut ise, T ye düzgün Lipschitz dönüşüm denir.

Tanım 2: Bir X Banach uzayının boş olmayan bir alt kümesi C olsun. $T: C \rightarrow C$ bir dönüşüm olmak üzere $\forall x, y \in C$ için,

$$\|T^n x - T^n y\| \leq k_n \|x - y\|$$

olacak şekilde, $(k_n) \rightarrow 1, n \rightarrow \infty$ koşulunu sağlayan reel sayıların bir $(k_n) \subset [1, \infty)$ dizisi var ise bu durumda T asimptotik genişlemeyen dönüşüm olarak ifade edilir [48]. Asimptotik genişlemeyen dönüşümlerin sınıfı, genişlemeyen dönüşümlerin bir genellemesi olarak kabul edilir.

Lemma 1: C , bir düzgün konveks E Banach uzayın kapalı konveks bir alt kümesi ve $F_T \neq \emptyset$ olacak şekilde $T: C \rightarrow C$ asimptotik olarak genişlemeyen bir dönüşüm olsun. Bu taktirde, $\forall r > 0$ için $B_r = \{x \in E: \|x\| \leq r\}$ olmak üzere;

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \limsup_{m \rightarrow \infty} \sup_{x \in C \cap B_r} \left\| \frac{1}{m+1} \sum_{j=0}^m T^j x - T^n \left(\frac{1}{m+1} \sum_{j=0}^m T^j x \right) \right\| = 0$$

dır [53].

Aşağıda yer alan Lemma 2 bazı yazarlar tarafından ispatlanmış ve kullanılmıştır. İspatın detayları için [64, 69, 70] kaynaklarına bakınız.

Lemma 2: $\sum_{n=0}^{\infty} t_n = \infty$ ve $\limsup_{n \rightarrow \infty} c_n \leq 0$ olmak üzere (a_n) dizisi;

$$a_{n+1} \leq (1 - t_n) a_n + t_n c_n, \quad \forall n \geq 0$$

koşulunu sağlayan negatif olmayan reel sayıların bir dizisi olsun. Şu halde (a_n) , $n \rightarrow \infty$ iken sıfıra yakınsaktır.

Düzgün konveks bir Banach uzayın geometrik özelliklerinin yardımıyla [52] nin Lemma 4'ü ve [71] in Lemma 1'i bir Hilbert uzaydan bir düzgün konveks Banach uzaya genişletebilir [20].

Lemma 3: C , bir düzgün konveks E Banach uzayının boş olmayan kapalı, konveks bir alt kümesi olsun. Ayrıca, $(k_n) \in [1, +\infty)$ olmak üzere $T: C \rightarrow C$ asimptotik genişlemeyen bir dönüşüm olsun. Kabul edelim ki C de sınırlı (x_n) dizisinin;

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left\| x_{n_{k+1}} - \frac{1}{n_k + 1} \sum_{j=0}^{n_k} T^j x_{n_k} \right\| = 0$$

koşulunu sağlayan bir (x_{n_k}) alt dizisi mevcut olsun. Her $z \in C$ için;

$$h(z) = \lim_{k \rightarrow \infty} \sup \|x_{n_{k+1}} - z\|$$

olsun. Bu taktirde,

$$h(x) = \inf_{z \in C} h(z) \quad \text{ve} \quad x = Tx$$

olacak şekilde bir tek $x \in C$ mevcuttur.

Teorem 2: Düzgün Gateaux diferansiyellenebilen normu ile verilen bir düzgün konveks E Banach uzayın boş olmayan kapalı, konveks bir alt kümesi C ve $T: C \rightarrow C$, (k_n) ile birlikte verilen asimptotik olarak genişlemeyen bir dönüşüm olsun. (x_n) ,

$$x_{n+1} = \alpha_n u + (1 - \alpha_n) \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n T^j x_n \quad (11)$$

olarak tanımlansın. Kabul edelim ki $b_n = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n (k_j - 1)$ olmak üzere $\alpha_n \in (0,1)$ dizisi

- i) $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$,
- ii) $\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n = \infty$,
- iii) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{\alpha_n} = 0$,

şartlarını sağlansın. Bu taktirde $n \rightarrow \infty$ iken (x_n) dizisi T nin bazı x_* sabit noktalarına kuvvetli yakınsaktır [20].

İspat: $p \in F_T$ alalım. $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{\alpha_n} = 0$ olduğundan her $n \geq N$ için $N \in \mathbb{N}$ doğal sayısı vardır öyleki $\frac{b_n}{\alpha_n} \leq \frac{1}{2}$ dir.

$$\|x_N - p\| \leq M \text{ ve } \|u - p\| \leq \frac{M}{2}$$

olacak şekilde, yeterince büyük $M > 0$ sabiti seçelim.

$\forall n \geq 1$ için tümevarımı kullanarak $\|x_{n+1} - p\| \leq M$ olduğunu gösterelim. Kabul edelim ki bazı $n > 1$ için $\|x_n - p\| \leq M$ olsun. Göstermek istiyoruz ki $\|x_{n+1} - p\| \leq M$ dir. (11) iterasyonu ve T nin asimptotik olarak genişlemeyen bir dönüşüm olduğu kullanılarak gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - p\| &\leq (1 - \alpha_n) \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \|T^j x_n - p\| + \alpha_n \|u - p\| \\ &\leq \alpha_n \|u - p\| + (1 - \alpha_n) b_n \|x_n - p\| + (1 - \alpha_n) \|x_n - p\| \end{aligned}$$

elde edilir. Burada $\alpha_n \in (0,1)$ ve $\frac{b_n}{\alpha_n} \leq \frac{1}{2}$ olduğundan

$$\begin{aligned} &\leq \frac{M}{2} \alpha_n + \frac{\alpha_n}{2} M + (1 - \alpha_n) M \\ &= M \end{aligned}$$

olarak bulunur. Böylece, (x_n) dizisinin sınırlılığını ispatlamış oluruz.

$T_n = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n T^j$ olsun. Böylece $\|T_n x_n - p\| \leq (1 + b_n) \|x_n - p\|$ olduğundan $(T_n x_n)$ nin sınırlılığını elde ederiz. Öte yandan, (11) de her iki taraftan $T_n x_n$ çıkartılıp gerekli düzenlemeler yapılarak limit alınır;

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|x_{n+1} - T_n x_n\| = \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n \|u - T_n x_n\| = 0 \quad (12)$$

elde edilir. $\forall z \in C$ için $h(z) = \limsup_{n \rightarrow \infty} \|x_{n+1} - z\|$ olsun. Bu taktirde Lemma 3 den;

$$h(x_*) = \inf_{z \in C} h(z) \text{ ve } x_* = T x_*$$

olacak şekilde bir tek $x_* \in C$ nin mevcut olduğu görülür. İddia ediyoruzki;

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle \leq 0 \quad (13)$$

dır. Aslında,

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle = \lim_{k \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n_k+1} - x_*) \rangle = c \quad (14)$$

olacak şekilde (x_{n+1}) dizisinin bir (x_{n_k+1}) alt dizisini alabiliriz. Her $z \in C$ için $f(z) = \limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_k+1} - z\|$ olsun.

Bu taktirde Lemma 3 ten;

$$f(x) = \inf_{z \in C} f(z) \text{ ve } x = T x$$

olacak şekilde bir tek $x \in C$ vardır. Şimdi $x_* = x$ olduğunu gösterelim. $p \in F_T$ için;

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - p\| &\leq \|x_{n+1} - T_n x_n\| + \|T_n x_n - p\| \\ &\leq \|x_{n+1} - T_n x_n\| + (1 + b_n) \|x_n - p\| \end{aligned}$$

dir. Herhangi bir $(n_k) \subset (n)$ için (12) kullanılarak;

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_{k+1}} - p\| \leq \limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_k} - p\| \quad (15)$$

elde edilir.

$$h(p) = \limsup_{n \rightarrow \infty} \|x_{n+1} - p\| = \lim_{j \rightarrow \infty} \|x_{n_{j+1}} - p\|$$

olacak şekilde (x_n) nin bir (x_{n_j}) alt dizisini seçebiliriz. $n_j > n_k$ olduğu zaman (15) den;

$$\begin{aligned} h(p) &= \limsup_{j \rightarrow \infty} \|x_{n_{j+1}} - p\| \leq \limsup_{j \rightarrow \infty} \|x_{n_j} - p\| \\ &\leq \vdots \\ &\leq \limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_{k+2}} - p\| \\ &\leq \limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_{k+1}} - p\| \\ &= f(p) \end{aligned}$$

elde edilir. Açık olarak,

$$\begin{aligned} f(p) &= \limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_{k+1}} - p\| \\ &\leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \|x_{n+1} - p\| \\ &= h(p) \end{aligned}$$

dir. Böylece her $p \in F_T$ için;

$$f(p) = h(p)$$

dir. $x, x_* \in F_T$ olduğundan $f(x) = h(x)$ ve $f(x_*) = h(x_*)$ elde ederiz ve böylece bir tek olarak;

$$x = x_* \text{ ve } f(x_*) = \inf_{z \in C} f(z)$$

dir. Verilen herhangi bir $t \in (0,1)$ için;

$$z_t = x_* + t(u - x_*) = (1 - t)x_* + tu$$

alınır. Bu durumda $\lim_{t \rightarrow 0} z_t = x_*$ ve C konveks olduğundan $z_t \in C$ dir ve böylece $f(x_*) \leq f(z_t)$ dir.

$$x_{n_{k+1}} - z_t = (x_{n_{k+1}} - x_*) - t(u - x_*)$$

olduğundan,

$$\begin{aligned} \|x_{n_{k+1}} - z_t\|^2 &= \langle x_{n_{k+1}} - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle - t \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle \\ &\leq \frac{\|x_{n_{k+1}} - x_*\|^2 + \|x_{n_{k+1}} - z_t\|^2}{2} - t \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle \end{aligned}$$

dir. Bu takdirde,

$$\|x_{n_{k+1}} - z_t\|^2 \leq \|x_{n_{k+1}} - x_*\|^2 - 2t \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle$$

dir. Şu halde

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_{k+1}} - z_t\|^2 \leq \limsup_{k \rightarrow \infty} \|x_{n_{k+1}} - x_*\|^2 - 2t \liminf_{k \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle$$

olup, yani

$$\liminf_{k \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle \leq \frac{f^2(x_*) - f^2(z_t)}{2t} \leq 0 \quad (16)$$

olur. Öte yandan, J sınırlı küme üzerinde düzgün sürekli ve $\lim_{t \rightarrow 0} z_t = x_*$ olduğundan herhangi bir $\varepsilon > 0$, en az bir $\delta > 0$, her $t \in (0, \delta)$ ve her k için;

$$\langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - x_*) \rangle < \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle + \varepsilon$$

dir. (16) dan;

$$\liminf_{k \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - x_*) \rangle \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - z_t) \rangle + \varepsilon \leq \varepsilon$$

olduğu görülür. ε keyfi olduğu için;

$$\liminf_{k \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - x_*) \rangle \leq 0$$

elde ederiz. (14) den,

$$c = \liminf_{k \rightarrow \infty} \langle u - x_*, J(x_{n_{k+1}} - x_*) \rangle \leq 0$$

dir. Böylece (13) ispatlanmış olur. Şimdi biz $(x_n) \rightarrow x_*$ olduğunu gösterelim. Aslında, T nin asimptotik genişlemeyen dönüşüm olduğu ve b_n nin tanımı kullanılarak gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\begin{aligned} \|T_n x_n - x_*\| &\leq \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \|T^j x_n - x_*\| \\ &\leq \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n k_j \|x_n - x_*\| \\ &= (b_n + 1) \|x_n - x_*\| \end{aligned}$$

olur. (11) eşitliğinden;

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - x_*\|^2 &= \alpha_n \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle + (1 - \alpha_n) \langle T_n x_n - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle \\ &\leq \alpha_n \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle + (1 - \alpha_n) \|T_n x_n - x_*\| \|x_{n+1} - x_*\| \\ &\leq \alpha_n \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle + (1 - \alpha_n) (b_n + 1) \|x_n - x_*\| \|x_{n+1} - x_*\| \\ &\leq \alpha_n \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle + (1 - \alpha_n) \frac{(b_n + 1)^2 \|x_n - x_*\|^2 + \|x_{n+1} - x_*\|^2}{2} \end{aligned}$$

elde edilir. Böylece,

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - x_*\|^2 &\leq (1 - \alpha_n) \|x_n - x_*\|^2 + (1 - \alpha_n) [(b_n + 1)^2 - 1] \|x_n - x_*\|^2 \\ &\quad + 2\alpha_n \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle \\ &\leq (1 - \alpha_n) \|x_n - x_*\|^2 + b_n (b_n + 2) \|x_n - x_*\|^2 \\ &\quad + 2\alpha_n \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle \end{aligned}$$

olup, $\gamma_n = \frac{b_n}{\alpha_n} (b_n + 2) \|x_n - p\|^2 + 2 \langle u - x_*, J(x_{n+1} - x_*) \rangle$ olmak üzere,

$$\|x_{n+1} - x_*\|^2 \leq (1 - \alpha_n) \|x_n - x_*\|^2 + \gamma_n \alpha_n \tag{17}$$

dir. (13) eşitsizliği ile birlikte (x_n) dizisinin sınırlılığı ve $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{\alpha_n} = 0$ koşulundan

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \gamma_n \leq 0$$

olduğu görülür. (17) eşitsizliğine Lemma 2 uygulanarak, $(x_n) \rightarrow x_*$ sonucunu elde ederiz. Bu ise ispatı tamamlar.

Sonuç 1: Bir düzgün Gateaux diferansiyellenebilen normu ile verilen bir düzgün konveks Banach uzayın boştan farklı kapalı konveks bir alt kümesi C olsun. $T: C \rightarrow C$ genişlemeyen bir dönüşüm ve (x_n) ise (11) de tanımlanan dizi olsun. Kabul edelim ki $\alpha_n \in (0,1)$ dizisi

- i) $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0$,
- ii) $\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n = \infty$,

şartlarını sağlasın. Bu taktirde, (x_n) , $n \rightarrow \infty$ dizisi T nin bazı x_* sabit noktalarına güçlü yakınsar.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, toplanabilme, iterasyon yöntemleri ve ergodik teoremin genel bir literatür taraması yapılmıştır. Elde edilen bulgular derleme olarak sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda;

Farklı tipte iterasyon yöntemleri için sabit nokta yaklaşımları yapıldığı,

İterasyon yöntemleri ve toplanabilme metodları ile ergodik teoride önemli sonuçlar elde edildiği,

Ayrıca asimptotik genişlemeyen dönüşümler için Cesàro ortalamasının güçlü ve zayıf yakınsama koşullarının ortaya konduğu,

tespit edilmiştir.

Tüm bu teorik çalışmalar ise uygulamalı matematikte denge problemi, finansal ekonomi, optimizasyon ve operatör araştırmaları v.s. gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Grandi, G. (1703). *Quadratura circuli et hyperbolaeper infinitas hyperbolas geometricè exhibita*, Pisa.
- [2] Cauchy, A. L. (1821). *Analyse algebrique*. Chez Debure Freres, Paris, 576.
- [3] Cesàro, E. (1890). Sur la multiplication des series. *Bulletin des Sciences Mathematiques*, 14, 114–120.
- [4] Flett, T. M. (1957). On an extension of absolute summability and some theorems of Littlewood and Paley. *Proceedings of the London Mathematical Society*, (3)7, 113–141.
- [5] Das, G. (1969). Tauberian theorems for absolute Nörlund summability. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 9 (3), 357-394.
- [6] Kishore, N. & Hotta, G. C. (1970). On $|\overline{N}, P_n|$ summability factors. *Acta Scientiarum Mathematicarum (SZEGED)*, 31, 9–12.
- [7] Tanovic-Miller, N. (1979). On strong summability. *Glasnik Mathematicki*, 34 (14), 87–97.
- [8] Nörlund, N. E. (1919). Sur une application des fonctiony permutables. *Lunds Universitets Arsskrift*, 2, 16, 1–10.
- [9] Boos, J. (2000). *Classical and Modern Methods in Summability*. Oxford university Press, New York.
- [10] Ceng, L. C., Ansari, Q. & Yao, J. C. (2011). Some iterative methods for finding fixed points and for solving constrained convex minimization problems, *Nonlinear Analysis. Theory, Methods Applications*, 74, 5286–5302.
- [11] Argyros, I. K. & Hilout, S. (2013). *Computational methods in nonlinear analysis: Efficient algorithms, fixed point theory and applications*. World Scientific Publishing Company Incorporated, Hackensack, NJ.
- [12] Argyros, I. (2007). *Computational theory of iterative methods*. Elsevier Science.
- [13] Border, K. C. (1989). *Fixed point theorems with applications to economics and game theory*, Cambridge University press, Cambridge UK.
- [14] Borwein, J. & Sims, B. (2011). *The douglas-rachford algorithm in the absence of convexity*. H. H. Bauschke Burachik, R. S. Combettes, P. L. Elser, V. Luke, D. R. & Wolkowicz, H., ed. *Fixed-point algorithms for inverse problems in science and engineering*. Springer New York, 93–109.
- [15] Shehu, Y. (2011). Iterative methods for family of strictly pseudocontractive mappings and system of generalized mixed equilibrium problems and variational inequality problems. *Fixed Point Theory and Applications*, 852789.
- [16] Liouville, J. (1837). Second memoire: Sur le developpement des fonctions ou parties de fonctions en series dont les divers termes sont assujest à satisfaire à une meme équation différentielles dusecond membre contenant un parametre variable. *Jurnal de Mathématiques pures et appliques*, 2, 16–35.
- [17] Mann, W. R. (1953). Mean value methods in iteration. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 4, 506–510.
- [18] Baillon, J. B. (1975). Un the'ore`me de type ergodique pour les contractions non line'aires dans un espaces de Hilbert. *Comptes Rendus Academie Sciences ParisA B*, 280, 1511–41.
- [19] Zhu, Z. & Chen, R. (2014). Strong Convergence on Iterative Methods of Cesàro Meansfor Nonexpansive Mapping in Banach Space. *Hindawi Publishing Corporation Abstract and Applied Analysis*, Article ID 205875.
- [20] Song, Y. (2011). Halpern iteration of Cesàro means for asymptotically nonexpansive mappings. *ScienceAsia*, 37, 145–151.
- [21] Song, Y. (2010). Mann iteration of Cesàro means for asymptotically nonexpansive mappings. *Nonlinear Analysis*, 72, 176–82.
- [22] Madox, I. J. (1970). *Elements of Functional Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [23] Bayraktar, M. (2006). *Fonksiyonel Analiz*, Atatürk Üniversitesi Yayınları, Erzurum.
- [24] Musayev, B. & Alp, M. (2000). *Fonksiyonel analiz*. Kütahya.

- [25] Takahashi, W. (2000). *Nonlinear functional analysis – Fixed point theory and its applications*. Yokohama Publishers, Yokohama.
- [26] Kreyszig, E. (1978). *Introductory functional analysis with applications*, John Wiley-Sons, Newyork.
- [27] Petersen, G. M. (1966). *Regular matrix transformations*. Mc Graw Publishing Company Limited, London-New York-Toronto.
- [28] Fekete, M. (1911). Zur theorie der divergenten reihen. *Mathematical es Termezs Ertesitö* (Budapest), 29, 719–726.
- [29] Mazhar, S. M. (1966). On the Summability factors of infinite series. *Publicationes Mathematicae Debrecen*, 13, 229–236.
- [30] Picard, E. (1890). Memoire sur la théoïre dés équations aux dérivées partielles et la méthode des approximations successives. *Jurnal deMathématiques pures et appliquées*, 6, 145–210.
- [31] Berinde, V. (2007). *Iterative approximation of fixed points*. Springer, Berlin.
- [32] Krasnoselskii, M. A. (1955). Two remarks on the method of succesive approximations, *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, 10, 123–127.
- [33] Schaefer, H. (1957). Über die Methode Sukzessiver Approximationen. *jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, 59, 131–140.
- [34] Halpern, B. (1967). Fixed points of nonexpansive maps. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 73, 957–61.
- [35] Ishikawa, S. (1974). Fixed points by a new iteration method. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 44, 147–150.
- [36] Noor, M. A. (2000). New approximation schemes for general variational inequalities, *Journal of Mathematics and Applications*, 251, 217–229.
- [37] Agarwal, R. P., O'Regan, D. & Sahu, D. R. (2007). Iterative construction of fixed points of nearly asymptotically nonexpansive mapping, *Journal of Nonlinear and Convex Analysis*, 8 (1), 61–79.
- [38] Thianwan, S. (2009). Common fixed points of new iterations for two asymptotically nonexpansive nonself – mappings in a Banach Space. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 224, 688–695.
- [39] Karahan, I. & Özdemir, M. (2013). A General iterative method for approximation of fixed points and their applications. *Advances in Fixed Point Theory*, 3 (3), 510–526.
- [40] Karakaya, V., Atalan, Y., Doğan, K. & Bouzara, N. E. H. (2017). Some Fixed-Point Results for a New Three Steps Iteration Process in Banach Spaces. *Fixed Point Theory*, 18 (2), 625–640.
- [41] Banach, S. (1922). Sur les operations dans les ensembles abstraits et leur applications aux equations integrals. *Fundamenta Mathematicae*, 3 (1), 133–181.
- [42] Kannan, R. (1968). Some results on fixed points. *Bulletin of Calcutta Mathematical Society*, 60, 71–76.
- [43] Chatterjea, S. K. (1972). Fixed Point Theorems, Comptes rendus de l'Academie. *Bulgare des Sciences*, 25, 727–730.
- [44] Zamfirescu, T. (1972). Fix point theorems in metric spaces. *Archivum Mathematicum*, 23 (1972), 292–298.
- [45] Berinde, V. (2004). Approximating fixedpoints of weak contractions using the picard iteration. *Nonlinear Analysis Forum*, 9, 43–53.
- [46] Zhang, J. & Cui, Y. (2014). Iterative algorithms based on hybrid method and Cesàro mean of asymptotically nonexpansive mappings for equilibrium problems. *Fixed Point Theory and Applications*, 16 (2014), 1–16.
- [47] Combettes, P.L. & Hirstoaga, S. A. (2005). Equilibrium programming in Hilbert spaces. *Journal of Nonlinear and Convex Analysis*, 6, 117–136.
- [48] Goebel, K. & Kirk, W. A. (1972). A fixed-point theorem for asymptotically nonexpansive mappings. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 35, 171–4.
- [49] Kirk, W. A., Yanez, C. M. & Shin, S. S. (1998). Asymptotically nonexpansive mappings. *Nonlinear Analysis*, 33, 1–12.
- [50] Bruck, R. E. (1979). A simple proof of the mean ergodic theorem for nonlinear contractions in Banach spaces. *Israel Journal of Mathematics*, 32 (2-3), 107–116.
- [51] Hirano, N. & Takahashi, W. (1979). Nonlinear ergodic theorems for nonexpansive mappings in Hilbert spaces. *Kodai Mathematical Journal*, 2, 11–25.
- [52] Shimizu, T. & Takahashi, W. (1996). Strong convergence theorem for asymptotically non-expansive mappings. *Nonlinear Analysis*, 26, 265–72.
- [53] Shioji, N. & Takahashi, W. (1999a). A strong convergence theorem for asymptotically non-expansive mappings in Banach spaces. *Archivum Mathematicum*, 72, 354–9.
- [54] Moore, C. & Nnoli, B. V. C. (2001). Strong convergence of averaged approximants for Lipschitz pseudocontractive maps. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 260, 269–78.
- [55] Wittmann, R. (1992). Approximation of fixed points of nonexpansive mappings. *Archivum Mathematicum*, 59, 486–91.

- [56] Reich, S. (1974). Some fixed-point problems. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei*, 57, 194–8.
- [57] Reich, S. (1983). Some problems and results in fixed point theory. *Contemporary mathematics*, 21, 179–87.
- [58] Reich, S. (1994). Approximating fixed points of nonexpansive mappings. *Panamerican Mathematical Journal*, 4, 23–8.
- [59] Song, Y. (2007) Iterative approximation to common fixed points of a countable family of nonexpansive mappings. *Applied analysis*, 86, 1329–37.
- [60] Song, Y. (2008a). A new sufficient condition for the strong convergence of Halpern type iterations. *Applied Mathematics and Computation*, 198, 721–8.
- [61] Song, Y. & Xu, Y. (2008). Strong convergence theorems for nonexpansive semigroup in Banach spaces. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 338, 152–61.
- [62] Song, Y. & Chen, R. (2006a). Strong convergence theorems on an iterative method for a family of finite nonexpansive mappings. *Applied Mathematics and Computation*, 180, 275–87.
- [63] Song, Y. & Chen, R. (2008). Strong convergence of an iterative method for non-expansive mappings. *Mathematische Nachrichten*, 281, 1196–204.
- [64] Xu, H. K. (2002). Iterative algorithms for nonlinear operators. *Journal of the London Mathematical Society*, 66, 240–56.
- [65] Xu, H. K. (2004). Viscosity approximation methods for nonexpansive mappings. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 298 (1), 279–291.
- [66] Song, Y. & Chen, R. (2007). Viscosity approximate methods to Cesàro means for nonexpansive mappings. *Applied Mathematics and Computation*, 186 (2), 1120–1128.
- [67] Yao, Y., Liou, Y. C. & Zhou, H. (2009). Strong convergence of an iterative method for nonexpansive mappings with new control conditions, *Nonlinear Analysis. Theory, Methods and Applications*, 70 (6), 2332–2336.
- [68] Song, G. & Zhang, H. (2011). Reproducing kernel Banach spaces with the ℓ_1 norm II: Error analysis for regularized least square regression. *Neural computation*, 23 (10), 2713–2729.
- [69] Liu, L. S. (1995). Ishikawa and Mann iteration process with errors for nonlinear strongly accretive mappings in Banach spaces. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 194, 114–25.
- [70] Xu, H. K. (2003). An iterative approach to quadratic optimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 116, 659–78.
- [71] Matsushita, S. & Kuroiwa, D. (2004). Strong convergence of averaging iterations of non-expansive nonselfmappings. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 294, 206–14.
- [72] Lions, P. L. (1977). Approximation de points fixes de contraction. *Comptes Rendus Academie Sciences Paris A B*, 284, 1357–9.